



Foto: Apple maps

Energieffektivisering av dricksvattendistribution

**– Dataanalys och simulering av pumpdrift vid
Görvälns vattenverk**

*Energy performance of drinking water distribution
- data analysis and simulation of pump operation*

Anton Thorstensson

Energieffektivisering av dricksvattendistribution - Dataanalys och simulering av pumpdrift vid Görvälns vattenverk

Energy performance of drinking water distribution - data analysis and simulation of pump operation

Anton Thorstensson

Handledare: Alexander Myrsten, Daniel Hellström, Norrvatten
Ämnesgranskare: Sven Smårs, institutionen för energi och teknik, SLU
Examinator: Åke Nordberg, institutionen för energi och teknik, SLU

Omfattning: 15 hp
Nivå, fördjupning och ämne: Avancerad nivå, A1N, teknik
Kurstitel: Projektarbete i energisystem
Kurskod: TE0012
Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp
Kursansvarig institution: energi och teknik

Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2020
Omslagsbild: Görvälns vattenverk foto: Apple maps
Serietitel: Projektarbete i energisystem, institutionen för energi och teknik, SLU
Delnummer i serien: 2020:02
Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: norrvatten, förbrukningsprognos, renvattenpumpar, högreservoarer, vattentorn, fyllnadskrav

Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Förord

Denna rapport utgör resultatet av kursen *Projektarbete i energisystem* och är en del i min utbildning på civilingenjörsprogrammet i energisystem vid Sveriges lantbruksuniversitet och Uppsala universitet. Projektet utfördes under sommaren 2020 och har haft till uppgift att undersöka möjligheter för energieffektivisering av dricksvattenpumparna vid Norrvattens vattenverk Görvåln.

Beställare av projektet är kommunalförbundet Norrvatten. Handledare har varit Alexander Myrsten och Daniel Hellström från Norrvatten. Sven Smårs har varit ämnesgranskare och Åke Nordberg examinator för projektet, båda vid institutionen för Energi och teknik, Sveriges lantbruksuniversitet.

Jag skulle vilja tacka de som är nämnda ovan för den hjälp jag fått i samband med genomförandet av projektet. Jag vill också tacka Bengt Ingeströms stipendiefond som genom Sveriges ingenjörer beviljat ett ekonomiskt stöd för genomförandet av projektet.

Tack!

Anton Thorstensson

Uppsala den 31 augusti 2020

Abstract

This project investigates the efficiency of the water distribution system from Görvåln's pumping station to Norrvatten's central consumption zone. The goal is to propose actions that lead to enhanced energy efficiency. The project evaluates the operation of the pumps that transport the drinking water, and simulates the distribution with a focus on Tunberget's high reservoir. The analysis is done using a dense dataset of measurement from pressure, flow and level sensors in the system. First, the pumps have been analyzed individually as far as possible. Further, all possible combinations of the six pumps used are also analyzed. The modeling of the system is done in MatLab Simulink and adjusted to the empirical conditions that apply to the real system. The project also investigates the possibilities of create consumption forecasts with machine learning algorithms and using these to improve the distribution system.

The results shows that there exists a potential for energy efficiency. The greatest potential is found in the pump operation and in the choice of favorable pump combinations. The implementation of consumption forecasts increases delivery security but also reduce energy consumption to a certain extent. The total energy efficiency improvement is estimated at 257 MWh annually, corresponding to 2.4 % of the water pumps' total energy consumption in 2019.

Sammanfattning

I det här projektet analyseras effektiviteten i leveransen av dricksvatten från Görvälns vattenverk till Norrvattens centrala förbrukningszon. Målet är att arbetet ska resultera i förslag på åtgärder som leder till energieffektivisering. Arbetet utvärderar driften av renvattenpumparna som transporterar dricksvattnet samt simulerar distributionen med fokus på Tunbergets högreservoar. Analysen görs med hjälp av högupplöst mätdata från tryck-, flöde- och nivåsensorer i systemet. Utöver att pumparna analyseras enskilt, analyseras även samtliga kombinationer av de sex pumparna som använts. Modelleringen av systemet görs i MatLab Simulink och anpassas till de empiriska förhållanden som gäller för det verkliga systemet. Projektet undersöker även möjligheterna i att ta fram förbrukningsprognoser med maskininlärningsalgoritmer samt använda dessa för att förbättra distributionen.

Resultatet från arbetet visar att det finns potential till energieffektivisering. Störst potential finns i pumpdriften samt i valet av pumpkombinationer. Distributionen kan genom implementering av förbrukningsprognoserna framförallt öka leveranssäkerheten men också minska energiåtgången i viss grad. Den sammanlagda energieffektiviseringen uppskattas till 257 MWh/år, motsvarande 2,4 % av renvattenpumparnas totala energiförbrukning under 2019.

Innehållsförteckning

1. Inledning	2
1.1 Beskrivning av nuläge	2
1.2 Mål och syfte	3
1.3 Frågeställningar	4
1.4 Avgränsningar	4
1.5 Rapportens disposition	4
2. Bakgrund	5
2.1 Tidigare studier	5
2.2 Görvälns vattenverk	7
2.3 Strömningsmekanik och pumpar	10
3. Data	13
3.1 Pumpar	13
3.2 Höjder och volymer	14
3.3 Driftdata	14
3.4 Datakvalité och verifiering	15
3.5 Enheter	15
4. Metod	16
4.1 Systembeskrivning	16
4.2 Generella beräkningar	17
4.3 Dataanalys	18
4.4 Simulering	18
4.5 Förbrukningsprognoser	20
5. Resultat	22
5.1 Enskilda pumpar	22
5.2 Pumpkombinationer	26
5.3 Distribution	29
5.4 Förbrukningsprognoser	33
6. Diskussion	35
6.1 Pumpdrift	35
6.2 Distribution	36
6.3 Utanför avgränsningarna	36
6.4 Felkällor	37
6.5 Fortsatta studier	38
7. Slutsatser	39
Författarens förslag	40
Referenslista	41
Bilaga A	42

1. Inledning

1.1 Beskrivning av nuläge

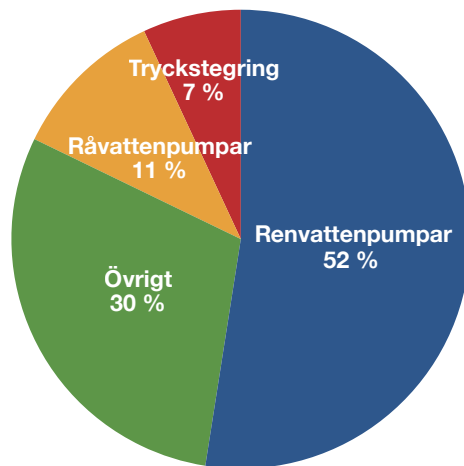
I norra Storstockholm samarbetar 14 kommuner genom kommunalförbundet Norrvatten för produktion och distribution av dricksvatten. Norrvatten förser nästan 700 000 människor med dricksvatten och är Sveriges fjärde största dricksvattenproducent (Norrvatten 2020).

Huvudsakligen produceras dricksvatten i Görvälns vattenverk vid Mälaren i Järfälla kommun. Utöver detta finns ett antal grundvattentäkter som används som reserv. Från Görväln pumpas vattnet efter reningsprocessen ut i rörledningar. Kommunerna förses med vatten genom distributionsnätet som utöver ledningarna också består av reservoarer (vattentorn), tryckstegringsstationer och uttagspunkter där övergång till kommunalt ägda ledningsnät sker. Norrvattens distributionsnät visas i figur 1 nedan.



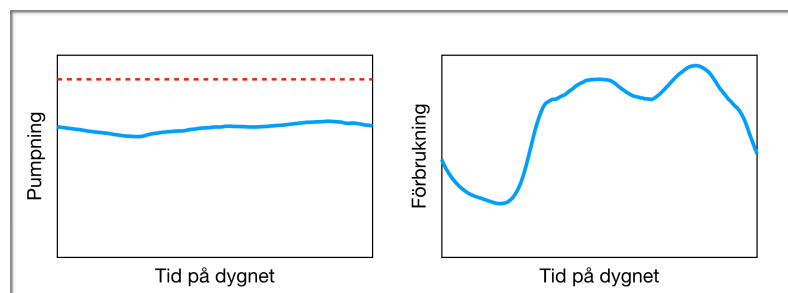
Figur 1. Översiktsskarta som visar Norrvattens distributionsnät i blått. Gula trianglar markerar vattentäkter, blåa cirklar markerar reservoarer och vita fyrkanter är tryckstegringsstationer.

Energieffektivisering av produktion och distribution är av central betydelse för att kunna minska Norrvattens miljöpåverkan. Huvuddelen av energiåtgången för Norrvatten finns vid Görvälns vattenverk och utgörs i största del av elektricitet till olika pumpar. Produktionen av dricksvatten börjar med att råvatten pumpas från Mälaren och in i verket. Därefter pumpas vattnet genom olika steg i reningsprocessen och slutligen tryckhöjs vattnet i renvattenpumpar som får det att flöda ut i nätet. På grund av tryckhöjningen i det sista steget kräver renvattenpumparna mest elektricitet på verket. Medelproduktionen 2019 var 1600 liter dricksvatten per sekund och under hela året producerade Norrvatten 51 miljoner kubikmeter dricksvatten. Den samlade elförbrukningen uppgick till 23 700 MWh (Norrvatten 2020). Av detta står motorerna till renvattenpumparna för 53 %, ungefär 12 600 MWh per år. Fördelningen av Norrvattens elförbrukning visas i figur 2. Renvattenpumparnas höga andel av den totala elförbrukningen innebär att även en liten energieffektivisering i denna del kan leda till ett märkbart resultat för Norrvattens totala elförbrukning.



Figur 2. Fördelning av Norrvattens elförbrukning under 2019, totalt 23 700 MWh. Kategorin övrigt inkluderar reningsprocesser och okategoriserad förbrukning.

Vid Görvälns vattenverk finns idag sex renvattenpumpar som styrs från Norrvattens driftcentral. Idag sker styrningen huvudsakligen manuellt och utifrån driftoperatörens egna erfarenhet och tolkning av mätvärden. Hur mycket vatten som pumpas vid olika tillfällen bestäms alltså av driftoperatören själv. Renvattenpumparna är parallellkopplade för att bibehålla trycket och tillsammans öka flödet. Vanligtvis skiljer sig produktion och förbrukning av dricksvattnet åt under dygnets timmar. På dygnsbasis är dock produktion och pumpning av vatten i samma storlek som förbrukningen. Detta syns i figur 3 där integralen av kurvorna är lika stora. Det är reservoarerna som lagrar vatten mellan låg- och högförbrukning. Under natten när förbrukningen är låg fylls reservoarerna och på dagen när förbrukningen är hög minskar nivåerna i reservoarerna. Genom detta kan produktionen hållas jämnare och dimensioneras utifrån den maximala dygnsförbrukningen och inte maxförbrukningen per timme.



Figur 3. Illustrering av volymflödet som pumpas ut från vattenverket och volymen som förbrukas under ett medeldygn. Den streckade linjen är maxproduktionen.

1.2 Mål och syfte

I det här projektet ska energiförbrukningen i Norrvattens vattendistributionen undersökas. Syftet är att ge ett underlag till Norrvatten om möjlig energieffektivisering av renvattenpumparna och därigenom bidra till en minskad energiförbrukning. Det övergripande målet är att ge välmotiverade förslag på hur driften skulle kunna förändras samt beräkna hur stora energibesparingar som förslagen möjliggör. Förbättringsförslagen tas fram genom simulering och analys av dataunderlag.

1.3 Frågeställningar

Projektet ska svara på följande frågeställningar:

- Hur ser pumparnas energiprestanda ut idag?
- Hur varierar pumparnas energiprestanda beroende av driftparametrar?
- Hur stora energibesparingar kan göras med bättre prognoser av förbrukningen?
- Hur stora energibesparingar kan göras genom förändrad drift av pumparna?
- Hur stora energibesparingar kan göras med ändrade fyllnadskrav på reservoarer?

1.4 Avgränsningar

Storleken och komplexiteten i Norrvattens distributionssystem leder till att detta projekt behöver tydliga avgränsningar. Mot denna bakgrund är det därför nödvändigt med ett antal förenklingar och avgränsningar för att, inom ramen för projektiden, kunna redovisa ett resultat.

Projekt kommer att avgränsa sig till att titta på det som kallas centralzonen i ledningsnätet. Det utgörs grovt av kommunerna Järfälla, Sollentuna, Solna, Sundbyberg och en del av Danderyd. Bakgrunden till denna geografiska avgränsning är förekomsten av tryckstegringsstationer mellan den centrala zonen och övriga zoner. Analys av hela området skulle medföra en större datamängd än vad det finns utrymme för i detta projekt. Den huvudsakliga av förbrukningen finns dock i den centrala zonen där även en stor andel av reservoarvolymen finns.

Förenklingen av systemet som analyseras leder till att ingen fullständig hydrostatisk modell används. Istället approximeras tryckförluster utifrån historisk data och uppskattas i simuleringen. Därför kommer inte arbetet att kunna svara på exakt hur distribution ska utföras, bara jämföra och redogöra för konsekvenser av olika sätt.

Arbetet kommer undersöka driften under januari 2018 – maj 2020 men fokusera på driften under 2019. Det är även utifrån driften som var under 2019 som möjlig energibesparing beräknas.

1.5 Rapportens disposition

Rapporten inleds med en bakgrund som förklarar systemet som ska analyseras samt tar upp tidigare forskning kring energieffektivisering och optimering av dricksvattendistribution. Därefter följer en redogörelse för tillgänglig data för systemet och sedan i avsnittet *Metod* förklaras hur analysen är uppbyggd. Resultatet är uppdelat i två delar. Den första delen fokuserar på pumpar och pumpkombinationers energiprestanda. Den andra delen fokuserar på pumpningens fördelning i tid och hur det påverkar energiåtgången. Resultat följs upp av ett kapitel för diskussion och slutligen rapportens slutsatser.

2. Bakgrund

I grunden är pumpens funktion att förflytta vatten från en lägre till en högre nivå. Elektrisk energi omvandlas till mekanisk energi genom motorn och vidare till hydraulisk energi genom pumpen (Eriksson 2007). Den hydrauliska energin används sedan till att lyfta vattnet till reservoaren eller direkt till tappstället. Energiförlusterna kommer av energiomvandlingen i motor och pump samt som friktionen i ledningarna som bland annat kommer från rörets väggar och krökar. Läckage är också en stor energibov då vatten går förlorat och all investerad energi förloras.

2.1 Tidigare studier

2.1.1 Optimering av dricksvattendistribution

Det finns få svenska studier kring optimering av dricksvattendistribution, framför allt få som berör hela eller större delar av distributionssystemet. Under arbetet i detta projekt har heller ingen dokumentation hittats som visar att avancerad driftsoptimering förekommer i Sverige. Branschorganisationen Svenskt Vatten nämner i en rapport från 2019 att det i framtiden kan komma att finnas system för optimerad drift baserat på smarta algoritmer. Däremot verkar inget utvecklingsprojekt som listas i rapporten beröra detta utan istället främst utbyggnad av sensorer för tryckmätning och läckagelokaliserings (Malm et al. 2019). Sådan digitalisering medför dock utmaningar. Vinnova projektet *DigiDrick* undersökte digitala lösningar för övervakning och styrning av vattenverk vilket resulterade i slutsatserna att det saknas funktionella sätt att kombinera, visualisera och överblicka insamlad data (Vinnova 2016).

Internationellt finns studier på dricksvattendistribution och pumpdriftsplanering. De har definierat optimeringsproblemet matematiskt – ofta med fullskaliga hydrauliska modeller och introducerat flera olika beräkningsmetoder för att lösa problemen. Gemensamt är att alla menar att optimeringsproblemet är mycket komplicerat. Detta kommer främst av icke-linjära funktioner i den hydrauliska modellen (Bagloee et al. 2018). Mot bakgrund av komplexiteten i problemen har olika algoritmer utvecklats och anpassats för kunna lösa optimeringsproblemet. Exempelvis används i flera studier den genetiska algoritmen, inspirerad av den biologiska evolutionen (Bohórqueza et al. 2015).

En kanadensisk studie menar att dagens reglering av vattendistributionssystem kan förbättras genom att bli mer proaktiv med hjälp av bättre prognoser för förbrukningen (Abdul Gaffoor 2017). Författaren menar också att komplexitet i arbetsuppgiften för driftoperatörerna kan medföra att operatörer har en tendens att kontrollera sina system konservativt och reaktivt. Studien visar på möjliga energibesparingar på upp till 25 % med en kombination av avancerade förbrukningsprognoser och realtidsanalyser av driften av distributionssystemet (Abdul Gaffoor 2017). En annan studie med liknande ansats redovisar en möjlig effektiviseringspotential på 4,2 % genom bättre planering av hur pumparna körs (Zhang et al. 2020). Den totala kostnaden för att leverera en mängd vatten är som lägst när driften

optimeras efter en så låg energiåtgång som möjligt, snarare än när maximal pumpeffektivitet eftersträvas. Det lokala optima, det vill säga den lägsta specifika energiförbrukningen i varje tidssteg, resulterar i det globala optimumet (Bene 2015).

Forskningsområdet kring avancerad modellering av dricksvattendistribution kan sammanfattas till att det handlar om en stor beräkningsutmaning. Den forskning som än så länge finns är framgångsrik gällande en energieffektivisering men fortsatt låg grad av verklig applicering (Bagloee et al. 2018; Sadatiyan Abkenar et al. 2015).

2.1.2 Energieffektivisering

Det finns en stor mängd pumpar i vattenbranschen som arbetar långt från optimalt vad gäller energieffektivitet visar en brittisk inventering (Yates & Weybourne 2001). Aktiv drift och kontinuerligt underhåll av pumpanläggningarna kan minska energiåtgången med mellan 30–50 %. Utöver det finns ett antal områden där åtgärder kan vidtas. Några av dessa är att utvärdera och löpande byta ut utrustning, förbättra körningen av flera parallellkopplade pumpar och val av pumpkombinationer samt byta till effektivare motorer. Även om den bäst lämpade och effektivaste pumpen väljs är det oundvikligt att driftkostnaderna ökar med tiden. Vanliga orsaker till detta är att pumphjul och höljen blir slitna på grund av korrosion och skador uppkomna genom kavitation (Wikström 2005).

En företeelse som leder till försämrade energiprestanda är överdimensioneringen av pumpar. Installerade pumpar är ofta överdimensionerade för att skapa redundans och trygghet i vattenleveransen (Eriksson 2007). Överdimensionering av pumpar är dock problematiskt då pumpen inte arbetar i sitt bästa läge (Jernkontorets energihandbok 2020). Vid användning av flera pumpar i grupper minskar detta problem då kombinationer av pumparna ofta kan matcha situationen tillräckligt bra. Överdimensionering är generellt ett större problem för mindre anläggningar och tryckstegringsstationer (Termens et al. 2014).

Svenskt Vatten skriver i en rapport från 2008 om branschens energieffektivitet. Den samlade energiåtgången i hela landet uppges för vattenverk, distribution och ledningsnät att vara 500 GWh/år varav 225-250 GWh/år¹ för renvattenpumpar. Författarna menar att det finns potential till effektivare pumpning genom användning av bättre motorer och pumpar med högre verkningsgrad samt kontroll av pumphjulslock (Lingsten & Lundkvist 2008). De menar också att kommuner runt om i landet generellt håller för höga nivåer i sina reservoarer och att en minskning av medelnivåerna med en meter skulle ge en nationell besparing med 5 GWh/år. Vidare menar de att energibesparing även är möjligt inom anläggningarnas uppvärmning samt att det saknas incitament för driftspersonalen att hushålla med elektriciteten. Nationellt uppskattas möjlig effektivisering för vattenverk till 40 GWh/år varav 20 GWh/år för renvattenpumparna motsvarande 8% av dess förbrukning (Lingsten & Lundkvist 2008).

¹ Det finns två angivna uppskattningar av energiåtgången för renvattenpumpar i rapporten.

I en senare rapport från Svenskt Vatten 2014 följs energianvändningen upp. Rapporten menar att elförbrukningen på svenska vattenverk utgör en allt större del av kostnaderna och att det finns ett stort behov av att öka branschens energimedvetande. Den genomförda energieffektiviseringen under åren 2008-2011 uppges nationellt till 5-15%. Osäkerheten beror på antaganden om antal anslutna kunder och elförbrukningen för ny reningsteknik som installeras. Nyckeltalet för totalt specifik energi² minskade under perioden 2008-2013 med 10%. En stor del av effektivisering har skett genom effektivare uppvärmning av lokaler med värmepumpar (Lingsten 2015).

Tabell 1. Nyckeltal för energiåtgång på större vattenverk i Sverige och Dalarna samt Stockholm. Data från Lingsten & Lundkvist 2008, Danielsson 2013 och Stockholm Vatten och Avfall 2020.

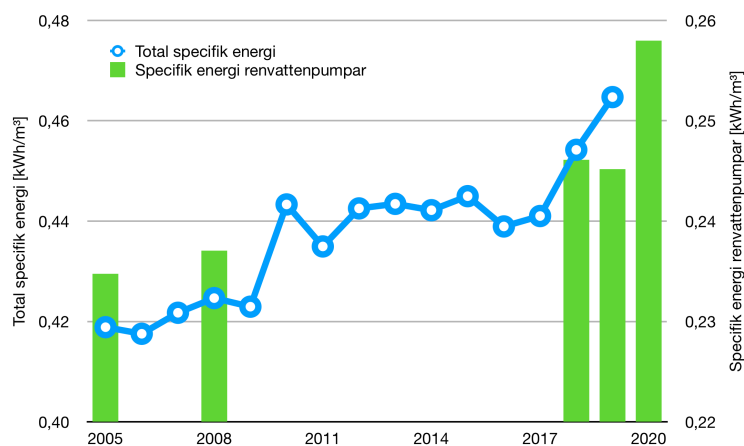
	Total specifik elförbrukning (hela vattenverket) [kWh/m ³]			Specifik elförbrukning renvattenpumpar [kWh/m ³]		
	Sverige	Dalarna	Stockholm	Sverige	Dalarna	Stockholm
Medel	0,46	0,69	0,48	0,22	0,30	0,20

I tabell 1 visas några exempel på specifik elförbrukning. Nyckeltalet kan vara missvisande att jämföra mellan olika anläggningar eftersom topografin har betydelse för hur mycket energi som behövs för pumpning. Kategorin *Sverige* syftar på medelvärdet hos ett tjugotal av Sveriges största vattenverk som kan anses vara jämförbara med Görvälns vattenverk. Det går även i tabell 1 att se att renvattenpumparna står för mellan 40–50 % av den totala energiåtgången. Stockholm Vatten, som levererar vatten till resterande kommuner i Storstockholm har en låg andel energi för renvattenpumparna men en större förbrukning för tryckstegringar ute i nätet (Stockholm Vatten och Avfall 2020). De genomförde även stora förändringar under perioden 2008-2011, bland annat byte av många motorer men även ett helt nytt renvattenpumpverk. Deras energiförbrukning minskade under perioden med 9% (Häggström u.å.).

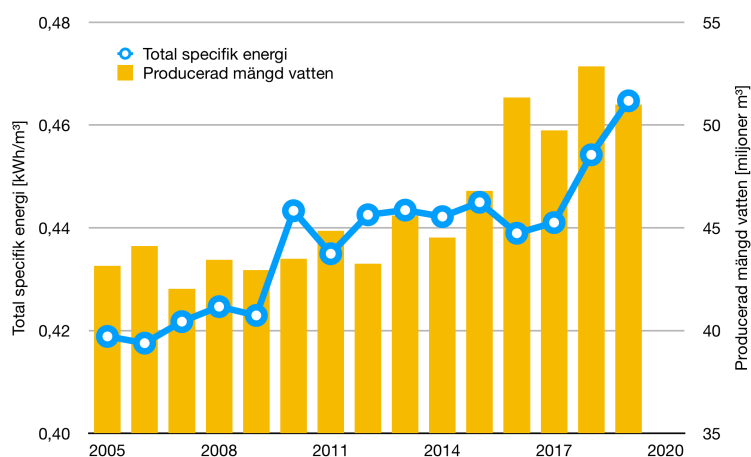
2.2 Görvälns vattenverk

Under 2019 var Norrvattens totala specifika energianvändning² 0,46 kWh/m³. Norrvatten har en målsättning om att deras totala specifika energianvändning ska vara lägre än 0,40 kWh/m³ (Norrvatten 2020). Renvattenpumparnas specifika energianvändning var 0,24 kWh/m³. Norrvattens renvattenpumpar har alltså en högre andel av förbrukningen än hos liknade vattenverk. Trots få datapunkter för historisk energiförbrukning för renvattenpumparna så syns i figur 4 att den ökar på ett liknande sätt som den totala specifika energiförbrukningen. Sambandet mellan de båda ges av korrelationskoefficienten. Vidare syns i figur 5 att den specifika energin också ökar i takt med att vattenproduktionen har skalats upp. Här hade man kunnat förvänta sig ett svagare beroende, eller kanske rent av motsatt trend, då större volymer borde kunna öka på stordriftseffekterna. Istället verkar ökad vattenvolym leda till större specifik energiåtgång. Kanske beroende på ökade förluster i distributionen till följd av generellt högre flöden och samma rörkapaciteter.

² Med specifik energi avses kvoten mellan energin i kWh och vattenvolymen som pumpats i m³.



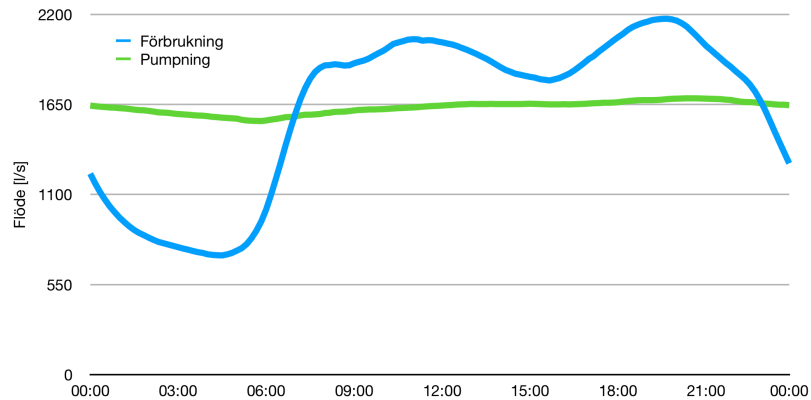
Figur 4. Total specifik energi och specifik energi för renvattenpumpar under åren 2005-2020. Värdet för 2020 avser första halvåret. Korrelationskoefficienten $\rho=0,96$.



Figur 5. Total specifik energi och producerad mängd dricksvatten i miljoner kubikmeter under åren 2005-2019. Korrelationskoefficienten $\rho=0,70$.

Produktionen är vid normaldrift mellan 1600–1800 l/s. Maxkapacitet är 2300 l/s och begränsas av reningsprocessen, inte pumparna. Under dagtid när vattenförbrukningen är hög minskar nivåerna i tornen vilket bidrar till vattenomsättningen i reservoaren. Under natten, mellan klockan 23–06, är förbrukningen av vatten låg och då fylls istället tornen. På detta sätt erhålls en utjämnande effekt av produktionen vilket är en av funktionerna med högreservoarer. Driftpersonalen siktar på att under normaldygn nå till 75 % fyllnadsgrad (Norrvatten 2019). Vid högre förbrukning siktar man på att fylla upp till 83 %³. Fyllnadsgraden bestäms av driftoperatören och baseras på erfarenhet, tidigare dygns förbrukning samt utomhustemperatur. Norrvatten har sett ett samband mellan temperatur och vattenförbrukning. Våren 2019 ledde höga temperaturer under två veckor till att vattenproduktionen tvingades vara högre än den långsiktigt hållbara produktionskapaciteten (Norrvatten 2020). I figur 6 visas pumpning och förbrukning för 2019 års medeldygn.

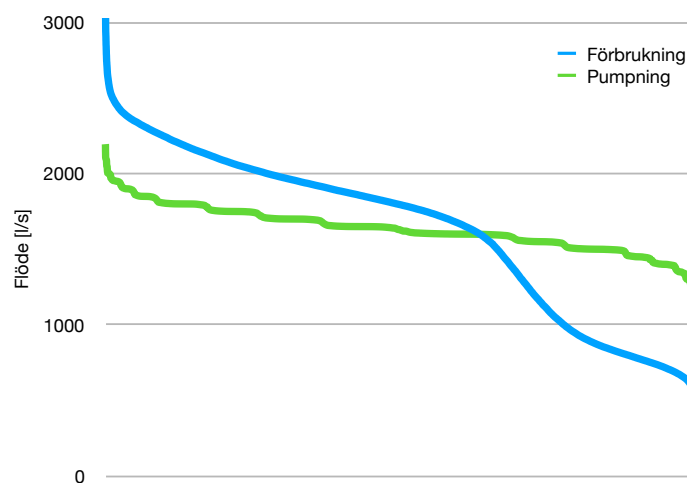
³ Robert Genetay, driftoperatör, Norrvatten, telefonsamtal 2020-08-11



Figur 6. Medeldygnet förbrukning och pumpning under 2019.

Det finns också en gräns för en lägsta nivå i reservoarerna som är acceptabel för att kunna säkerställa vattenförsörjningen vid driftstörning eller stor och oväntad förbrukning. Exempelvis vid en större brand. Idag är denna gräns för Norrvatten 50 %⁴. Reservoarerna upprätthåller även trycket så att kunder som bor högt också ska få ett erforderligt tryck vid tappstället. Energiåtgången i renvattenpumparna påverkas av nivån i reservoarerna som skapar ett mottryck. Högre nivåer medför alltså att vattnet behöver pumpas högre och mer energi går åt. Nivån och nivåförändringen i en reservoar berättar hur vattenförbrukning och pumpning förhåller sig (Bohórqueza et al. 2015). Det är därför lämpligt att reglera pumpning efter tornnivåerna.

I figur 7 har förbrukning och utgående pumpning från verket plottats i ett varaktighetsdiagram. Här syns tydligt hur förbrukningen varierar mer än utgående pumpning. Totalflödet ut från verket är under 95% av tiden mellan 1 300 och 1 972 l/s. Pumpning med ett flöde under 1 000 l/s inträffar endast 0,5% av tiden. Förbrukningen under 95% av tiden ligger mellan 532 och 2723 l/s.



Figur 7. Varaktighetsdiagram över förbrukning och pumpning från 2019. Här ses att förbrukningen varierar mer än pumpningen.

⁴ Robert Genetay, driftoperatör, Norrvatten, telefonsamtal 2020-08-11

2.3 Strömningsmekanik och pumpar

Pumpars funktion tillsammans med tryckfall och flöden behandlas av ämnesområdet strömningsmekanik. Samtliga pumpar som behandlas är centrifugalpumpar. Här följer en del av den teori som används i arbetet. Trycket från en vattenpelare, det statiska trycket, ges av ekvation 1 där p är trycket, ρ är densiteten på vatten, g är gravitationsaccelerationen och h är höjden på vattenpelaren.

$$p = \rho gh \quad (1)$$

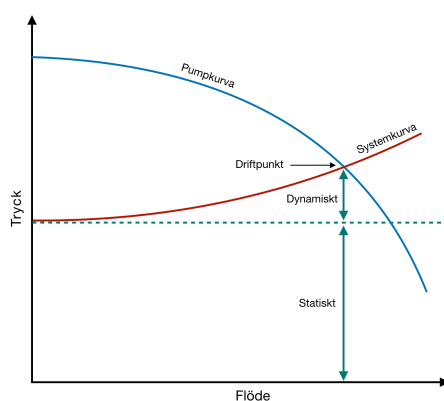
Varje pump har en specifik pumpkurva som beskriver förhållandet mellan pumptrycket och flödet, samt vid vilken driftpunkt pumpens utförande är optimalt. Detta innebär att pumpens verkningsgrad varierar med flödet genom pumpen. När en elmotor används för att driva en pump överförs den mekaniska axeleffekten som levererats av elmotorn till hydraulisk effekt av pumpen (Olsson 2008). På grund av pumpförluster är den hydrauliska effekten något lägre än den mekaniska effekten som tillförs pumpen. För ett visst utfört arbete av pumpen beror energianvändningen därför både av pumpens och motorns verkningsgrader. Elmotorerna är typiskt mest effektiva runt 75% (Willis 2017). Pumpkurvan ges generellt av ekvation 2. Där H_i är den maximala tryckhöjden, k är en konstant och Q är flödet.

$$H(Q) = H_i - kQ^2 \quad (2)$$

En systemkurva visar hur ett motstånd uppstår i ett system i förhållande till flödet som pumpas genom det. Motståndet i röret ökar kvadratisk med flödet. I projektet har även mottrycket observerats att minska med förbrukningen varför en extra, negativ term finns med. Systemkurvan ges av ekvation 3 där m och γ är konstanter och C är förbrukningen.

$$H(Q, C) = H_s + mQ^2 - \gamma C \quad (3)$$

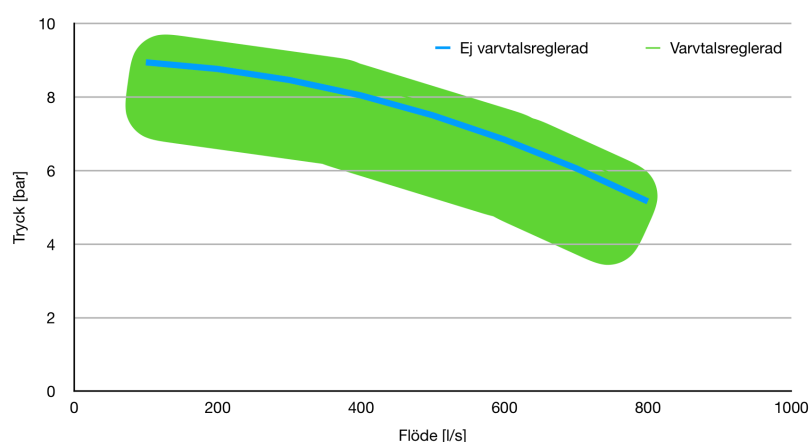
I figur 8 kombineras pump- och systemkurva. Skärningen av kurvorna bestämmer driftpunkten, det vill säga det tryck och det flöde pumpen kommer att arbeta med. Förändras systemkurvan eller pumpkurvan förändras också driftpunkten. Det innebär att flödet i en pump vanligtvis bestäms av mottrycket och i förlängningen det statiska tryck som reservoaren utgör (Eriksson 2007).



Figur 8. Pump och systemkurva illustrerat. Dynamiskt och statistik tryck samt driftpunkt angivet.

2.3.1 Varvtalsreglering

En pump kan vara varvtalsreglerad om en frekvensomriktare används för styrning av motorns rotationshastighet. Med varvtalsreglering blir pumpen mer flexibel då den kan jobba efter flera olika pumpkurvor. Arbetsområdet för pumpen ökar från endast pumpkurvan till ett större område som visas principiellt i figur 9. Användningen av att varvtalsstyra pumpar gör det lättare att kontrollera flödet (Wikström 2005). Varvtalsstyrda pumpar minskar också antalet start och stopp som annars ökar slitaget (Bagloee et al. 2018). Vid byte till varvtalstyrning kan energibesparingar göras (Bohórqueza et. al 2015). Besparingen kan bli stor om pumpen innan gått mycket av och på eller om det tidigare funnits strypventil för flödeskontroll (Willis 2017). Parallellt kopplade varvtalsstyrda pumpar bör köras på samma varvtal för bästa effektivitet (Koor et al. 2013).



Figur 9. Principiell skiss av arbetsområdet för en varvtalsreglerad pump och en ej varvtalsreglerad pump. På den horisontella axeln är flödet som pumpar ger och på vertikala axeln pumpens tryck.

Affinitetslagarna säger att flödet från en varvtalsstyrd pump är proportionellt mot varvtalet, medans trycket är kvadratisk beroende och effekten kubiskt beroende. För en pump som är dimensionerad för 1000 rpm som körs på 900 rpm blir flödet 90 %, trycket 64 % och effekten 51 % av den för 1000 rpm. Proportionaliteter ges i ekvation 4–6, där Q är flödet, H är tryckhöjden, P är effekten och n är varvtalet. Index r avser värdet vid det dimensionerade varvtalet, alltså om varvtalsregleringen inte funnits.

$$\frac{Q}{Q_r} = \frac{n}{n_r} \quad (4)$$

$$\frac{H}{H_r} = \left(\frac{n}{n_r}\right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{P}{P_r} = \left(\frac{n}{n_r}\right)^3 \quad (6)$$

Svenskt Vatten menar i en rapport att användning av varvtalsstyrda pumpar i kombination med nivåhållning i högreservoarer leder till kraftigt sämre verkningsgrad (Lingsten 2015). De förordar istället ett kontinuerligt flöde så att reservoaren balanserar ut variationerna i förbrukningen. Med deras driftförslag behövs ingen varvtalsreglering men den bygger däremot på att tillräckliga volymer finns i reservoarerna.

3. Data

Här presenteras det dataunderlag som analyserats i arbetet. Det består dels av mätdata från olika sensorer samt information om kapaciteter och specifikationer för pumpar och systemet.

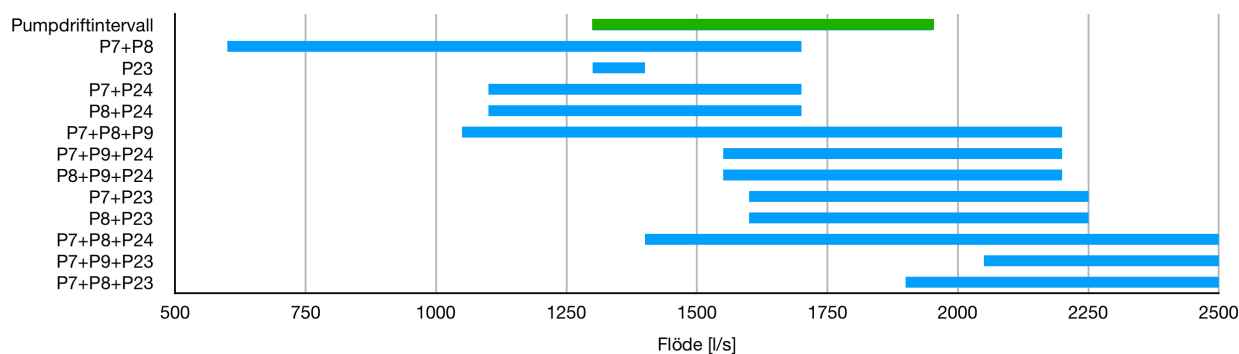
3.1 Pumpar

Det finns sex renvattenpumpar fördelade på två pumpgrupper. Pump 7-10 utgör pumpgrupp 1 och pump 23-24 utgör pumpgrupp 2. Alla pumparna är parallellkopplade, både inom grupperna och mellan grupperna. Pumparna är överlag mycket gamla men har renoverats eller delvis bytts ut med tiden. Pumparnas listas i tabell 2. Pump 10 används inte i den vanliga driften utan är en reservpump. Nyast renoverad är pump 24 som sedan 2019 har ny motor med varvtalsstyrning. Flertalet pumpar har en uppfordringshöjd som är väsentligt större än den tryckhöjd som oftast råder från vattenverket till reservoarerna. Mottrycket är oftast runt 7,0 bar, vilket kan jämföras med pumparnas dimensionerade uppfordringshöjd. En bar motsvarar ungefär 10 meters höjd.

Tabell 2. Sammanfattning över tillgängliga pumpar och dess egenskaper (Norrvatten 2019). Pump 7-10 utgör pumpgrupp 1 och pump 23-24 utgör pumpgrupp 2.

Pump	Flöde	Uppfordringshöjd	Varvtalsstyrning
P7	300-850 l/s	95 m	Ja
P8	300-850 l/s	95 m	Ja
P9	500 l/s	85 m	Nej
P10	800 l/s	95 m	Nej
P23	1400 l/s	70 m	Nej
P24	360-850 l/s	95 m	Ja

Pumparna kan kombineras på olika sätt. Mängden kombinationer begränsas av att flödet ska vara mindre än 2300 l/s. I figur 10 visas de kombinationer som varit i drift under den analyserade perioden och inom vilket spann som pumparna drifas i.



Figur 10. Flöden för de olika pumpkombinationerna som används under 2018-2020. I grönt visas intervallet där för flöden för pumpning ligger vid 95% av tiden.

Det kan i vissa fall vara svårt att avgöra vilken kombination man bör välja, eftersom hänsyn måste tas till bland annat verkningsgrad, effektuttag, ledningstryck och önskvärdheten av jämn vattenreningsprocess. Pumparnas kapacitet och verkningsgrad varierar med mottrycket. Mottrycket beror i sin tur på flödet, förbrukningen och nivån i reservoaren. Eftersom mottrycket varierar kommer kapacitet och verkningsgrad hos en viss pump eller pumpkombination att varieras under dygnets olika timmar.

3.2 Höjder och volymer

I arbetet har även uppgifter om höjder på mätare, reservoarer och nivågivare samt volymuppgifter för reservoarer används vid beräkningarna. Systemet som analyserats har avgränsats till den centrala zonen men uppgifter om övriga reservoarer har också används för att kunna bearbeta mätdatan. På grund av säkerhetsskäl är inte alla redovisade i rapporten.

3.3 Driftdata

För att kunna beräkna tillförlitliga resultat krävs generellt längre perioder av mätning – gärna månader eller år. Längre och tätare mätningar ger säkrare resultat. Det krävs också att mätutrustningen är pålitlig. Norrvatten har ett system för insamling av högupplöst driftdata. Systemet läser av sensorerna flera gånger i minuten men i detta arbete har endast medelvärden över ett 10-minutersintervall använts. Varje år ger följaktligen en serie på 52 560 värden. Mätdatan har exporterats ur webbgränssnittet *aCurve*. I tabell 3 listas ett urval av mätvärden ur systemet som använts i projektet.

Tabell 3. Sammanfattning mätdata som används i projektet.

Namn	Beskrivning	Antal	Enhet
Transformatoreffekt	Effektmätning för respektive pump	6	kW
Faktisk hastighet	Varvtal för varvtalsstyrda pumpar	3	rmp
Pumptryck	Mätning av mottrycket på högtryckssidan av pumparna	2	bar
Pumpflöde	Mätning av flödet ut från pumpgrupperna	3	l/s
Nivå lågreservoar	Nivåmätare för hur många meter är fylld från botten	2	m
Total förbrukning	Summerad förbrukning för hela systemet	1	l/s
Zon förbrukning	Förbrukning för zonerna separat	5	l/s
Total reservoar volym	Summerad volym vatten i högreservoarer i alla zoner summerat	1	m ³
Nivå högreservoar	Nivåmätare för hur många meter är fylld från botten	2	m

Mätdata har exporterats för perioden 1:a januari 2018 till 31:e maj 2020 och därefter delats upp i fem olika perioder. Dessa perioder är inte lika långa men ungefär ett halvår var. Den exakta uppdelningen visas i tabell 4. Varje period analyseras för sig i syfte att förenkla och kunna jämföra resultaten.

Tabell 4. Uppdelning av mätdata i perioder för analys.

Period	Från	Till
1	2018-01-01	2018-05-31
2	2018-06-01	2018-12-31
3	2019-01-01	2019-05-31
4	2019-06-01	2019-12-31
5	2020-01-01	2020-05-31

3.4 Datakvalité och verifiering

I detta projekt ingår sammanlagt flera miljoner mätvärden. Rimligheten i datan har kontrollerats i viss utsträckning. Främst har detta handlat om att identifiera felaktiga värden och därefter interpolera och ersätta dessa eller i vissa fall ta bort datan helt. Exempelvis har negativa flöden från pumpning och konsumtionen uttagits. Felaktigheter kan också komma från att reservvattentäkterna använts, läckage eller andra driftstörningar skett.

Det förekommer också många negativa värden i dataunderlaget, bland annat i mätpunkterna på transformatorerna till pumparna. Negativa effekter samt effekter under 1 % av installerad effekt har plockats bort från underlaget då pumpen antas inte vara i drift under dessa tider. Kontroll av antagandet genom beräkning av mängden energi som uteslutits rör sig då om mindre än 1 %. Datat för tryckgivarna efter pumparna skiljer sig åt något efter att mätvärdena har korrigerats mot mätarnas höjd. Vid kontroll framkommer att avvikelser ligger under 0,2 %.

3.5 Enheter

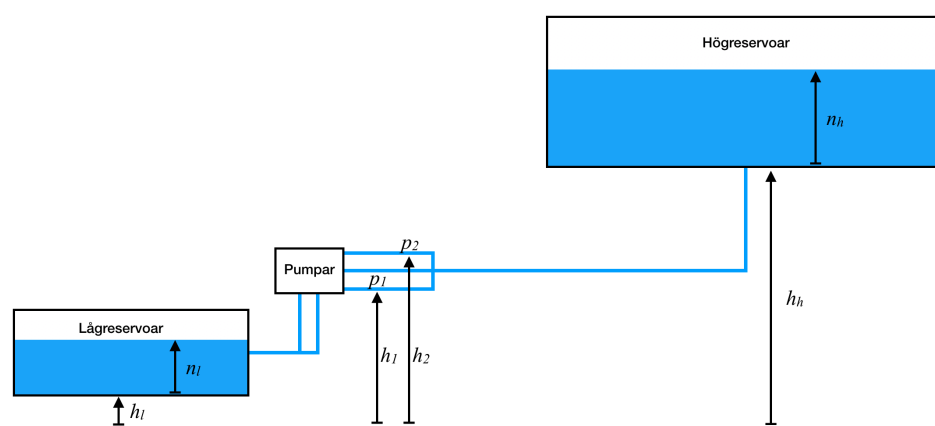
Val av enheter som används baserar sig i stort på de enheter som används av Norrvatten och som gäller för mätdata. Flöden anges i liter per sekund, l/s medan volymer anges i kubikmeter, m^3 . Effekt anges i kilowatt, kW och energi (förutom i specifik energi) i megawattimmar, MWh . Nyckeltalet specifik energi anges i enheten kWh/m^3 .

4. Metod

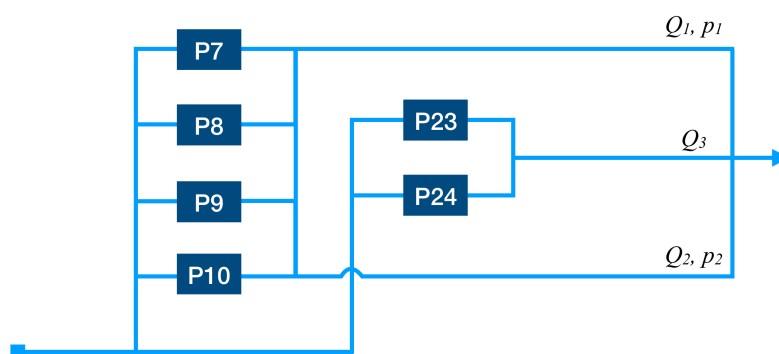
I det här kapitlet förklaras hur beräkningar och databehandling utförts. Inledningsvis har mätdatan inventerats och bedömningar gjorts över vilka nyckeltal och resultat som kan beräknas. Centrala nyckeltal i projektet är verkningsgrad och specifik energi för pumparna. Dessa kommer att analyseras tillsammans med andra parametrar för att hitta samband.

4.1 Systembeskrivning

Systemet som ska analyseras avgränsas till att börja med lågreservoaren i vattenverket och sträcker sig till en stor högreservoar i den centrala zonen av ledningsnätet. I figur 11 visas en schematisk skiss över det analyserade systemet där höjd- och nivåmarkeringar är utsatta. Därefter visas en mer detaljerad skiss av hur pumparna är kopplade, hur pumparna benämns och var mätare finns i figur 12. Mer detaljer om pumpar och beteckningar finns i kapitel 3.



Figur 11. Schematisk skiss över systemet med låg- och högreservoarerna. Skissen är ej skalendig. Beteckningen h anger statiska höjder, p tryck från mätare och n anger nivåer.



Figur 12. Förstorad schematisk skiss över de två grupper om totalt sex parallellkopplade renavattenpumpar med utsatta beteckningar och placering av sensorer för mätdatan.

Eftersom det inte finns flödesmätare för alla enskilda pumpar går det inte att analysera alla pumpar enskilt vid alla tillfällen. Istället kommer exempelvis prestandan för pump 7 utvärderas vid de tillfällen när endast pump 7 körs i den ena gruppen av pumpar. Då kan Q_1 och Q_2 summeras och användas för analys av pump 7. Trycket på högtryckssidan av pumpen mäts av två sensorer från vilket medelvärde används för alla pumpar.

4.2 Generella beräkningar

Ibland förenklas beräkningar med att anta en statisk tryckhöjd. I det här projektet används istället det faktiska mottrycket. Den faktiska tryckhöjningen som renvattenpumparna utför beror av nivån på lågreservoaren. Därför har de uppmätta trycken räknats om för att återge trycket över pumparna. För att utföra detta räknas först trycken om så att de är relativa nollnivån i RH 2000⁵. Beräkningen av det nya trycket ges av ekvation 7. Där Δp är tryckskillnaden i bar, ρ är vattnets densitet, g är gravitationsaccelerationen, h_l är höjden på nivåsensorn i lågreservoaren, n_l är nivån i lågreservoaren, p_i är det uppmätta trycket i trycksensor i och h_i är höjden på trycksensor i . De uppmätta trycken skiljer sig åt och följer inte varandra perfekt. I ekvation 7 tas ett medelvärde av de uppmätta trycken.

$$\Delta p = -\frac{\rho g(h_l + n_l)}{100000} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 p_i + \frac{\rho g h_i}{100000} \quad (7)$$

Verkningsgraden i det här arbetet definieras för systemet som innefattar både motor och pump. Verkningsgraden för en eller fler pumpar, η , beräknas med tillförd elektrisk energi och nyttig energi i form av lägesenergi hos vattnet som baseras på mottrycket, alltså inklusive strömningsmotståndet. Se ekvation 8. Där Q är flödet i liter per sekund, p är mottrycket i bar och P_{el} är elektrisk effekt tillförd motorn i kilowatt. Verkningsgraden har beräknats för varje 10-minutersintervall. Används ovan nämnda enheter tillkommer en faktor på 100 i täljaren.

$$\eta = \frac{Qp}{P_{el}} \quad (8)$$

Den specifika energin, E_s , syftar på mängden energi som behövs för att pumpa en viss mängd vatten och beräknas genom ekvation 9. Där Q är flödet i liter per sekund och P_{el} är elektrisk effekt tillförd motorn i kilowatt. Den specifika energin tar inte hänsyn till mottrycket på samma sätt som verkningsgraden. Vid användning av ovan nämnda enheter och beräkning för 10-minutersintervall tillkommer faktorn $5/18$ i täljaren.

$$E_s = \frac{P_{el}}{Q} \quad (9)$$

Uppskattningen av den möjliga energibesparingen, W , har beräknats med en uppskattad högre verkningsgrad, tidslängden som den ofördelaktiga driften infallit samt medeleffekten under den tiden. Ekvation 10 används för detta där t är tiden i timmar, P_{el} är medelvärdet på elektrisk effekt, η är medelvärdet på aktuell och ny verkningsgrad.

$$W = t \bar{P}_{el} \left(1 - \frac{\eta}{\eta_{ny}} \right) \quad (10)$$

⁵ Rikets Höjdsystem 2000, RH 2000, är Sveriges nationella höjdsystem.

4.3 Dataanalys

För att kunna säga något om mönster i datan sammanställs trender genom att medelvärden beräknas baserat på vissa villkor, exempelvis tid på dygnet och veckodag. Trender görs för pumpning, förbrukning och tornnivåer. Flöden summeras även till dygnsvolymen för att se säsongsvariationer. Mätdata har också behandlats för att avgöra vilken pumpkombination som används i varje tidssteg. Mest lämpat för att avgöra detta är pumparnas effekt. Resultatet redovisades i en ny kolumn parallellt med mätdata och möjliggjorde sortering efter pumpkombination.

4.3.1 Enskilda pumpar

För enskilda pumpar beräknas verkningsgrad och specifik energi samt sambanden mellan dessa nyckeltal och exempelvis trycket. Sambandet undersöks genom att beräkna korrelationen mellan de olika storheterna. Korrelationskoefficienten, $\rho_{x,y}$, beräknas genom ekvation 11. Utöver korrelation beräknas även medelvärden för vissa intervall och plottas i diagram för att se trender.

$$\rho_{x,y} = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 (y - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

4.3.2 Pumpkombinationer

Pumparna körs parallellt för att uppnå önskat flöde. Hur de kombineras påverkar verkningsgrad och energiåtgång. Genom att sammanställa mätdata för olika driftsituationer kan kombinationernas olika verkningsgrad och specifik energiåtgång beräknas.

4.3.3 Tornnivåer

Hur mycket mindre energi som hade behövts om man hade en lägre lägsta fyllnadsgrad i reservoarerna beräknas med hjälp av den specifika energin och mottrycket. Den specifika energin plottas mot trycket och visar alltså sambandet mellan mottrycket och energiåtgången. Om det uppträder ett tydligt samband så kan man utifrån sambandet beräkna hur energiåtgången hade förändrats om mottrycket varit lägre, det vill säga om nivån i vattentornet varit lägre. En anpassad trendlinje till populationen av mätvärden visar hur många kWh/m³ som hade sparats för varje bars skillnad i mottryck.

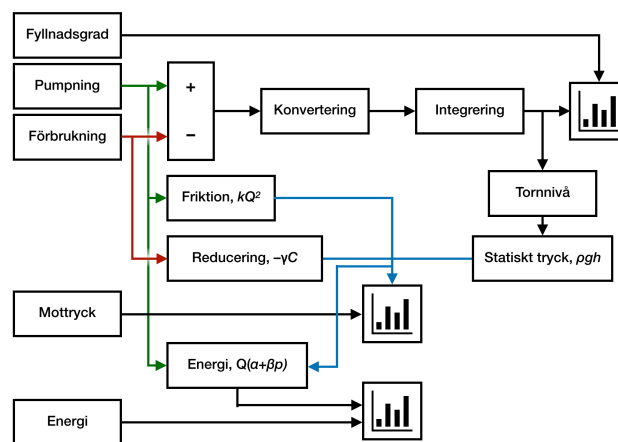
Utifrån mätdata för nivåerna i högreservoaren beräknas även skillnaden mellan faktiskt mottryck vid pumparna och det statiska trycket från reservoaren. Skillnaden kallas tryckförlust och kommer användas i simuleringen. Denna förlust uppstår av friktion då vattnet flödar genom ledningarna.

4.4 Simulering

Genom att simulera distributionen av vatten uppskattas energiförbrukningen och hur fyllnadsgraderna ser ut vid olika strategier för pumpning. Tesen är att det är onödigt att

pumpa vattnet högt upp och alltså överfylla tornen. Modellen byggs i tre steg. I första steget anpassas modellen så den följer de verkliga värdena. I de kommande stegen ersätts den verkliga pumpningen med PID-reglerad pumpning baserat på tornnivåer och börvärdeskurvor. Börvärdeskurvorna anger riktvärden för fyllnadsgrad vid olika tidpunkter under dygnet och skapas med historisk data som grund.

Perioden som valts för simuleringen är 18 april – 25 juni 2019, det vill säga sammanlagt 69 dygn. Modellen byggs genom att historisk data för pumpning och förbrukning används. Differensen dem emellan betyder att reservoaren fylls eller töms. Resultatet integreras över tiden och jämförs med motsvarande historisk data för fyllnadsgraden för reservoaren. Kalibrering av faktorer görs för att uppnå maximal anpassning. Hur jämförelsen görs visas i figur 13.



Figur 13. Skiss på modellen i steg 1. Verkliga och beräknade värden för fyllnadsgrad, tryck och energi jämförs här och modellen kalibreras för maximal överensstämmelse.

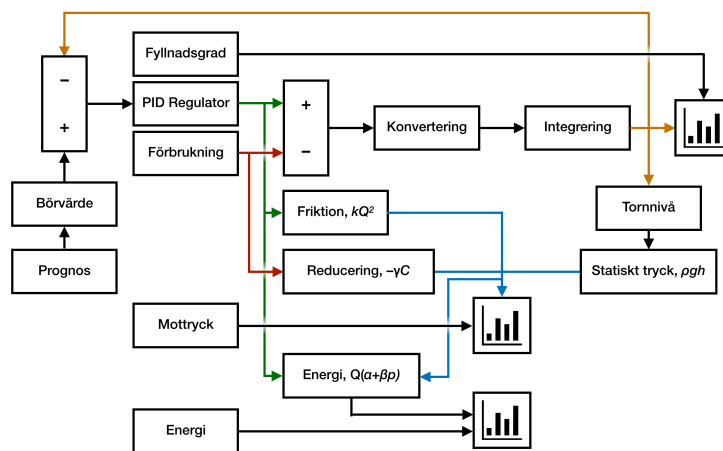
När modellen återspeglar verklighetens fyllnadsgrad byggs en modul för tryckberäkning fram. Utifrån samband i den historiska datan kan mottrycket, p , approximeras utifrån pumpning, förbrukning och fyllnadsgrad enligt ekvation 12. Där Q är pumpade flödet, C är förbrukningen, k och γ är konstanter beräknad utifrån historisk data. Utöver det statiska trycket leder ökad pumpning till större mottryck och ökad förbrukning till lägre mottryck. Även här jämförs modellen mot historisk data över trycket och kalibreras för att överensstämma.

$$p = \rho g (h_h + n_h) + kQ^2 - \gamma C \quad (12)$$

Den historiska datan har även visat på ett tydligt samband mellan specifik energiåtgång och mottryck. Därför beräknas en uppskattning av energiåtgången, W , i modellen enligt ekvation 13. Energin för olika sätt att pumpa jämförs med energin modellen beräknat och med historisk pumpdata. Utöver detta beräknas även antal tillfällen som modellen visar på underskott och överskott i reservoaren. Underskott har definierats som att fyllnadsgraden understiger 45 % någon gång mellan klockan 22.30–23:50. Överskott har definierats som att fyllnadsgraden aldrig understiger 55 % mellan klockan 22.30–23:50. Detta är en definition som utvecklats under projektet.

$$W = V(\alpha + \beta p) \quad (13)$$

Det som simuleringen ska visa är hur driften av distributionen i det avgränsade systemet påverkar energiåtgången eller leveranssäkerheten. Det antas att minskade underfyllningar leder till bättre leveranssäkerhet och att minskade överfyllningar borde minska energiåtgången. Simuleringen ska även svara på om mer exakta prognoser skulle kunna ge en mer exakt målnivå för reservoarerna och där igenom eventuellt minska energiåtgången och dessutom öka leveranssäkerheten genom att färre underskott sker. Simuleringen testas med olika tornnivåer och fyllnadskrav för se dess påverkan på energiåtgången. Som utvärdering av tornnivåerna, utöver antal dygn med över- och underfyllnad, beräknas avvikelsen mot den önskade nivån om exakt 50 % fyllnadsgrad som dygnets lägsta värde.



Figur 14. Skiss på modellen i steg 3.

Olika sätt att pumpa testas i modellen. I ett försök används kommande dygns medelförbrukning för att styra pumpningen. I ett annat försök används en PID-regulator⁶ som reglerar pumpningen utifrån differensen mellan modellens beräknade fyllnadsgrad och ett börvärde för den samma. Börvärdet beräknas inledningsvis under simulering i steg 2 endast utifrån tid på dygnet. I steg 3 används även den prognostiserade förbrukningen samt dygnets medeltemperatur för beräkning av börvärdet. Modellen i steg 3 visas i figur 14. Medeltemperaturen för Stockholm har använts och hämtats genom SMHI:s öppna datatjänst.

4.5 Förbrukningsprognoser

Tidigare studier har visat på att det går att göra bra prognoser för vattenförbrukningen. Viktiga parametrar har då varit förbrukningen både föregående timme, föregående dygn samt förbrukningen sju dagar tidigare. Vidare har även aktuell temperatur, veckodag och tid på dygnet varit viktiga parametrar. Det här projektet har utgått ifrån en prognostisering av

⁶ En PID-regulator består av proportionell, integrerande och deriverande del och utgör en styrenhet som använder feedback för modulerad styrning.

kommande dag, det vill säga en 24-timmars prognostisering. För detta antas att det finns tillgång till data om föregående dygns förbrukning, men inte föregående timmes förbrukning. Därför kan inte samma noggrannhet som funnit i tidigare studier förväntas.

Om kommande dygns förbrukning kan förutspås med en viss noggrannhet baserat på ett antal parametrar skulle detta kunna förenkla driften av vattenleveranserna. Med hjälp av en regressionslärande algoritm i MatLab skapas en sådan modell. Först skapas ett underlag av variabler som bedöms påverka vattenförbrukningen. Dessa kombineras med respektive mätvärde för förbrukningen under 2019. Variabler som används är dag och tid på året, dygnsmedeltemperatur, förbrukningen tidigare dygn och förbrukningen tidigare vecka. För prognostisering av tiden T används alltså den kända förbrukningen för tiden $T-24 h$ och $T-168 h$. Dygnsmedeltemperaturen för Stockholm hämtas från SMHI:s öppna datatjänst. Olika algoritmer testades. De två modellerna med högst noggrannhet testades på 2018 och 2020 års förbrukningar. Utifrån jämförelse av verklig förbrukning och den av modellen prognostiserade kunde den noggrannaste modellen bestämmas och dess noggrannhet kvantifieras genom beräkning av medelfel och det kvadratiska medel felet.

5. Resultat

Här redovisas resultat av undersökningarna som gjorts. Först presenteras resultatet från de enskilda pumparna och pumpkombinationerna och därefter distributionssimuleringen.

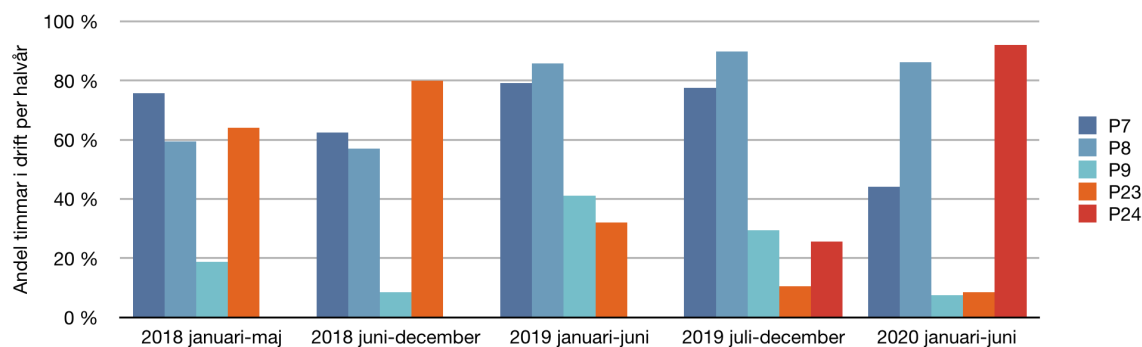
5.1 Enskilda pumpar

Generellt visar resultatet att flödet inverkar på verkningsgrad och specifik energiåtgång. Nedan redovisas resultatet av pumparnas individuella energiprestanda över hela den analyserade perioden och följs av mer detaljerat resultat för 2019. Tabell 5 visar ett sammanfattat resultat av beräkningarna av verkningsgrader och specifik energi. Beräkningar för pumpgrupp 1 är endast möjliga då de varit i drift själva i sin pumpgrupp. Under perioden har endast pump 7 (P7) och pump 8 (P8) varit självas drift i pumpgrupp 1. Det innebär att resultatet som redovisar här för P7 och P8 inte visar hela bilden av energiprestandan utan en del av den men fokus på då de körs tillsammans med pump 23 (P23) eller pump 24 (P24). Det innebär också att ingen individuell utvärdering av pump 9 (P9) och pump 10 (P10) är möjlig.

Tabell 5. Sammanfattning över individuella verkningsgrader, η , och specifika energier för pumparna, E_s , angivet i kWh/m^3 .

Pump	P7		P8		P23		P24	
	η	E_s	η	E_s	η	E_s	η	E_s
2018 januari-juni	75,8 %	0,273	69,8 %	0,287	80,3 %	0,242		
2018 juli-december	70,3 %	0,298	75,8 %	0,267	79,9 %	0,244		
2019 januari-juni	67,2 %	0,295	69,8 %	0,285	80,2 %	0,244		
2019 juli-december	76,7 %	0,256	69,8 %	0,288	80,1 %	0,241	71,9 %	0,272
2020 januari-juni	80,5 %	0,240	78,4 %	0,271	78,3 %	0,248	70,7 %	0,269
Medel	74,1 %	0,272	72,7 %	0,280	79,8 %	0,244	71,3 %	0,271
Standardavvikelse	5,3 %	0,025	4,1 %	0,010	0,8 %	0,003	0,8 %	0,002

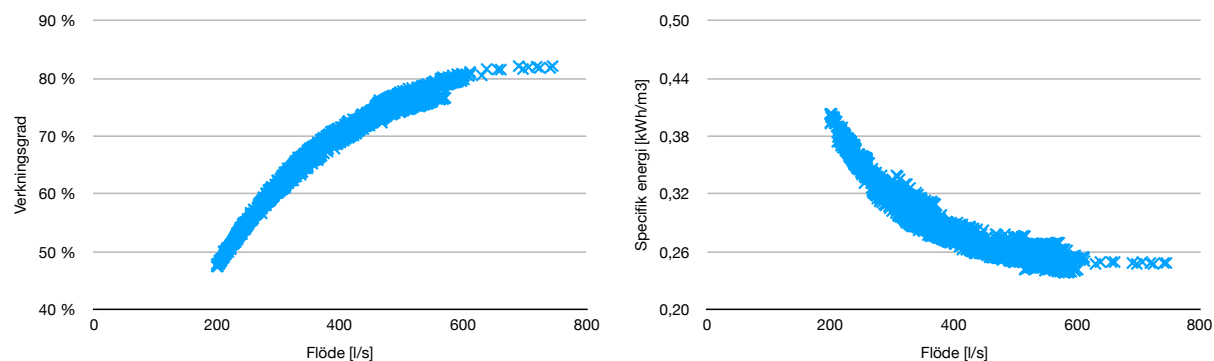
I figur 15 visas hur mycket de olika pumparna används under hela den analyserade perioden. Ett värde på 100 % motsvarar att pumpen går hela perioden. Det syns att P7, P8 och P23 dominerade 2018 och att 2019 minskade användningen av P23 mycket och att pumpgrupp 1 fick en stor del av all drift. Under 2020 tog P24 över en stor andel av driften.



Figur 15. Fördelning av antal timmar i drift för respektive pump, uttryckt i procent av periodens timmar. 2018 domineras av P7, P8 och P23. P23:s andel tas över av P24 under 2020.

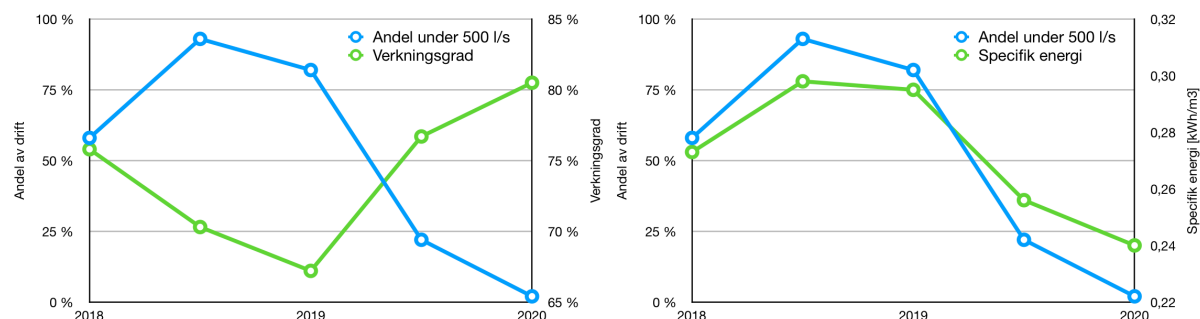
5.1.1 Pump 7

Pump 7 har under den analyserade perioden en medelverkningsgrad på 74,1 % med en standardavvikelse på 5,3 procentenheter. En anledning till variationens storlek är variationen på hur stor del av tiden pumpen haft låga flöden. Resultatet visar en stark korrelation mellan flöde och verkningsgrad samt mot specifik energi, se figur 16. Båda beräkningarna visar alltså på bättre energieffektivitet vid högre flöden.



Figur 16. Flöden för pump 7 under första halvan av 2019 plottade mot korresponderande verkningsgrad och specifik energi. Sammanlagt 3224 mätvärden motsvarande 537 drifttimmar.

Under 2019 gick P7 själv i sin grupp under ca 1 000 timmar varav 540 timmar med flöden under 500 l/s. En annorlunda drift de 540 timmarna där flöden under 500 l/s undvikits skulle ge högre verkningsgrad och under 2019 lett till en beräknad energibesparing på 42 MWh. Den verkliga besparingen är större då pumpen totalt körde 6 800 timmar i olika kombinationer. Dock finns ingen mätdata på flödet för P7 när den körts parallellt med en annan pump i samma pumpgrupp. Baserat på den starka korrelationen mellan effekt och flöde för pumpen går det att uppskatta den totala drifttiden under 2019 med flöden under 500 l/s till runt 624 timmar. Det ökar den maximala besparingen till 49 MWh, motsvarande 0,39 % av renvattenpumparnas årliga förbrukning. I figur 17 visas ett resultat som styrker sambandet mellan energiprestanda och hur stor del av tiden som flödet varit under 500 l/s. Det kan tilläggas att andelen under 500 l/s har varierat kraftigt de senaste åren men under första halvan minskats kraftigt. Det är ingen förändring som uppges vara medveten⁷.

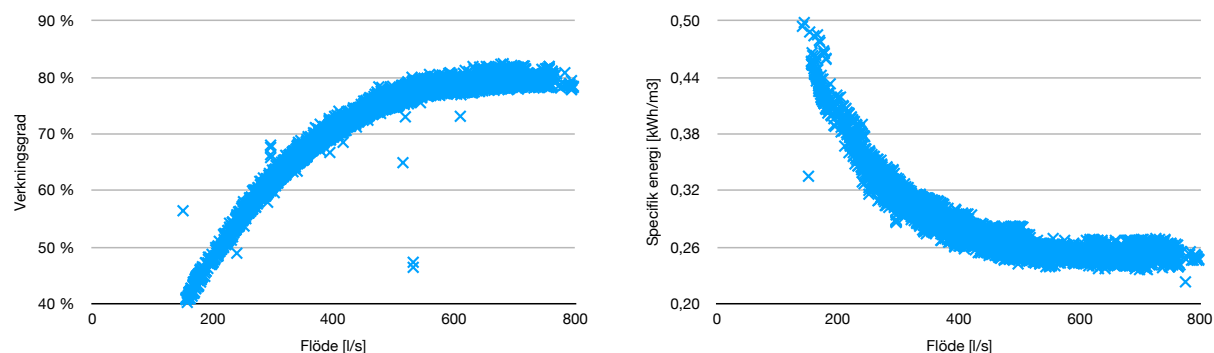


Figur 17. Här visas korrelationen mellan andel av driften med flöde under 500 l/s (när pumpen går själv) och verkningsgrad respektive specifik energi för pump 7.

⁷ Robert Genetay, driftoperatör, Norrvatten, telefonsamtal 2020-08-11

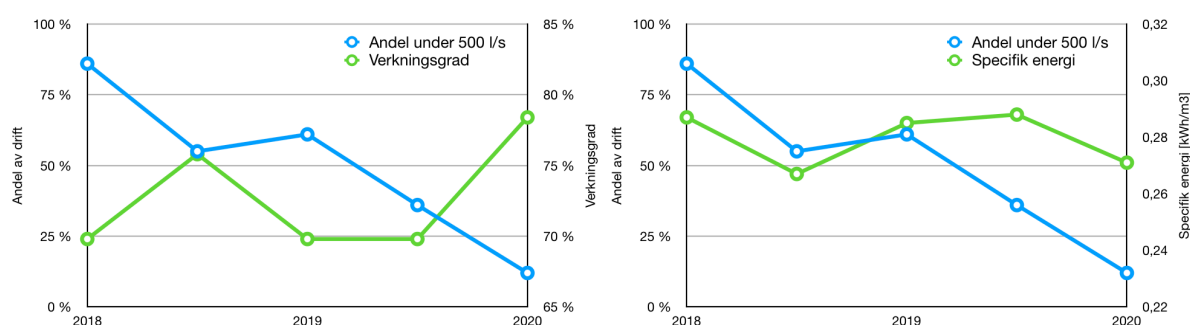
5.1.2 Pump 8

Pump 8 har under den analyserade perioden en medelverkningsgrad på 72,7 % med en standardavvikelse på 4,1 procentenheter. Resultatet visar precis som på P7 en stark korrelation mellan flöde och verkningsgrad samt mot specifik energi, se figur 18.



Figur 18. Flöden för pump 8 under första halvan av 2019 plottade mot korresponderande verkningsgrad och specifik energi. Sammanlagt 4883 mätvärden motsvarande 813 drifttimmar.

Under 2019 gick P8 själv i sin grupp under ca 1 600 timmar varav 720 timmar med flöden under 500 l/s. En annorlunda drift där flöden under 500 l/s undvikits skulle ge högre verkningsgrad och under 2019 lett till en beräknad energibesparing på 69 MWh. Den verkliga besparingen är större då pumpen totalt körde 7 600 timmar i olika kombinationer. Baserat på den starka korrelationen mellan effekt och flöde för pumpen går det att uppskatta den totala drifttiden under 2019 med flöden under 500 l/s till runt 931 timmar. Det ökar den maximala besparingen till 89 MWh, motsvarande 0,71 % av renvattenpumparnas årliga förbrukning. Även för P8 visar resultatet på ett tydligt samband mellan energiprestanda och andel av drift då flödet ligger under 500 l/s. Detta visas i figur 19. Observera att gränsen 500 l/s är godtyckligt vald utifrån de observationer som gjorts i resultatet.



Figur 19. Här visas korrelationen mellan andel av driften med flöde under 500 l/s (när pumpen går själv) och verkningsgrad respektive specifik energi för pump 8.

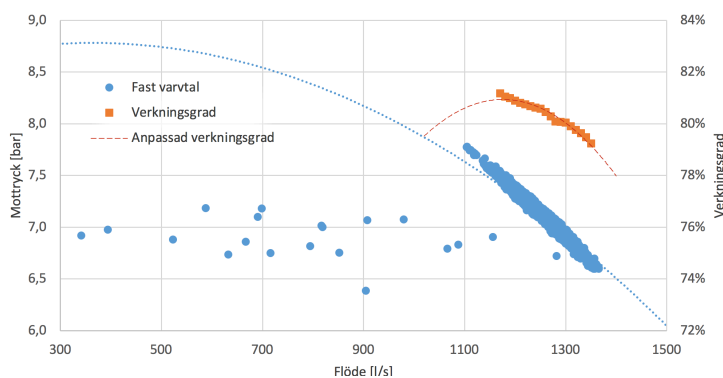
5.1.3 Pump 23

Resultatet av dataanalysen visar att pump 23 är den effektivaste pumpen vid enskild drift med en medelverkningsgrad på 79,8 % och en specifik energi på 0,244 kW/m³. Som det går att se i tabell 5 har P23 också mindre variation i resultaten från de olika perioderna. Resultatet visar en korrelation mellan verkningsgrad och flöde samt negativ korrelation mellan specifik energi

och flöde. Det innebär att lägre flöde leder till högre verkningsgrad men också högre energiåtgång. Energiprestandans flödesberoende jämförs i tabell 6 där det ses att den specifika energin förändras kraftigare. Eftersom pumpen inte är varvtalsstyrd är det mottrycket som bestämmer flödet inom nämnt span. Den empiriska pumpkurvan visas i figur 20. Resultatet visar på att pumpen presterar med bättre energiprestanda vid lägre mottryck.

Tabell 6. Medeltal för verkningsgrad och specifik energi vid olika flöden för pump 23 samt hur dessa förändras där mellan.

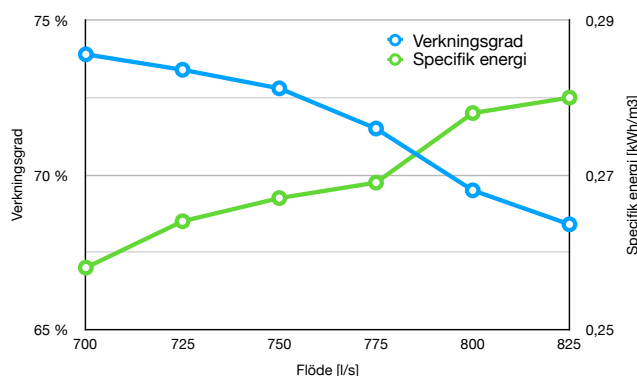
Flöde [l/s]	Verkningsgrad	Specifik energi [kWh/m ³]
1200	80,9 %	0,252
1400	79,5 %	0,230
Förändring	+1,4 %	-10%



Figur 20. Empirisk pumpkurva för pump 23 baserat på driften under första halvåret 2019.

5.1.4 Pump 24

Resultatet för anläggningens nyaste pump är en medelverkningsgrad på 71,3 % och en specifik energiåtgång 0,271 kWh/m³. Resultatet visar att P24 inte är den effektivaste. I figur 21 kan ses att den är som effektivast på det nedre delen av flödesintervallet. Vid flöden runt 700 l/s har den en verkningsgrad på 74 % men driftas oftast runt 780–800 l/s där verkningsgraden är knappt 70 %. En begränsning av flödesintervallet som pump 24 arbetar inom till 780 l/s skulle under andra halvan av 2019 lett till en besparing på 27 MWh, motsvarande 0,42 % av renvattenpumparnas elförbrukning under samma period.



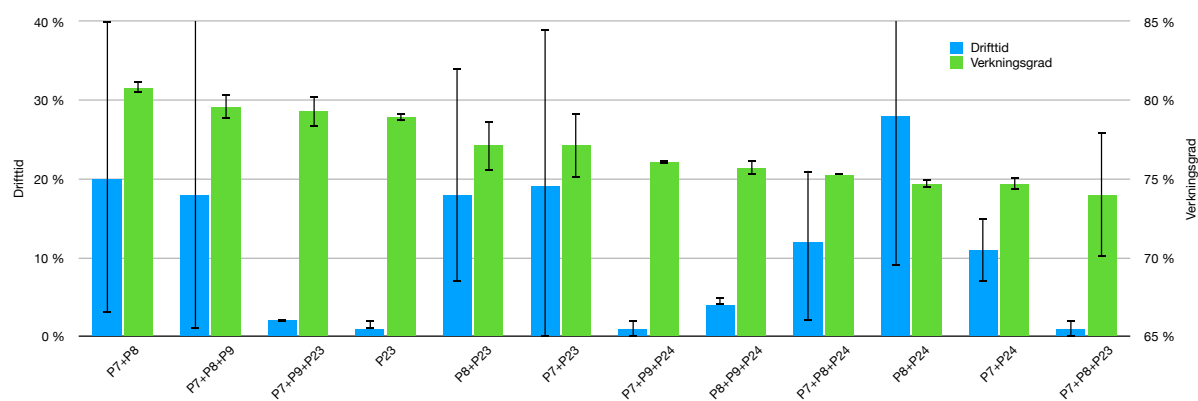
Figur 21. Variationen för verkningsgrad och specifik energi över olika flöden på pump 24.

5.1.5 Energibesparingar

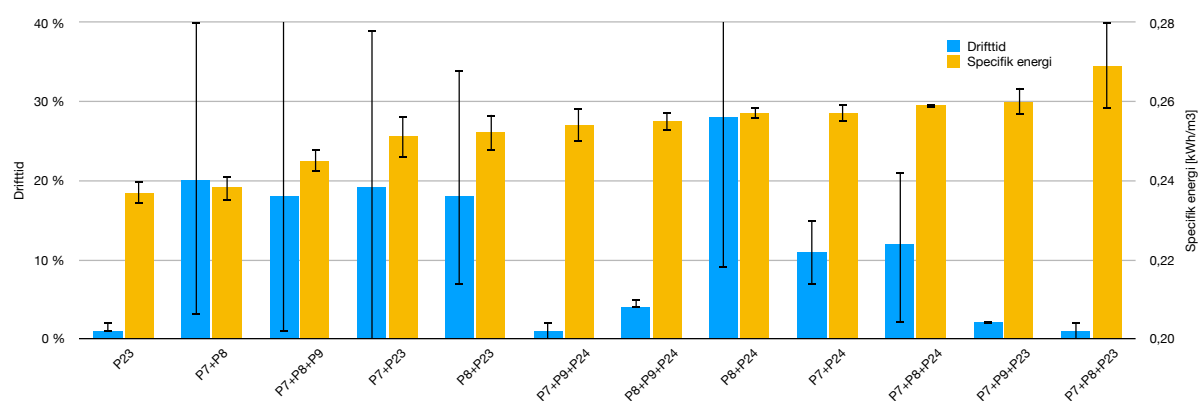
Under 2019 var den genomsnittliga verkningsgraden 78,7 %. Sammanlagt visar resultatet att besparingar på 192 MWh, motsvarande 1,52 % av renvattenpumparnas årliga förbrukning kan göras genom justeringar av de flödes intervall pumparna drifas inom i avsnitten ovan.

5.2 Pumpkombinationer

Sammanställningen av verkningsgraderna och specifik energigång för olika pumpkombinationer samt procentuell fördelning av drifttid redovisas nedan i figur 22 och figur 23. De svarta felstaplarna symboliserar spannet mellan största och minsta medelvärde för en av de analyserade perioderna. Drifttiden är uttryckt som andel av årets drift men i och med att det är ett medelvärde över de fem analyserade perioderna summeras de inte till 100 %.

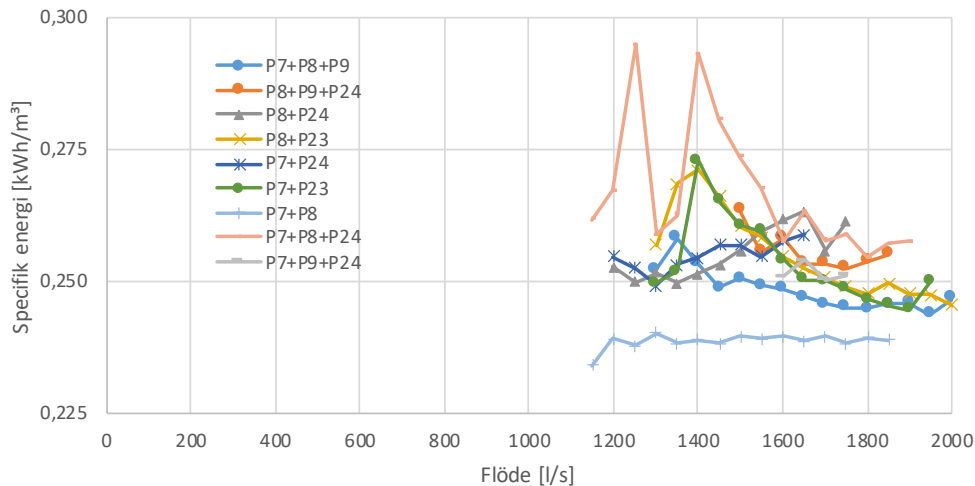


Figur 22. Medelvärden för verkningsgrader och tid i drift över perioden januari 2018 till maj 2020. Sorterade med högst verkningsgrad till vänster. Grönt är verkningsgrad och blått är drifttid.



Figur 23. Medelvärden för specifik energigång och tid i drift över perioden januari 2018 till maj 2020. Sorterade med lägst energi till vänster. Gult är specifik energi och blått är drifttid.

Resultaten i figur 22 och figur 23 visar att kombinationer med pump 24 har sämre energiprestanda än kombinationer med pump 23. Exempelvis är pumpkombinationerna P7+P8 och P7+P8+P9 och P23 mer fördelaktigare. I figurerna går det också att se att driften inte är fördelad till de pumpkombinationer med bäst energiprestanda utan är utspridda över hela intervallet. Två kombinationer som inte är med men som kan vara intressanta är pump 9 tillsammans med pump 7 eller pump 8.



Figur 24. Specifik energi beroende av flödet för olika pumpkombinationer under 2019.

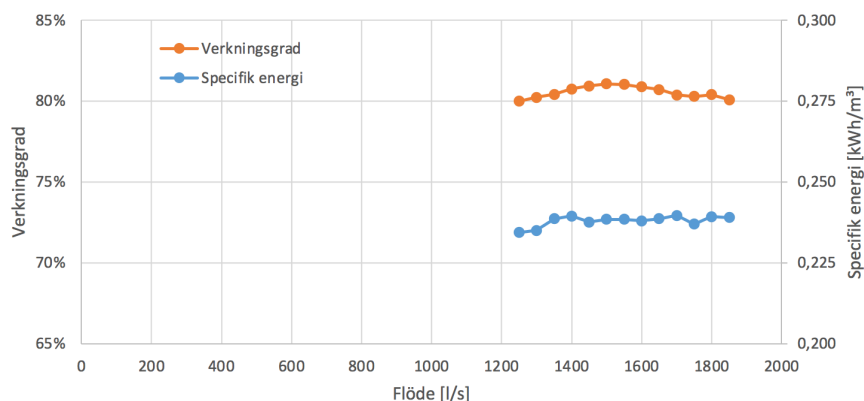
I figur 24 har pumpkombinationernas mätdata analyserats djupare utifrån vilket flöde som de körs vid, det vill säga hur pumparnas specifika energiåtgång beror av flödet de körs på.

Tydligast i resultatet är att pumpkombinationen pump 7 med pump 8 är överlägset effektivast över hela spannet. Det syns också att de specifika energierna för flertalet pumpkombinationer tenderar att bli lägre och stabilare vid högre flöden. En skillnad kan dock observeras för kombinationerna pump 7 eller 8 tillsammans med pump 23 respektive 24. Kombinationerna med pump 23 får lägre specifik energi vid högre flöden medan kombinationen med pump 24 istället ökar.

Nedan följer ett mer detaljerat resultat av analysen för några pumpkombinationer.

5.2.1 Pump 7 med pump 8

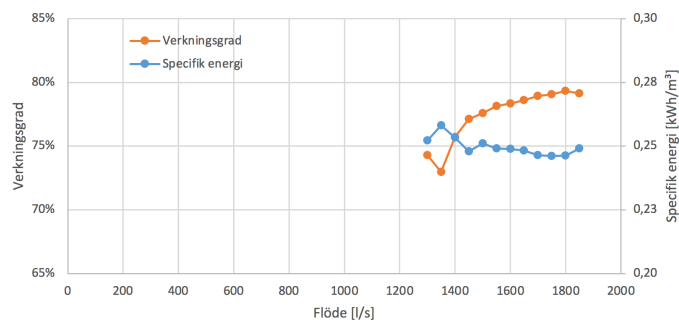
För den vanliga kombinationen pump 7 och pump 8 är energiprestanda bland de bättre. Resultatet visar att det saknas samband mellan flöde och verkningsgrad respektive specifik energi. Detta kan bero på att flödena är så pass stora att ingen av pumparna är i det påvisat problematiska området under 500 l/s. I figur 25 visas medelvärdet av verkningsgrad respektive specifik energi för olika flöden.



Figur 25. Energiprestanda för kombinationen pump 7 och pump 8. En mycket liten variation ses beroende av flöde. Data från första halvåret 2019.

5.2.2 Pump 7 med pump 8 och pump 9

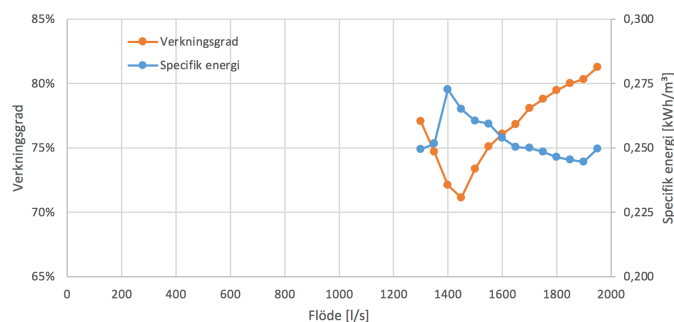
I figur 26 visas energiprestandan för kombinationen med pump 7,8 och 9. Här syns att kombinationen är som effektivast vid 1800 l/s. Detta kan bero på att pump 7 och pump 8, som är de pumpar som i kombination som kan variera sitt flöde, då befinner sig i sina fördelaktiga driftintervaller över 500 l/s.



Figur 26. Energiprestanda för kombinationen pump 7, 8 och 9. Data från hela 2019.

5.2.3 Pump 7 med pump 23

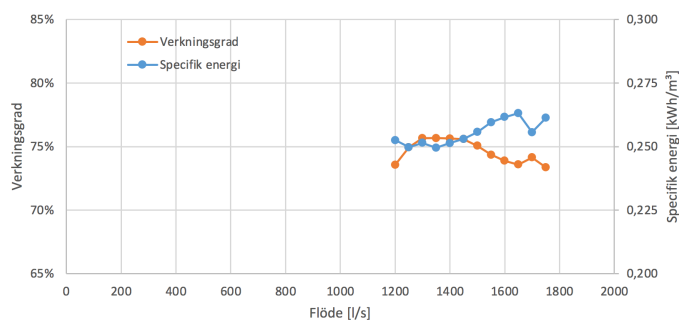
I figur 27 visas energiprestandan för kombinationen pump 7 med pump 23. Här syns att denna kombination också uppnår god energiprestanda när den varvtalsstyrda pumpen får arbeta över 500 l/s.



Figur 27. Energiprestanda för kombinationen pump 7 med pump 23. Data från hela 2019.

5.2.4 Pump 8 med pump 24

I figur 28 visas energiprestandan för kombinationen pump 8 med pump 24. Här syns det omvända mot föregående kombinationer. Energiprestandan är som bäst vid 1300 l/s men kombinationen har generellt låg verkningsgrad.



Figur 28. Energiprestanda för kombinationen pump 8 och pump 24. Data från hela 2019.

5.3 Distribution

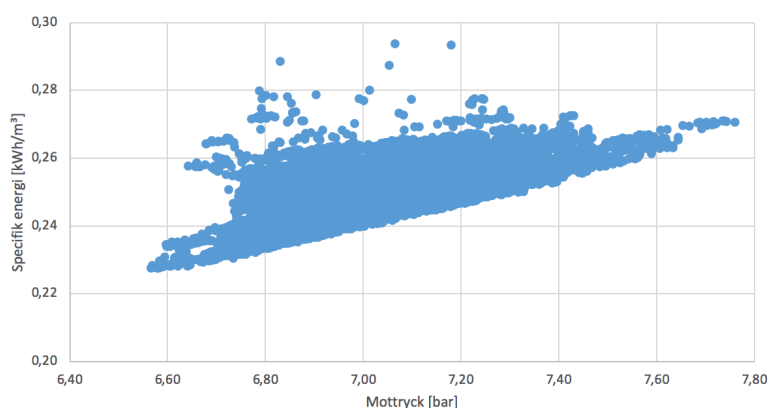
Här presenteras resultat av analysen och simuleringen för distributionen av vattnet från vattenverket till högreservoaren i den centrala zonen. Först presenteras analysens resultat vilket följs av resultatet från simuleringen.

5.3.1 Tornnivåer

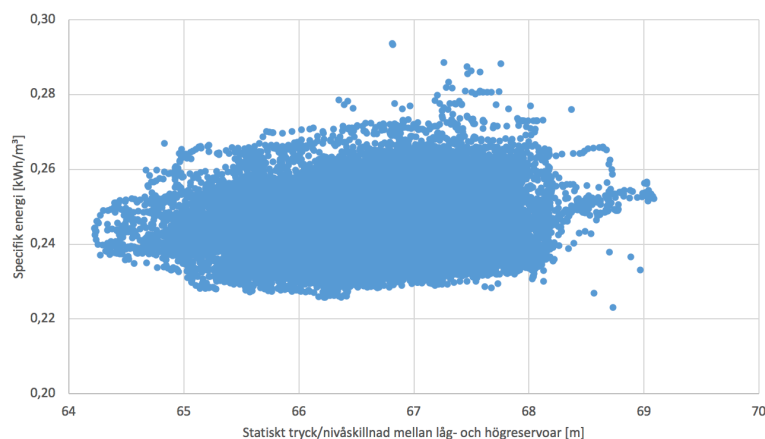
Det kan tydligt ses i resultatet att den pumpenergi som minimalt krävs är begränsad av mottrycket samt att det över denna gräns finns en spridning. Detta visas i figur 29. Utifrån resultatet går det att anpassa en ekvation till sambandet som syns i figur 29, ekvation 13. Där E_s är den specifika energin och p är mottrycket.

$$E_s = 0,0354p \quad (13)$$

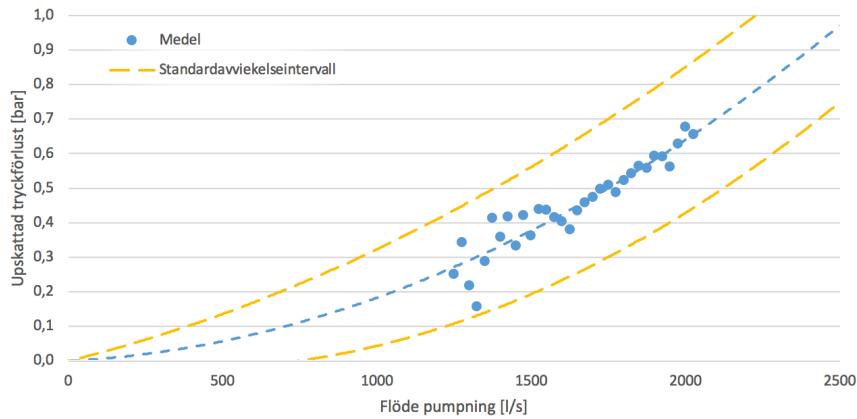
För varje bars tryckskillnad (eller 10 meter vattenpelare) minskar energiförbrukningen med 0,0354 kWh/m³. Det borde därför gå att påverka energiåtgången med 1,4 % per meter lägre tornnivå. Möjligheten till detta prövas i simuleringen vars resultat presenteras i nästa avsnitt. Däremot saknas det samband mellan specifik energiåtgång och nivåskillnaden mellan låg- och högreservoaren. Detta visas i figur 30. Detta går alltså inte nödvändigtvis åt mer energi desto högre nivå det är i Tunberget.



Figur 29. Mottryck och tillhörande specifik energi för all drift första halvan av 2019.



Figur 30. Specifik energi och det tillhörande statistiska trycket från nivåskillnaden mellan låg- och högreservoar. Korrelationskoefficient $\rho=0,11$.

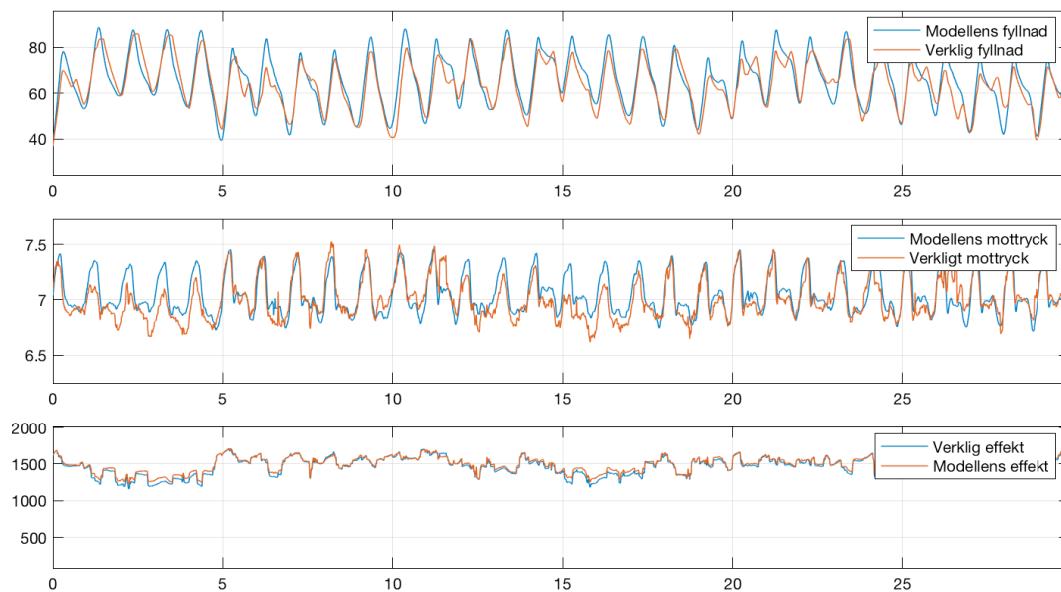


Figur 31. Uppskattad tryckförlust och pumpflöde för all drift första halvan av 2019.

Resultatet för de uppskattade tryckförlusterna visas i figur 31. Sambandet som resultatet visar följer ekvation 3 för systemkurvan. I figuren visas medelvärdet för tryckförlusten med tillhörande trendlinje i blått samt i gult standardavvikelse för olika flöden. Variationen är ganska stor, framför allt vid de lägre flödena. Variationen kan bero på förbrukningens variation.

5.3.2 Simulering

Resultatet från simuleringen i steg 1 visas i figur 32. Här syns hur modellens beräknade fyllnadsgrad, tryck och energi plottat tillsammans med de verkliga värdena. Modellen har bra överensstämmelse med de verkliga värdena. Nedan följer resultatet av olika simuleringar.



Figur 32. Resultat från simulering i steg 1, körning med data från verklig pumpning. Översta grafen är fyllnadsgrad i procent, mellersta är mottrycket i *bar* och nedre är effektuttaget i *kW*.

Resultatet från simuleringarna med lägre tornnivåer, enligt det som presenteras i föregående avsnitt, visas i tabell 7. När högreservoarens basnivå, h_b , sänktes med 10 respektive 5 meter minskade energiåtgången med 1,1 % per meter. Det är något lägre än både den empiriska

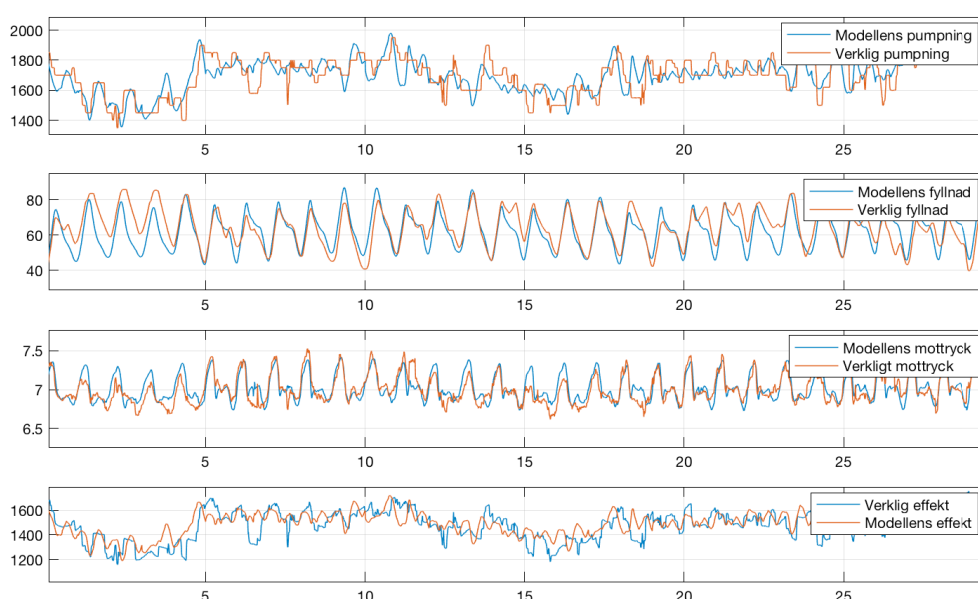
och den teoretiska minskningen. När fyllnadsgraden ändrades, genom förändring av börvärdeskurvan, förändrades energiförbrukningen enligt tabell 7. De 14 procentenheters lägre fyllnadsgrad längst ner i tabell 7 motsvarar 1 meter i högreservoaren och resulterar i en minskning av energiåtgången med 1,28 %. Modellen ger alltså något olika resultat för hur stor energibesparing som kan göras beroende på var i modellen ändringen görs.

Tabell 7. Resultat från simulering med olika nivåer och fyllnadskrav.

Förändrad parameter	Förändring energiåtgång
10 meters lägre tornnivå	-11 %
5 meter lägre tornnivå	-5,5 %
10%e högre fyllnadsgrad över tiden	1 %
10%e lägre fyllnadsgrad över tiden	-0,94 %
14%e lägre fyllnadsgrad över tiden	-1,28 %

Vid dessa simuleringar med lägre nivåer och lägre fyllnadsgrader uppstår dock kraftiga underskott. Jämfört med den verkliga fyllnadsgraden ökar antalet dagar med noteringar under 45 % fyllnadsgrad från 10 % till 100 %. Även medelvärdena av dessa bottennoteringar minskar från 43 % till 40 % fyllnadsgrad.

Resultatet från simuleringarna med olika fördelning på pumpningen sammanfattas i tabell 8. Samtliga simuleringar resulterar i mindre variationer i energiåtgången. Den uppskattade minskning av energiåtgången summeras dels från pumpningens energiåtgång samt ett antagande om att stabilare nivåer i tornen kan möjliggöra en generell sänkning av nivåerna som eftersträvas. Detta är möjligt då modellen visar att prognosstyrd pumpning kan minska både antalet och storleken på de lägsta förekommande fyllnadsgraderna.

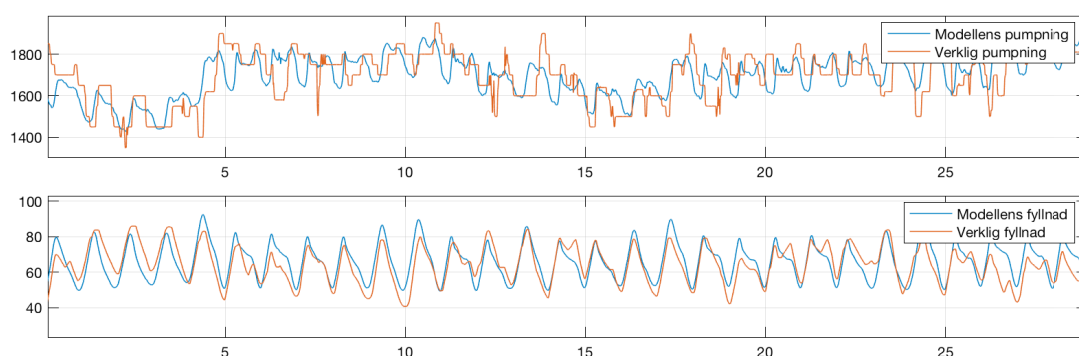


Figur 33. Resultat från simulering *Ökad stabilitet*. Graferna visar uppifrån: pumpning i l/s, fyllnadsgrad i procent, mottrycket i bar och effektuttaget i kW.

Tabell 8. Sammanfattat resultat från simuleringar.
Referensfallet motsvarar de verkliga värdena.

	Fyllnadsgrad medelvärde	Avvikelse vid dygnslägsta	Förändring energiåtgång från pumpning	Förändra energiåtgång från nivåsenkning
Referensfall	64,7 %	±8,2 % _e	–	–
Låg energi	59,0 %	±7,8 % _e	–0,51 %	–0,03 %
Ökad stabilitet	64,0 %	±3,1 % _e	–0,08 %	–0,40 %
Maximerad stabilitet	66,3 %	±1,8 % _e	0,02 %	–0,50 %
Kombination	63,2 %	±4,1 % _e	–0,18 %	–0,32 %

I figur 33 syns resultatet från simuleringen *Ökad stabilitet*. Den pumpningen har kalibrerats för att minimera över- och underfyllnad. Resultatet visar att antalet tillfällen har minskat för både över- eller underfyllnad med 80 % jämfört med verkliga värden. Även den summerade storleken på under- och överskotten har minskat i samma grad. Energiåtgången är dock i princip oförändrad. Modellen bedömer att en besparing på 0,08 % kan göras. Alla simuleringar resultat finns i tabell 8.



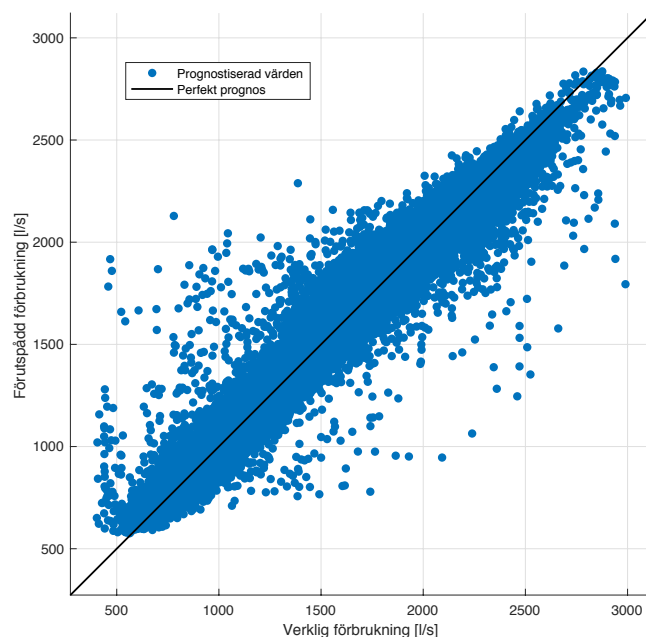
Figur 34. Resultat från simulering *Maximerad stabilitet*.
Graferna visar uppifrån pumpning i l/s och fyllnadsgrad i procent.

I figur 34 visas resultatet från simuleringen *Maximerad stabilitet*. Här är medelavvikelsen från 50 % fyllnadsgrad vid dygnets lägsta notering endast 1,8 procentenheter. Detta betyder att modellen nästan alltid landar runt 50 % fyllnadsgrad vid 23-tiden. Energiförbrukningen för denna pumpning är i princip samma som referensfallet men energibesparingen från den möjliga nivåsenkningen uppskattas till en halv procent. Se tabell 8.

Resultatet visar att förändringen i energiåtgång beror på vilka önskade fyllnadsgrader som önskas. Den viktigaste parametern för att möjliggöra något av dessa resultat är användandet av förbrukningsprognoser.

5.4 Förbrukningsprognoser

Försöket med att skapa en modell för prognostisering av förbrukningen slutade med att algoritmen *Bagged Trees* användes. Denna gav näst högst noggrannhet i lärandestadiet men högst noggrannhet vid prognostisering för år 2020 och 2018. Efter att ha lärt upp den valda modellen för 2019 års förbrukning erhöles ett medelfel (RMSE⁸) på 87 l/s. Modellens anpassning till att efterlikna 2019 års förbrukningsmönster syns i figur 35.



Figur 35. Verklig och prognostiserad förbrukning plottat.

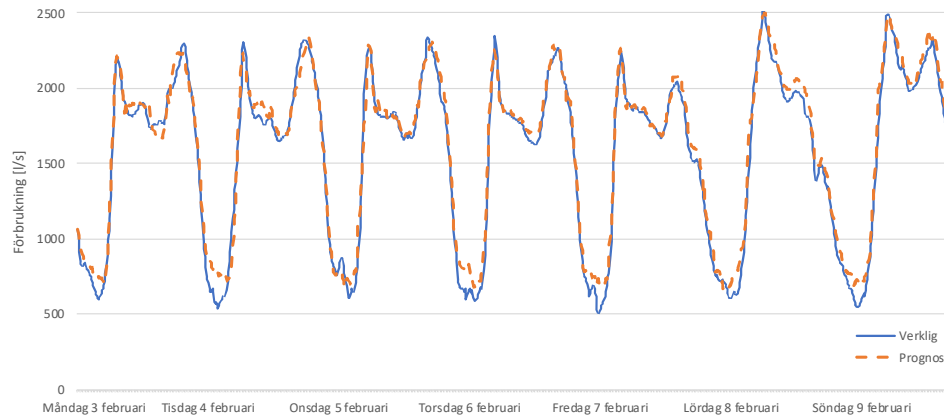
Resultatet för noggrannheten av modellen redovisas i tabell 9. Resultatet visar att kommande dygns förbrukning kan förutspås med ett medelfel mindre än 200 l/s för varje 10-minuters intervall. Felets storlek hos modellen är under 10 % för enskilda värden och 3% för den summerade dygnsförbrukningen. Den minskade omfattningen av prognostiserade dygn under 2018 beror på felaktigheter i mätdatan, exempelvis förekomst av negativa eller orimligt stora värden.

Tabell 9. Noggrannhet hos modellen för prognostiserade förbrukning vid tillämpning.

År	Omfattning	10-minutersvärden		Summerad dygnsförbrukning	
		Medelfel	RMSE ⁸	Medelfel	RMSE ⁸
2018	Helår, 80% av tiden	127 l/s (8%)	208 l/s	4 441 m ³ (3%)	5 782 m ³
2020	Första kvartalet, 100% av tiden	80 l/s (7%)	120 l/s	3 360 m ³ (3%)	4 033 m ³

⁸ RMSE är det kvadratisk viktade medelfelet som MatLab använder för feljämförelse.

Felet mellan uppskattad och verklig förbrukningen för 2020 var koncentrerad till nätterna. Detta syns i figur 35 men också kanske tydligare i figur 36. Det går också på motsvarande sätt att se i figurerna att modellen lyckas förutspå höga förbrukningar mer exakt.



Figur 36. Ett ursnitt från prognosen skapad för en vecka i februari 2020.

6. Diskussion

Projektet har varit av sökande karaktär, i jakt på effektiviseringspotential. Eftersom vattenverket generellt visar på att ha god energieffektivitet har processen under arbetets gång lett till fler uppslag än vad som redovisas i denna rapport. Mycket tid har också gått åt till att sätta sig in i och få förståelse för vattnets flöde i systemet.

Under projektets gång har det blivit tydligt att få liknade rapporter tagits fram i Sverige. De projekten som branschen drivit kring energieffektivisering redovisar inte någon högupplöst data på någon utveckling av effektivare pumpning mer än i enstaka fall. Detta har vid de enstaka fallen handlat om att utrustning byts ut då den var ineffektiv eller feldimensionerad. Istället har fokus hamnat på uppvärmning av lokaler och pumphus, vilket antagligen varit motiverat och lett till energibesparingar. Däremot innebär det att pumpdriften lämnats utan insatser tillsvidare. Det verkar också finnas ett glapp mellan forskning och driften av faktiska system. Mycket handlar om att tillgängliggöra data och ha system som möjliggör avancerat driftstöd.

6.1 Pumpdrift

Resultatet som presenteras i rapporten pekar på potential till energibesparing i pumpdriften. Det finns en stor variation i både verkningsgrad och specifik energi för pump 7 och pump 8 när dessa går själva i pumpgrupp 1. De är då alltid i kombination med antingen pump 23 eller pump 24. Eftersom pump 23 har ett så pass stort flöde krävs det att pumpningen ligger i det absoluta övre delen driftintervallet. Annars hamnar flödet för pump 7 eller pump 8 under 500 l/s vilket har visats leda till dålig energiprestanda. Därför bör kombinationen med dessa och pump 23 endast användas om önskat flöde ligger över 1800 l/s. Trots detta har de här kombinationerna med pump 23 överlag en god energiprestanda med en verkningsgrad runt 77 % och specifik energi runt 0,252 kWh/m³. Med begränsning av användningen till pumpning vid flöden över 1800 l/s borde kombinationens verkningsgrad kunna öka till 80 % och specifik energi minska till under 0,240 kWh/m³. Denna effekt har inte räknats med i energibesparingarna.

Förändringar som skett från år 2019 till år 2020 är driftsättningen av P24 som moderniserats. Detta ses i tabell 5 som sammanfattar pumparnas energiprestanda i enskild drift.

Förändringen som ses i figur 13 är att P24 används i stor grad, antagligen för den anses ny och effektiv. Men resultatet visar på motsatsen. Det ser istället ut som att den ökade driften av P24 leder till försämrade energiprestanda. Fortsätter användandet av kombinationer med pump 24 kan den samlade energiprestandan för hela Norrvatten öka stort. De första halvåren har generellt lägre specifik energi än andra halvåret. Första halvåret 2020 har haft rekordhög specifik energi på 0,258 (+5 %) och fortsätter trenden är det sannolikt att helåret får ett totalt specifik energi på nära 0,50 kWh/m³.

Driften har gått från att under 2018 vara koncentrerad vid P7+P8+P9, P8+P23, P7+P8 och P7+P23 till att 2020 mest bygga på kombinationerna P8+P24, P7+P24 och P7+P8+P24. Alltså i princip slutat använda P9 och P23. Resultatet visar att detta bidragit till 2020 års höga medelvärde för den specifika energin. Det är också anmärkningsvärt att även P23 har fått en försämrad energiprestanda under första halvåret av 2020 än tidigare perioder. Det är antagligen till följd av vid vilka flöden P23 har använts samt i vilka kombinationer.

6.2 Distribution

Distributionen har generellt konstaterats ha mindre energieffektiviseringspotential än pumpningen. Historisk data för fyllnadsgraden i den analyserade högreservoaren visar att den många gånger har omotiverat höga respektive låga nivåer. Analysen visar att det framför allt går att uppnå bättre leveranssäkerhet med annorlunda pumpning. Energibesparingarna som bedöms möjlig är som mest runt 0,5 % av den årliga energin för utgående pumpar.

Gällande energibesparingar från tornnivåerna kommer detta projekt till en annan procentuell minskning per meter än Lingsten & Lundqvist (2008). Istället för med deras uppskattade minskning med 2 % per meter indikerar detta projektets resultat att en minskning med 1,1–1,4 % är möjlig per meter. Oavsett saknas det initialt utrymme för nivå-sänkningar i den analyserade högreservoaren.

Vid implementering av smartare pumpning tack vare prognosverktyg kan däremot högre leveranssäkerhet uppnås genom högre lägsta nivåer i vattentornen. Detta leder i sin tur till att det skapas utrymme för sänkning av den rekommenderade fyllnadsgraden och därigenom en viss energibesparing.

Energiåtgången är direkt avvägd mot i vilken grad man vill undvika att få låga nivåer i reservoaren. Olika alternativ visas i simuleringarna. Modellen går att bygga så att man med 95 % sannolikhet hamnar inom 48–52 % intervallet i fyllnadsgrad vid lägsta noteringen för dagen. Motsvarande intervall för verkliga värden är 42–58 %. Den viktigaste komponenten för att göra detta är prognostiserad förbrukning.

I viss grad kan det vara felaktigt att hävda att överfyllnad över 50 % fyllnadsgrad är ofördelaktigt. I perioder med mycket hög förbrukning kan det krävas att även lägsta nivån förblir över 50 % fyllnadsgrad. Detta beroende på att pumpningen behöver ligga konstant högt för att matcha dygnsförbrukningen och den dipp i fyllnadsgrad som oftast uppstår kring klockan 23.

6.3 Utanför avgränsningarna

Om en större lågreservoar hade används skulle vatten lagras med lägre energinivå. Detta hade kunnat möjliggöra mer varierad pumpning som i större grad följer förbrukningen. Strömningsförlusterna skulle öka något men samtidigt begränsas av den stora förbrukningen

under dagtid. Det borde vara energimässigt fördelaktigt att bygga ut lågservoaren istället för bygga ut en hög reservoar.

En annan faktor som behöver nämnas, även om den inte ingår i arbetet, är att elpriser inte är konstanta under dygnet och påverkar driftkostnaderna. Utvecklingen av priset för elektriciteten kan förändra rapportens slutsatser om driftkostnaderna får avgöra. Exempelvis skulle låga elpriser på natten och högre under dagen innebära att det är fördelaktigt att pumpa mer vatten upp i reservoarerna nattetid. Självfallet beror detta även på storleken i prisvariationen och hur kostnaderna respektive minskad energiförbrukningen prioriteras.

6.4 Felkällor

Hur pumparna har driftats skiljer sig under perioden vilket följaktligen leder till att resultatet skiljer sig beroende på hur stor energibesparingen blir. Fokus har i arbetet varit på att utvärdera och jämföra hur mycket effektivare driften hade kunnat vara för 2019 års drift.

Slutsatser och resultat gällande simuleringar av tornnivåer och fyllnadsgrader är avgränsade till det analyserade system som beskrivs i kapitel 4. Den simulerade reservoarens fyllnadsgrad har visats följa systemets totala fyllnadsgrad bra. Men dessa högreservoarer finns bakom tryckstegringarna som styrs separat så resultatet kommer med en viss osäkerhet om det förstoras upp och jämförs med den verkliga fyllnadsgraden i hela nätet.

Arbetet tog tidigt fasta på en användning av empirisk verkningsgrad utifrån den mätdata som fanns. Definitionen av verkningsgraden baserades på det beräknade mottrycket vid pumparna eftersom det var den data som fanns tillgänglig. Det kanske hade varit lämpligare att definiera den nyttiga energi som uppnås utifrån nivån i högreservoaren. Då hade verkningsgraden blivit ett kanske mer intressant nyckeltal för analys av även distributionen. Försök med sådan beräkning gjordes under slutrevisionen av arbetet och resulterande i en minskning av alla verkningsgrader med någon procent. Något större minskning av verkningsgraden på pumpkombinationer med höga flöden och vice versa på grund av inverkan av strömningsförlusterna enligt ekvation 3.

Ett konstigt resultat har funnits i pumpkombinationen pump 7, pump 9 och pump 23, som har en relativt hög verkningsgrad. Kombinationen borde ha lägre verkningsgrad eftersom pump 7 borde gå runt 300-400 l/s, det vill säga ligga under gränsen till lägre verkningsgrad. Detta kan beror på att pumpen bara utgör en liten del av hela kombinationen och dess låga verkningsgrad inte påverkar så mycket.

Norrvattens driftoperatör har i samtal förklarat att man undviker att pumpa vid fyllnadsgrad över 83 % eftersom det då börjar *gå tungt*. Projektets resultat tyder på att fyllnadsgraden inte är direkt avgörande för mottrycket utan att andra parametrar som påverkar bör vägas in. Här finns viss osäkerhet eftersom de få fall då fyllnadsgraden är så pass stor inte har detaljstuderats. I simuleringarna som resulterar i minskad underfyllnad möjliggörs detta oftast

genom att tornen fylls i större grad inför en förväntat stor förbrukning – ofta över 83 %. Energin för detta beräknas enligt redovisad metod och kan enligt resonemanget i detta stycke tolkas med viss osäkerhet.

5.5 Fortsatta studier

Simuleringen i detta arbete skulle kunna vidareutvecklas för att svara på frågor så som: Vilken är den absolut bästa pumpmetoden? Hur påverkar användningen och tilliten till prognoser riskerna med tornnivåer? Varför har P24 så pass dålig energiprestanda?

7. Slutsatser

Energieffektivisering är möjlig – främst genom förändring av driften av pumparna. Pumparnas verkningsgrad styrs främst av vilket flöde de jobbar vid medan det för nätet är mottrycket som avgör hur mycket energi som går åt. Generellt är pumparnas energiprestanda god till följd av gott underhåll och löpande utbyte. Däremot varierar deras energiprestanda med hur de drifas. Resultatet i projektet har visat att pumparna har individspecifik känslighet för driftparametrar. Flera av pumparna bedöms kunna drifas energieffektivare genom implementering av resultatet i projektet. Även förändrat val av pumpkombinationer kan minska energiåtgången.

Kvantifiering av energibesparingen görs utifrån 2019 års data. Energibesparingarna från föreslagna förändringar i pumpdrift är 1,52 % av den årliga energiförbrukningen för utgående pumpning. Förändringarna består i begränsningar av flödesintervall och föreslagna pumpkombinationer. Genom förändrade pumpkombinationer kan energiförbrukningen minska med ytterligare 0,36 %.

Det är möjligt att ta fram noggranna dygnsuppskattningar och högupplösta förbrukningsprognoser med hjälp av maskininlärnings algoritmer, men utförda simuleringar har inte kunnat visa på att några större energibesparingar görs när bättre prognoser erhålls. Däremot ökar leveranssäkerheten vid pumpning med bättre prognoser. Fyllnadskravet påverkan på energiåtgången beräknades till 1,5 % per meter tornnivå.

Simuleringen visade att bättre prognoser leder till bättre leveranssäkerhet och minskning av lägsta nivå som uppstår på grund av bättre framförhållning i pumpningen. Därför skulle nivån i reservoaren ändå kunna sänkas, med prognosstyrd pumpning, utan att minska säkerhetsvolymerna. Därigenom kan energiåtgången minskas med ytterligare 0,53 % för renvattenpumparna.

Norrvatten bedöms utifrån året 2019 sammantaget kunna minska sin elförbrukning med upp till 257 MWh/år, motsvarande 2,4 % av renvattenpumparnas förbrukning vid full implementering av resultatet.

Författarens förslag

Här tar jag mig friheten att komma med några förslag och idéer på åtgärder som skulle kunna genomföras för att energieffektivisera driften baserat på studiens upptäckter.

- Använda de pumpkombinationer som visats ha bra energiprestanda. Prioritera kombinationen pump 7 med pump 8 och minimera användningen av pump 24.
- Förändra driftintervallen för pumparna utifrån slutsatserna samt följa upp i vilken grad det uppfylls och påverkar verkningsgraden och specifik energiåtgång.
- Installation av separata flödesmätare på utgående rör för samtliga pumpar. Detta skulle förenkla beräkningar och öka upplösningen över pumparnas separata verkningsgrader vid kontinuerlig drift.
- En tydlig monitor med aktuell och historisk verkningsgrad samt specifik energi i driftcentralen vore bra för att förtydliga vikten av en energieffektiv drift av dricksvattenpumparna. Incitament för respektive skiftlags resultat skulle kunna motivera arbetet.
- Utvärdera användningen av datorberäknade förbrukningsprognoser som stöd för driften.
- Undersöka fördelningen av elkostnaden för att utvärdera de ekonomiska incitamenten som skulle kunna finnas till utökad pumpning nattetid.

Referenslista

- Abdul Gaffoor, T. (2017). *Real-time Control and Optimization of Water Supply & Distribution Infrastructure*.
- Bagloee, S.A., Asadi, M. & Patriksson, M. (2018). *Minimization of water pumps' electricity usage: A hybrid approach of regression models with optimization*. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.04.027>
- Bohórqueza, J., Saldarriaga, J. & Vallejoa, D. (2015). *Pumping pattern optimization in order to reduce WDS operation costs*. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.936
- Bene, J. (2013). *Pump schedule optimisation techniques for water distribution systems*.
- Danielsson, H. (2013). *Energiushållning i VA-sektorn. Ett gemensamt samverkansarbete för alla VA-huvudmän i Dalarna*. ISSN: 1654-7691
- Eriksson, G. (2007). *Grundläggande Strömlärlära*. Chalmers Tekniska Högskola.
- Häggström, P. (uå). *Energieffektivisering vattenverk*. <https://docplayer.se/19248405-Energieffektivisering-vattenverk-peder-haggstrom-stockholm-vatten.html>
- Jernkontorets energihandbok. (2020). *Energieffektivisering av pumpar*. <https://www.energihandbok.se/energieffektivisering-av-pumpar>
- Koor, M., Vassiljev, A. & Koppelb, T. (2013). *Optimal pump count prediction algorithm for identical pumps working in parallel mode*. doi:10.1016/j.proeng.2014.02.106
- Lingsten, A. & Lundkvist, M. (2008). *Nulägesbeskrivning av VA- verkens energianvändning* Svenskt Vatten Utveckling, Rapport Nr 2008-01.
- Lingsten, A. (2015). *Sammanfattande rapport över "VA-verkens bidrag till Sveriges energi- effektivisering"*. Svenskt Vatten Utveckling, Rapport Nr 2014-05.
- Malm, A., Mårtensson, H. & Persson, K. (2019). *Framtidens smarta VA-ledningsnät – lägesrapport*. Svenskt Vatten Utveckling, Rapport Nr 2019-7.
- Norrvatten. (2019). *Driftinstruktion Del A*.
- Norrvatten. (2020). *Årsredovisning 2019*.
- Sadatiyan Abkenar, S. M., Dustin Stanley, S., Miller, C., Chase, D. & McElmurrya, S. (2015). *Evaluation of genetic algorithms using discrete and continuous methods for pump optimization of water distribution systems*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.suscom.2014.09.003>
- Svenskt Vatten. (2015). *Resultatrapport för VASS Vattenverk 2015*.
- Stockholm Vatten och Avfall. (2020). *Hållbarhetsredovisning 2019*.
- Termens, J., Näsman, T., Fredgren, G., Svensson, B., Mossberg, Ö., Larsson, S.A. (2014). *Energieffektivisering i kommunala vattenpumpsystem*.
- Vinnova. (2016). *DigiDrick digitala lösningar för övervakning och styrning på vattenverk*. <https://www.vinnova.se/p/digidrick--digitala-losningar-for-overvakning-och-styrning-pa-vattenverk/>
- Wikström, P. (2005). *Energianalys och åtgärdsförslag för effektivisering av vattendistribution* En studie av högzonen Årsta-Kärntorp-Skarpnäck. Luleå Tekniska Universitet.
- Willis, N. (2017). Webinar: Ask the Experts - Energy Management in Water Supply Systems and Distribution Systems. <https://youtu.be/Bh3iXTnSgx8>
- Zhang, X., Wang, D., Jiang, F., Lin, T. & Xian, H. (2020). *An Optimal Regulation Method for Parallel Water-Intake Pump Group of Drinking Water Treatment Process*. IEEE Access.

Bilaga A

Q [l/s]	P7+P8+P9		P8+P9+P24		P8+P24		P8+P23		P7+P24		P7+P23		P7+P8		P7+P8+P24		P7+P9+P24	
1200					0,253	74 %			0,255	75 %			0,239	80 %	0,267	71 %		
1250					0,250	75 %			0,252	76 %			0,238	80 %	0,295	65 %		
1300	0,252	74 %			0,251	76 %	0,257	74 %	0,249	76 %	0,249	77 %	0,240	80 %	0,259	74 %		
1350	0,258	73 %			0,249	76 %	0,269	70 %	0,253	76 %	0,252	75 %	0,238	81 %	0,262	72 %		
1400	0,253	76 %			0,251	76 %	0,271	70 %	0,254	76 %	0,273	72 %	0,239	81 %	0,293	64 %		
1450	0,249	77 %			0,253	76 %	0,266	72 %	0,257	76 %	0,265	71 %	0,238	81 %	0,281	67 %		
1500	0,250	78 %	0,263	74 %	0,256	75 %	0,260	73 %	0,257	75 %	0,260	73 %	0,239	81 %	0,274	72 %		
1550	0,249	78 %	0,256	74 %	0,260	74 %	0,258	75 %	0,255	75 %	0,259	75 %	0,239	81 %	0,268	72 %		
1600	0,248	79 %	0,258	75 %	0,262	74 %	0,255	76 %	0,258	75 %	0,254	76 %	0,239	80 %	0,257	74 %	0,251	74 %
1650	0,247	79 %	0,253	76 %	0,263	74 %	0,252	77 %	0,259	74 %	0,250	77 %	0,239	81 %	0,263	74 %	0,254	75 %
1700	0,246	79 %	0,253	76 %	0,256	74 %	0,251	78 %			0,250	78 %	0,239	80 %	0,258	75 %	0,250	76 %
1750	0,245	80 %	0,252	76 %	0,261	73 %	0,249	79 %			0,248	79 %	0,238	80 %	0,259	76 %	0,251	77 %
1800	0,245	80 %	0,254	77 %			0,247	79 %			0,246	80 %	0,239	80 %	0,254	76 %		
1850	0,246	80 %	0,255	77 %			0,250	80 %			0,245	80 %	0,239	80 %	0,257	77 %		
1900	0,246	80 %					0,248	80 %			0,245	80 %			0,257	77 %		
1950	0,244	81 %					0,247	80 %			0,250	81 %						
2000	0,247	81 %					0,245	80 %										
2050	0,246	80 %					0,242	80 %										

Tabell A1. Resultat av flödesberoende specifik energi respektive verkningsgrad för pumpkombinationer under 2019. De lägsta specifika energi markerat med fet stil.

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.slu.se/energiogteknik

SLU
Department of Energy and Technology
P. O. Box 7032
SE-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000