



UPPSALA
UNIVERSITET



Examensarbete 30 hp
Juni 2019

Energieffektivisering och förbättrat resursutnyttjande vid Främby avlopps- reningsverk i Falun

Maria Silfwerin

Energieffektivisering och förbättrat resursutnyttjande vid Främby avloppsreningsverk i Falun

Improved energy efficiency and energy recovery at Främby wastewater treatment plant in Falun, Sweden

Maria Silfwerin

Handledare: Lars Runevad, Falu Energi & Vatten AB

Ämnesgranskare: Gunnar Larsson, institutionen för energi och teknik, SLU

Examinator: Åke Nordberg, institutionen för energi och teknik, SLU

Omfattning: 30 hp

Nivå, fördjupning och ämne: Avancerad nivå, A2E, teknik

Kurstitel: Examensarbete i energisystem

Kurskod: EX0724

Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp

Kurskoordinerande institution: Institutionen för energi och teknik

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2019

Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)

Delnummer i serien: 2019:05

ISSN: 1654-9392

Elektronisk publicering: <http://stud.epsilon.slu.se>

Nyckelord: Energikartläggning, biogas, slam, rötning, membranbioreaktor, aktivslamprocess

Sveriges lantbruksuniversitet

Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Abstract

Främby wastewater treatment plant, a 50 000 population equivalent (pe) municipal sewage treatment plant in Falun, faces large changes as aging technology, increasing load and stricter effluent quality requirements lead to a demand for upgrading the plant. The owner of the plant, Falu Energi & Vatten (FEV), have a vision of an energy neutral plant in the future. That is, a plant that produces at least as much energy as it consumes. Achieving energy neutrality therefore requires a combination of more efficient use of electricity and heat and better utilization of the plant's resources, for example by biogas production from sludge.

An energy audit of the sewage treatment processes on the Främby plant showed that the yearly electricity use and heat use was 1,9 GWh and 1,5 GWh respectively. Approximately 66 % of the electricity was used in the biological treatment process, which is similar to other sewage treatment plants but still indicates that there is potential for energy saving measures.

By using the results of the energy audit of the existing plant and a description of the future plant provided by FEV, the likely energy consumption of the future plant with a load of 70 000 pe was calculated. With the same processes as today, the energy consumption will increase by 47 % to 4,9 GWh per year. If nitrogen removal with Membrane BioReactors (MBR) is implemented on the future plant, the energy consumption can instead increase to three times of today's use, to 10,3 GWh per year.

An evaluation of the biogas production on the Främby plant showed that the biogas yield is high, despite that no optimization of the digestion process has been made. The possible biogas production on the future plant was calculated from the biogas yield of today, resulting in a production of 3 900 Nm³ per day. The biogas can be used to produce 7,3 GWh heat per year, 2,6 GWh electricity and 5,2 GWh heat per year or be upgraded to 660 tons of vehicle fuel per year. A literature review and calculations indicated that the best option for a plant the size of Främby is to use the biogas for combined heat and power production. This alternative is also the best according to FEV's vision of an energy neutral plant.

Keywords: Wastewater treatment plant, sewage, energy audit, energy efficiency, membrane bioreactor, biogas

Populärvetenskaplig sammanfattning

Under 1960-talet byggdes kommunala reningsverk i de flesta svenska städer för att lösa de problem med övergödning som orsakats av att avlopp leddes orenade direkt ut i sjöar och vattendrag. Ett av dessa reningsverk är Främby avloppsreningsverk i Falun som drivs av Falu Energi & Vatten (FEV). Reningsprocessen på Främby består precis som på de flesta reningsverk av tre reningssteg: mekanisk, kemisk och biologisk rening. I den mekaniska reningen avlägsnas större föroreningar och grus från avloppsvattnet, bland annat med hjälp av galler. I den kemiska reningen tillsätts kemikalier så att näringsämnet fosfor kan separeras från vattnet. I den biologiska reningen bryts organiskt material ner av mikroorganismer i en syrerik miljö i en så kallad aktivslamprocess. I både den kemiska och biologiska reningen bildas slam, en restprodukt som består av de ämnen som renats bort från vattnet.

Slammet behandlas i en röt-kammare där det bryts ner av metanbildande bakterier under syrefria förhållanden i en process som kallas rötning. Under rötningens process bildas biogas, ett biobränsle bestående av metan och koldioxid. Genom rötningen reduceras volymen av slammet och innehållet av farliga ämnen samtidigt som slammet används som en resurs för energiproduktion. Främby tar också emot fett och processpillvatten från produktion av hygienprodukter som rötas tillsammans med slammet vilket förbättrar biogasproduktionen. Biogasen förbränns i en gasmotor som producerar el och värme. Elen förs ut på elnätet, medan värmen används internt på anläggningen för att värma upp slammet i röt-kammaren till den temperatur som krävs för att rötningens process ska fungera.

Reningsverk utgör viktiga samhällsfunktioner eftersom de förhindrar spridning av miljöskadliga ämnen till vattenmiljön. Samtidigt bidrar reningsverken till negativ miljöpåverkan genom förbrukning av resurser. I detta projekt genomfördes en kartläggning av alla energianvändande processer på Främby reningsverk. Den totala elanvändningen beräknades till 1,9 GWh per år. I enlighet med resultat från tidigare studier av andra reningsverk användes mest el av det luftningssystem som skapar den syrerika miljön i det biologiska reningssteget. Trots att energianvändningen i det biologiska reningssteget inte var ovanligt hög är det där den största potentialen för energieffektivisering finns eftersom små åtgärder kan ge stora energivinster. Den enda värmeanvändande processen på reningsverket är rötningen, vilken använde 1,5 GWh värme per år. Då den värme som används kommer från egen produktion och fjärrvärme antogs incitamenten för att minska värmeanvändningen vara små.

Energianvändningen för olika reningsverk kan jämföras genom den specifika energianvändningen, det vill säga energianvändning i förhållande till hur mycket avloppsvatten som renas på reningsverket. Även för den specifika energianvändningen

varierar resultaten stort mellan olika reningsverk på grund av verkens olika förutsättningar. I jämförelse med liknande reningsverk var energianvändningen på Främby varken ovanligt låg eller hög.

FEV planerar för en uppgradering av Främby eftersom reningsverket är i behov av renoveringar samtidigt som mer avloppsvatten måste renas då Faluns befolkning växer. Ett av målen är att det nya reningsverket ska vara energineutralt, vilket innebär att reningsverket ska producera minst lika mycket energi som det gör av med. FEV vill också vara förberedda på att reningskraven i framtiden kan bli hårdare. Enligt miljöprövningsförordningen måste reningsverk ha tillstånd för sin verksamhet och där ingår olika villkor och utsläppskrav som kan förändras när tillstånden förnyas.

I detta projekt undersöktes ett framtidsscenario som utgick från att reningsverket ska rena avloppsvatten från 70 000 personer, att jämföra med dagens 50 000 personer. Om energieffektiviseringsåtgärder genomförs kan energianvändningen öka med 47 % till 4,9 GWh per år på det framtida reningsverket. Om krav på rening av kväve tillkommer i framtiden måste det befintliga biologiska reningssteget bytas ut. Biologisk rening av både organiskt material och kväve kan ske med så kallade membranbioreaktorer (MBR) där aktiva mikroorganismer bildar slam som sedan avskiljs från vattnet genom filtrering. Den höga energianvändningen är ett välkänt problem med MBR och i detta projekt beräknades energianvändningen bli mer än dubbelt så stor om den nya anläggningen utrustas med kväverening med MBR istället för aktivslamprocess som idag.

Idag produceras ungefär 2 400 m³ biogas per dag i röt-kammaren på Främby reningsverk, vilket beräknats öka med 60 % till 3 900 m³ i framtiden eftersom mängden råmaterial i form av slam kommer att öka. Tre möjliga användningsområden för biogasen undersöktes i detta projekt: produktion av värme, produktion av el och värme samt produktion av fordonsgas. Förbränning av gasen i en gaspanna för produktion av värme är den enklaste metoden med lägst krav på gasens kvalitet och lägst investeringskostnader. Värmeproduktionen kommer dock överstiga reningsverkets behov vilket kräver att gaspannan ansluts till fjärrvärmenätet så att överskottsvärmen kan användas på annat håll. För att gasen ska kunna användas som fordonsbränsle krävs att den uppgraderas till en högre metanhalt genom att koldioxid avlägsnas. Uppgraderingsanläggningar för biogas finns främst där biogasproduktionen är större än på Främby eftersom investeringskostnaden är starkt beroende av kapaciteten på anläggningen. Det bästa alternativet för en anläggning av Främby's storlek är att likt idag använda gasen för produktion av el och värme i en gasmotor eller mikroturbin. Den energi som produceras kan då användas på anläggningen och bidra till att framtidens Främby blir ett energineutralt reningsverk.

Exekutiv sammanfattning

Energianvändningen i reningsprocessen på Främby reningsverk utgörs av 1,9 GWh el och 1,5 GWh värme per år. Eftersom elanvändningen står för de största energikostnaderna samtidigt som en del av värmen produceras internt på reningsverket bör energieffektiviseringsåtgärder inriktas på elanvändningen. Energianvändningen på Främby sticker inte ut jämfört med andra reningsverk och mest el används som förväntat i det biologiska reningssteget, i Främbys fall 66 % av elen. Reningsprocessen fungerar inte optimalt ur ett reningsperspektiv, vilket minskar utrymmet för energieffektiviseringsåtgärder. Energieffektiviteten skulle förmodligen öka om dagens bioreaktorer byttes ut mot bottenluftare.

Om reningsverket uppgraderas och belastningen ökar från 50 000 personekvivalenter (pe) till 70 000 pe kan energianvändningen öka med ungefär 50 %, under förutsättning att energieffektivisering av framför allt biosteget genomförs. Om reningskraven utökas till att även inkludera kväve och Främby inför kväverening med membranbioreaktorer (MBR) i biosteget kan energianvändningen istället tredubblas.

Biogasproduktionen på dagens reningsverk tyder på att rötningsprocessen fungerar bra, trots att ingen optimering av processen har gjorts. Med större röt-kammarvolym och mer slam som ett resultat av att belastningen ökar till 70 000 pe kan biogasproduktionen öka med 60 %. Det bästa användningsområdet för biogasen på en anläggning av Främbys storlek är kraftvärmeproduktion. Om samma reningsprocesser som idag används i framtiden kan reningsprocessen på Främby bli självförsörjande på både el och värme. Med MBR kan endast en tredjedel av elbehovet uppfyllas.

Innehållsförteckning

Tabellförteckning	7
Figurförteckning	8
Förkortningar	10
1 Inledning	11
1.1 Problemformulering	11
1.2 Frågeställning	12
1.3 Avgränsningar	12
2 Bakgrund	13
2.1 Avloppsrening i Sverige	13
2.1.1 Historik	13
2.1.2 Regelverk	13
2.1.3 Reningsprocess	14
2.2 Främby avloppsreningsverk	15
2.2.1 Allmänt	15
2.2.2 Reningsprocess	16
2.3 Energianvändning på reningsverk	19
2.3.1 Nyckeltal för energianvändning	19
2.3.2 Tidigare energikartläggningar på Främby	20
2.4 Biogas	21
2.4.1 Bildning av biogas	21
2.4.2 Biogas i Sverige	21
3 Teori	22
3.1 Energibegrepp	22
3.1.1 Energi	22
3.1.2 Effekt	22
3.1.3 Energinutralitet	23
3.2 Energianvändning och energieffektivisering på reningsverk	23
3.2.1 Uppvärmning	23
3.2.2 Elanvändning i elmotorer	23
3.2.3 Övrig energianvändning	24
3.2.4 Energieffektivisering	24
3.2.5 Effektstyrning	25
3.3 Energianvändande processer och effektiviseringspotential	25
3.3.1 Pumpning	25
3.3.2 Omrörning	26
3.3.3 Luftning	26
3.3.4 Biologisk rening med MBR	27

3.4	Biogasproduktion	29
3.4.1	Processparametrar	29
3.4.2	Biogasutbyte	31
3.4.3	Användningsområden för biogas	32
4	Metod	35
4.1	Energikartläggning och energieffektivisering av dagens Främby	35
4.1.1	Inventering av energianvändande komponenter	35
4.1.2	Beräkning av energianvändning	35
4.1.3	Rekommendation av energieffektiviseringsåtgärder	37
4.2	Energianvändning på Framtidens Främby	37
4.2.1	Utformning av framtidens anläggning	37
4.2.2	Beräkning av energianvändning	38
4.2.3	Beräkning av förändringar i belastningar, volymer och flöden	39
4.3	Förbättrat resursutnyttjande - biogas	40
4.3.1	Utvärdering av dagens biogasprocess	40
4.3.2	Beräkning av framtida biogasproduktion	42
4.3.3	Jämförelse av olika användningsområden för biogasen	43
5	Resultat och diskussion	44
5.1	Energikartläggning och energieffektivisering av dagens Främby	44
5.1.1	Energikartläggning	44
5.1.2	Vidare analys av resultatet	57
5.1.3	Förslag på energieffektiviseringsåtgärder	59
5.2	Energianvändning på Framtidens Främby	60
5.2.1	Utformning av framtidens anläggning	60
5.2.2	Energianvändning för biologisk rening med MBR	63
5.2.3	Beräknad energianvändning	63
5.2.4	Rekommendationer inför framtiden	66
5.3	Förbättrat resursutnyttjande med biogas	67
5.3.1	Biogas på dagens Främby	67
5.3.1.1	Rötningsprocess	67
5.3.1.2	Biogasproduktion	68
5.3.1.3	Gasmotor	69
5.3.2	Biogas på Framtidens Främby	69
5.3.2.1	Biogasproduktion	69
5.3.2.2	Användningsområden för biogasen	70
5.4	Förslag på vidare arbete	75
6	Slutsats	76
	Referenslista	78
	Appendix	82

Tabellförteckning

Tabell 1. Specifik elanvändning i kWh/pe och kWh/m ³ inkommande avloppsvatten för Främby reningsverk i jämförelse med andra reningsverk.	45
Tabell 2. Specifik energianvändning i kWh/pe och kWh/m ³ inkommande avloppsvatten för Främby reningsverk i jämförelse med Borlänge reningsverk år 2016.	45
Tabell 3. Specifik elanvändning i kWh/m ³ inflöde för det biologiska reningssteget på Främby reningsverk i jämförelse med resultat från en tidigare energikartläggning, Borlänge reningsverk och litteraturvärden.	46
Tabell 4. Data för dagens rötningsprocess i jämförelse med data som användes vid dimensioneringen av röt-kammarna år 2008.	67
Tabell 5. Sammansättning och metanutbyte för substratmixen i Främbys röt-kammare år 2017.	68
Tabell 6. Processparametrar för Främbys röt-kammare idag och i framtiden.	70
Tabell 7. Biogasproduktion på Främby idag och i framtiden.	70
Tabell 8. Förutsättningar för värmeproduktion med gaspanna på Framtidens Främby.	71
Tabell 9. Förutsättningar för kraftvärmeproduktion med gasmotor på Framtidens Främby.	72
Tabell 10. Förutsättningar för produktion av fordonsgas genom uppgradering på Framtidens Främby.	73

Figurförteckning

<i>Figur 1.</i> Flygfoto av Främby reningsverk med några av de olika delarna och processerna utmärkta. Vissa av byggnaderna som kan ses på bilden hör till den separata gruvvattenreningen och inkluderas inte i projektet.	16
<i>Figur 2.</i> Schematisk bild över huvudsakliga processer och flöden på Främby reningsverk.	18
<i>Figur 3.</i> Total elanvändning på Främby reningsverk uppdelad på de olika reningsprocesserna.	46
<i>Figur 4.</i> Processschema över den mekaniska reningen på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.	48
<i>Figur 5.</i> Processschema över den kemiska reningen på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.	49
<i>Figur 6.</i> Processschema över den biologiska reningens luftning på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.	50
<i>Figur 7.</i> Processschema över den biologiska reningens slutsedimentering på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.	52
<i>Figur 8.</i> Processschema över slamförtjockning och slamlager på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.	53
<i>Figur 9.</i> Processschema över rötningen på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.	54
<i>Figur 10.</i> Processschema över slamavvattningen på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.	55

- Figur 11.* Processchema över gasanläggningen på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden. 56
- Figur 12.* Total elanvändning på Främby reningsverk uppdelad på olika typer av maskiner. I Tabell A1 i Appendix finns angivet vilken kategori varje maskin har placerats i. 58
- Figur 13.* Elanvändning för pumpning på Främby reningsverk uppdelad på olika pumpar. 59
- Figur 14.* Schematisk bild över reningsprocessen på Framtidens Främby. Nya processer som inte finns på dagens anläggning är markerade i grönt. För flöden finns angivet hur de förväntas förändras i förhållande till dagens flöden eller hur det har beräknats. 62
- Figur 15.* Energianvändning på Framtidens Främby med olika metoder för biologisk rening. Energianvändningen för dagens användning finns med för jämförelse. Gashantering är inte inkluderad för Framtidens Främby. 64
- Figur 16.* Investeringskostnader och årliga intäkter för olika användningsområden för biogasen som produceras på Framtidens Främby. 74
- Figur 17.* Årlig elanvändning för olika användningsområden för biogasen som produceras på Framtidens Främby. För jämförelse visas elanvändningen för reningsprocessen på Framtidens Främby med biologisk rening med aktivslamprocess (AS). 74

Förkortningar

ARV	Avloppsreningsverk
AS	Aktivslamprocess
BOD ₇	Syreförbrukande organiskt material (eng. biological oxygen demand)
FEV	Falu Energi & Vatten
FS	Typ av membran (eng. flat sheet)
GAK	Granulerat aktivt kol
GF	Glödförlust
HF	Typ av membran (eng. hollow fiber)
LBG	Flytande biogas (eng. liquefied biogas)
MBBR	Biologisk reningsmetod med biobärare (eng. moving bed biofilm reactor)
MBR	Membranbioreaktor
Nm ³	Normalkubikmeter. Enhet för gasvolym vid standardtemperatur 0 °C och standardtryck 1 atm.
Pe	Personekvivalenter. Vanligt mått på dimensionering eller belastning på reningsverk.
PSA	Teknik för uppgradering av biogas till fordonsgas (eng. pressure swing adsorption)
SBR	Satsvis biologisk rening
TS	Torrsubstans

1 Inledning

1.1 Problemformulering

Enligt statistik från Statistiska Centralbyrån uppgick elanvändningen för vattenverk och avloppsrening i Sverige år 2017 till 484 GWh, vilket är 0,4 % av den totala elanvändningen för alla sektorer i landet exklusive förluster (SCB Statistikdatabasen 2019). Branschorganisationen Svenskt Vatten uppskattar att elanvändningen på svenska reningsverk är ännu större: 575 GWh år 2016 (Balmér 2018).

Intresset för att minska energianvändningen inom avloppsrening har ökat de senaste åren i takt med att klimatförändringarna fått allt mer uppmärksamhet (Olsson 2008). Reningsverkens stora energianvändning har gjort att de hamnat i fokus i arbetet med att uppnå lokala och globala miljö- och hållbarhetsmål (Olsson 2008; Danielsson 2013). Dessutom finns ekonomiska drivkrafter för energieffektivisering då energi idag utgör en stor kostnad för reningsverken (Lingsten & Lundkvist 2008). Statistik från de senaste åren visar att reningsverken i Sverige blir allt mer energieffektiva. Samtidigt bidrar befolkningsökningen i Sverige och införandet av avancerade reningstekniker på allt fler reningsverk till att öka energianvändningen (Balmér 2018).

Gemensamt för många svenska reningsverk är att de byggdes på 60- och 70-talen och idag är i dåligt skick (Naturvårdsverket 2018b; Digréus 2017). Falu Energi & Vatten (FEV) har valt att ta ett helhetsgrepp på sin stora anläggning Främby avloppsreningsverk (ARV) i Falun genom projektet Förstudie Framtidens Främby av vilket detta examensarbete är en del. Projektet syftar till att kartlägga vilka förändringar som behövs eller kommer att behövas på Främby avloppsreningsverk med det långsiktiga målet att skapa en miljömässigt hållbar och kostnadseffektiv avloppsrening. I målen ingår att Framtidens Främby ska vara en energineutral anläggning som levererar mer energi än den använder (Hedén 2018). Detta kräver förutom effektivare energianvändning att restprodukter från reningsverket utnyttjas som resurser för energiproduktion (Granmar 2017). Idag används slammet som bildas vid reningen för produktion av biogas, vilken i sin tur förbränns i en gasmotor som producerar el och värme. Driftsäkerheten hos gasmotorn är dock låg, varför det i framtiden kan bli aktuellt med andra användningsområden för biogasen.

Redan idag är Främby reningsverk i behov av reparationer och ombyggnationer på grund av åldrande konstruktioner och teknik samt underdimensionering av vissa delar. Sedan verket togs i drift för 57 år sedan har Faluns befolkning ökat och därmed också belastningen på reningsverket. FEV har också beslutat att lägga ner fyra av sina mindre reningsverk och istället ansluta deras upptagningsområden till Främbyverket, vilket kommer öka belastningen ytterligare. Målet är att Främby reningsverk år 2040 ska ha en kapacitet av 90 000 personekvivalenter (pe), även om belastningen förväntas bli ungefär

70 000 pe, att jämföra med dagens belastning på knappt 50 000 pe. Om några år ska Främby ARV dessutom ansöka om ett nytt miljötillstånd, vilket troligtvis kommer medföra högre reningskrav, bland annat för kväve. Enligt det nuvarande tillståndet från år 2 000 behövs ingen rening av kväve på Främby eftersom Falun ligger norr om den geografiska gränsen för krav på kväverening (Naturvårdsverket 2018b).

1.2 Frågeställning

Projektet baseras på tre huvudsakliga frågeställningar som berör dagens energianvändning, framtidens energianvändning samt energiproduktion med biogas. Alla dessa områden har betydelse för Främbyns möjligheter att bli en energineutral anläggning i framtiden.

Den första delen i projektet består av energikartläggning och energieffektivisering av dagens Främby och går ut på att:

- Kartlägga energin som används i reningsprocessen i form av el och värme
- Utvärdera vilka processteg och vilka maskiner som använder mest energi
- Undersöka om, och i så fall var, potential för energieffektivisering finns
- Ge förslag på möjliga energieffektiviseringsåtgärder

Den andra delen berör energianvändningen på Framtidens Främby och syftar till att:

- Beräkna hur stor energianvändningen kan bli på Framtidens Främby om belastningen ökar från dagens knappt 50 000 pe till 70 000 pe
- Undersöka hur energianvändningen påverkas om kväverening med membranbioreaktorer (MBR) införs på Framtidens Främby

I den sista delen av projektet undersöks möjligheterna till förbättrat resursutnyttjande med avseende på biogas. Syftet är att:

- Utvärdera rötningsprocessen, biogasproduktionen och användningen av biogas på dagens anläggning
- Beräkna hur stor biogasproduktionen kan bli på Framtidens Främby vid en belastning av 70 000 pe
- Utvärdera olika alternativ för användning av biogasen med avseende på producerad energi, energianvändning och ekonomi

1.3 Avgränsningar

- Endast den energi som används i reningsprocessen och vid behandlingen av slam inkluderas i energikartläggningen. Den separata gruvvattenreningen som finns på Främbyns reningsverk inkluderas inte i projektet.
- Endast högvärdig energi i form av el, värme och biogas ingår i kartläggningen.
- Utvärderingen av möjligheter till förbättrat resursutnyttjande inkluderar endast biogasproduktion.

2 Bakgrund

2.1 Avloppsrening i Sverige

2.1.1 Historik

Under slutet av 1800-talet byggdes de första vattenburna avloppssystemen i Sverige. Dessa bestod av rörsystem nedgrävda i marken som förde orenat avloppsvatten från bostäder inne i städer ut till närliggande sjöar och hav. Innan dess hade hushållens latrin samlats i tunnor för att sedan grävas ner eller användas till gödsling av åkrar. Syftet med de första vattenburna systemen var främst att förbättra de sanitära förhållandena inne i städerna (Naturvårdsverket 2018b). Så småningom ledde utsläppen av orenat avloppsvatten till försämrade förhållanden i sjöar, vattendrag och kustområden (Naturvårdsverket 2018b). Problem med syrebrist och övergödning av sjöar blev mycket uppmärksammade under 1960-talet, vilket ledde till att en stor utbyggnad av kommunala reningsverk skedde under det följande årtiondet (Nationalencyklopedin u.å.b). De nya reningsverken, tillsammans med åtgärder från industrier med egna avlopp, ledde till att vattenförhållandena snabbt förbättrades (Naturvårdsverket 2018b).

Idag är nästan alla hushåll i svenska tätorter anslutna till de kommunala reningsverken. Många hushåll utanför tätorter har däremot så kallade enskilda avlopp, vilka står för betydande utsläpp av fosfor och kväve (Naturvårdsverket 2018b). Industrier och gruvor har ofta egen rening av spillvatten eftersom vattnets specifika karaktär ofta kräver anpassade reningsverk (Nationalencyklopedin u.å.b).

2.1.2 Regelverk

De stora miljöproblemen som uppmärksammades under 1960-talet gjorde att avloppsvattenrening blev en statlig angelägenhet. Staten finansierade utbyggnaden av kommunala reningsverk och under denna tid bildades också Statens Naturvårdsverk. Idag ansvarar kommunerna för enskilda avlopp medan Naturvårdsverket är tillsynsmyndighet för större reningsverk (Naturvårdsverket 2018b). Reningsverk som tar emot avloppsvatten från fler än 2 000 personer måste enligt miljöprövningsförordningen (SFS 2013:251) ha tillstånd för att bedriva sin verksamhet. Tillstånden innehåller olika villkor som verksamheterna måste efterleva (Svenskt Vatten 2016). Enligt miljöbalken är reningsverk bland annat skyldiga att utföra egenkontroll av anläggningarna, mäta utsläpp till recipient och att redovisa resultaten till Naturvårdsverket i årliga miljörapporter.

Reningskraven bestäms både av reningsverkens miljö tillstånd och Naturvårdsverkets föreskrifter, vilka utgår från EU:s avloppsdirektiv som syftar till att motverka negativ miljöpåverkan från utsläpp av avloppsvatten i tätbebyggda områden. I Naturvårdsverkets föreskrifter finns krav på det renade vattnet i form av tillåtna gränsvärden för bland annat halter av kväve och syreförbrukande ämnen samt regler för kontroll och provtagning. Begränsningsvärden för fosfor bestäms däremot av miljö tillståndet för varje reningsverk. Kraven för kväve gäller endast renat vatten som når kusten söder om Norrtälje eftersom dessa områden bedöms vara känsliga för kväveutsläpp. Förutom EU:s avloppsdirektiv påverkas regelverket i Sverige av Östersjö ländernas gemensamma aktionsplan Baltic Sea Action Plan (Naturvårdsverket 2018b). Ett av målen i Baltic Sea Action Plan är minskad övergödning och en av de föreslagna åtgärderna i Sveriges nationella åtgärdsplan är att minska utsläppen av kväve från reningsverk, varför det är möjligt att kraven på kväverening kommer gälla fler reningsverk i framtiden (Naturvårdsverket 2009).

2.1.3 Reningsprocess

Reningsverk är uppbyggda i flera steg i syfte att rena olika typer av föroreningar. Reningsverken som byggdes under 50-, 60- och 70-talen innehåller vanligen olika kombinationer av mekanisk, biologisk och kemisk rening eftersom dessa metoder renar bort de ämnen som gav upphov till dåtidens största problem i vattenmiljöer. Vilken typ av rening som finns på ett specifikt reningsverk beror bland annat på kvaliteten på det inkommande vattnet och vilka krav på renhet som finns på det utgående vattnet (Nationalencyklopedin u.å.b). I den mekaniska reningen avskiljs rens, det vill säga större föroreningar som egentligen inte ska vara i avloppsvattnet, samt större partiklar såsom sand och grus. Alla reningsverk har mekanisk rening som första steg för att avlägsna stora föroreningar som skulle kunna fastna och förstöra rör och pumpar längre fram i reningsprocessen (Naturvårdsverket 2018b). I den kemiska reningen används kemikalier för att avskilja i första hand fosfor. Biologiskt nedbrytbart material renas bort i den biologiska reningen (Nationalencyklopedin u.å.b). Den mest tillämpade metoden för biologisk rening kallas aktivslamprocess och går ut på att mikroorganismer (aktivt slam) omsätter organiskt material, fosfor och en viss del av det kväve som finns löst i avloppsvattnet (Svenskt Vatten 2007; Naturvårdsverket 2018b).

Sedan 1980-talet bygger allt fler reningsverk till ytterligare ett reningssteg med syfte att avlägsna kväveföreningar från vattnet. Kvävereningen är en typ av biologisk rening och kan därför kombineras med det redan befintliga biologiska reningssteget (Nationalencyklopedin u.å.b). Kvävereningen är en mer komplicerad process och finns därför oftast bara på större reningsverk (Naturvårdsverket 2013). Kvävet finns i avloppsvatten främst i form av ammonium och omvandlas vid biologisk kväverening till kvävgas som avgår till atmosfären. Ammonium omvandlas först till nitrat genom nitrifikation i luftade bassänger och därefter omvandlas nitrat till kvävgas genom denitrifikation i syrefria bassänger (Svenskt Vatten 2007). Några alternativa tekniker för kväverening är membranbioreaktor (MBR) där slammet avskiljs genom filtrering och moving bed biofilm Reactor (MBBR) där aktiva mikroorganismer sitter fast på små plastbitar i vattnet, så kallade biobärare (IVL Svenska Miljöinstitutet u.å.; Lustig 2012). På vissa anläggningar med höga reningskrav finns filtrering som ett sista reningssteg. Filtreringen fångar upp partiklar som lyckats ta sig igenom sedimenteringsbassängerna (Naturvårdsverket 2018b).

Avloppsvatten innehåller också andra typer av föroreningar, bland annat metaller som till stor del avlägsnas i reningsverkens olika processer och hamnar i slammet. Långlivade organiska ämnen och lösningsmedel från hushållsprodukter och industrier samt läkemedelsrester finns i små mängder i

avloppsvatten, men är svårnedbrytbara och kan därför orsaka problem när de når vattenmiljöer. De renas dåligt på konventionella reningsverk och kräver särskilda avancerade reningsmetoder (Naturvårdsverket 2018b).

Ämnen som avlägsnas från avloppsvattnet i reningsverk hamnar i slammet, en restprodukt som bildas på reningsverk. Slammet blir därför rikt på biologiskt nedbrytbart material och näringsämnen. Ett möjligt användningsområde för slammet är som ersättning för konstgödsel på jordbruksmark eftersom det innehåller mycket fosfor. För att få spridas på åkrar får slammets innehåll av tungmetaller inte vara för högt och slammet måste först stabiliseras genom luftning eller rötning. På platser där avloppsvattnet är mycket förorenat av tungmetaller kan slammet i undantagsfall behöva deponeras eller användas som täckning av avfallsupplag, även om biologiskt avfall egentligen inte får deponeras i Sverige (Nationalencyklopedin u.å.b).

2.2 Främby avloppsreningsverk

2.2.1 Allmänt

Falu Energi & Vatten (FEV) är ett dotterbolag till Falu kommun som har i uppgift att skapa en fungerande infrastruktur för kommunens invånare nu och i framtiden. Verksamheten innefattar bland annat el, värme, återvinning, vatten och avlopp (Falun Energi & Vatten u.å.a). Främby ARV är FEV:s största reningsverk och renar kommunalt avloppsvatten från Faluns innerstad och vissa närliggande områden. FEV har också sju små reningsverk som renar avloppsvatten i mindre samhällen runt om i kommunen (Falun Energi & Vatten u.å.b).

Främby reningsverk togs i drift år 1962 och har endast renoverats sparsamt sedan dess. En viss utbyggnad av kapaciteten har skett genom åren, bland annat har en extra linje i biosteget byggts till och antalet slutsedimenteringsbassänger har utökats. År 2009 installerades en biogasanläggning med gasmotor i syfte att minska volymen på slammet och på sikt göra reningsverket självförsörjande på el och värme (Lundin 2009; Larsen 2009). Sedan år 2000 har Främby reningsverk ett tillstånd att behandla avloppsvatten från 50 000 pe och avloppsslam från 61 000 pe. Den biologiska reningen är sedan år 2007 dimensionerad för att behandla avloppsvatten från 55 000 pe (Falun Energi & Vatten 2018a). Andra delar av reningsverket är däremot underdimensionerade. Ungefär 40 000 personer är anslutna till Främbyverket. Teoretiskt beräknat utifrån mängden organiskt material i det inkommande avloppsvattnet är dock belastningen nästan 50 000 pe, vilket gör Främby till ett medelstort reningsverk i Sverige. Av 416 reningsverk med minst 2 000 pe år 2016 hade endast 21 en belastning på mer än 100 000 pe och 90 var i Främby storleksordning på 20 000 - 10 0000 pe (Statistiska centralbyrån 2018).

Årligen renas 6 000 000 m³ avloppsvatten på Främbyverket, vilket motsvarar ungefär 16 000 m³ per dygn. Det renade vattnet släpps ut i Främbyviken i sjön Runn (Falun Energi & Vatten u.å.b). Sjön eller vattendraget som tar emot det renade vattnet från ett reningsverk kallas recipient. Recipienten Runn är förorenad av bland annat metaller och organiska miljögifter och Främby reningsverk bedöms vara en av flera utsläppskällor som har betydande påverkan på sjöns status (Vatteninformationssystem Sverige u.å.). På Främby finns en separat anläggning som renar gruvvatten som pumpas upp från Faluns nu nedlagda gruva (Falun Energi & Vatten u.å.b). Faluns historia av gruvverksamhet gör att det inkommande vattnet till det kommunala reningsverket har ett högt innehåll av metaller på grund av inläckage av förorenat tillskottsvatten till ledningsnätet (Olsson 2018).

2.2.2 Reningsprocess

Idag sker reningen på Främby i tre steg genom mekanisk rening, kemisk rening och biologisk rening med aktivslamprocess (Falun Energi & Vatten u.å.b). Ett flygfoto av Främby reningsverk kan ses i *Figur 1* och de huvudsakliga processerna och flödena på reningsverket kan ses i *Figur 2*. Nedan följer en vidare förklaring av de olika processtegen.



Figur 1. Flygfoto av Främby reningsverk med några av de olika delarna och processerna utmärkta. Vissa av byggnaderna som kan ses på bilden hör till den separata gruvvattenreningen och inkluderas inte i projektet.

Mekanisk rening

Inkommande vatten från avloppsledningsnätet som anländer till Främbyverket passerar först genom rensgaller som fångar upp skräp och större föroreningar (Naturvårdsverket 2018b). Det uppsamlade materialet, rensat, transporteras bort från reningsverket för förbränning. Vattnet rinner vidare till ett sandfång, en bassäng där större partiklar såsom grus och sand sjunker till botten och samlas upp (Svenskt Vatten 2007). Sanden tvättas i en sandtvätt innan den samlas i en container för transport till återvinningscentralens deponi. I sandtvätten tillförs också slam från enskilda brunnar som transporterats dit i tankbilar.

Kemisk rening

Den kemiska reningen sker direkt efter den mekaniska reningen, vilket innebär att Främbyverket tillämpar så kallad förfällning då den kemiska behandlingen sker före den biologiska reningen (Svenskt Vatten 2007). I den kemiska reningen tillsätts en positivt laddad fällningskemikalie till avloppsvattnet som gör att negativt laddade partiklar i vattnet flockas och bildar större partiklar som lättare sedimenterar, det vill säga sjunker till botten med hjälp av gravitationen (Nationalencyklopedin u.å.b). Partiklarna bildar slam och kan på så vis separeras från vattnet i så kallade försedimenteringsbassänger. Det avskilda slammet, som kallas primärslam, pumpas vidare till slamförtjockning. I den kemiska reningen avskiljs främst fosfor men även en del organiskt material (Svenskt Vatten 2007).

Biologisk rening – luftning

När vattnet passerat genom försedimenteringsbassängerna leds det vidare till luftningen som är det första steget i den biologiska reningen. Där passerar vattnet genom luftningsbassänger med bioreaktorer som tillsätter syre till vattnet. I bioreningen på Främby används en aktivslamprocess där aktiv biomassa (slam) i form av mikroorganismer, främst bakterier, omsätter organiska föreningar och binder en del kväve. Det organiska materialet blir till koldioxid och vatten men bidrar också till mikroorganismernas tillväxt, vilket gör att slamvolymen ökar (Nationalencyklopedin u.å.b). Processen är aerob eftersom mikroorganismerna förbrukar syre och därför krävs en hög syrehalt i vattnet (Svenskt Vatten 2007).

Slammet som lämnar luftningsbassängerna med avloppsvattnet återförs via en returslamlåda. Genom att cirkulera slammet i processen och endast avlägsna en slammängd som motsvarar tillväxten kan mikroorganismerna hållas kvar i biosteget (Svenskt Vatten 2007). Slammet i den biologiska reningen kallas bioslam. Det bioslam som tas ut ur processen vid returslamlådan och pumpas vidare till slamförtjockning kallas överskottsslam.

Biologisk rening – slutsedimentering

Efter luftningsbassängerna leds vattnet till slutsedimenteringsbassänger där bioslammet samlas upp genom sedimentering och pumpas till returslamlådan. Vattnet som passerat slutsedimenteringen har genomgått alla reningssteg och leds vidare ut i recipienten, Främbyviken i sjön Runn.

Slamförtjockning och slamlager

Primärslam från försedimenteringen och bioslam från slutsedimenteringen förtjockas i en gravitationsförtjockare som också fungerar som slamlager. Förtjockningen är en process där slammets torrsubstanshalt (TS-halt) höjs genom att vatten avlägsnas. Därefter transporteras slammet till en mekanisk slamförtjockare där det förtjockas ytterligare. Före den mekaniska förtjockaren tillsätts polymer till slammet, en kemikalie som gör att partiklar lättare flockar sig.

Det förtjockade slammet rötas i två rötkammare. Rötkamrarna matas också med substrat från två externa lager. Externslam från FEV:s mindre reningsverk kommer med tankbil till Främby och töms i ett externslamlager tillsammans med processpillvatten från två verksamheter i närområdet som producerar hygienprodukter. Det andra lagret innehåller fett från fettfällor hos restaurangverksamheter som kommer till reningsverket i omgångar. Fettet blandas med vatten i lagret för att underlätta inpumpning till rötkamrarna.

Rötning

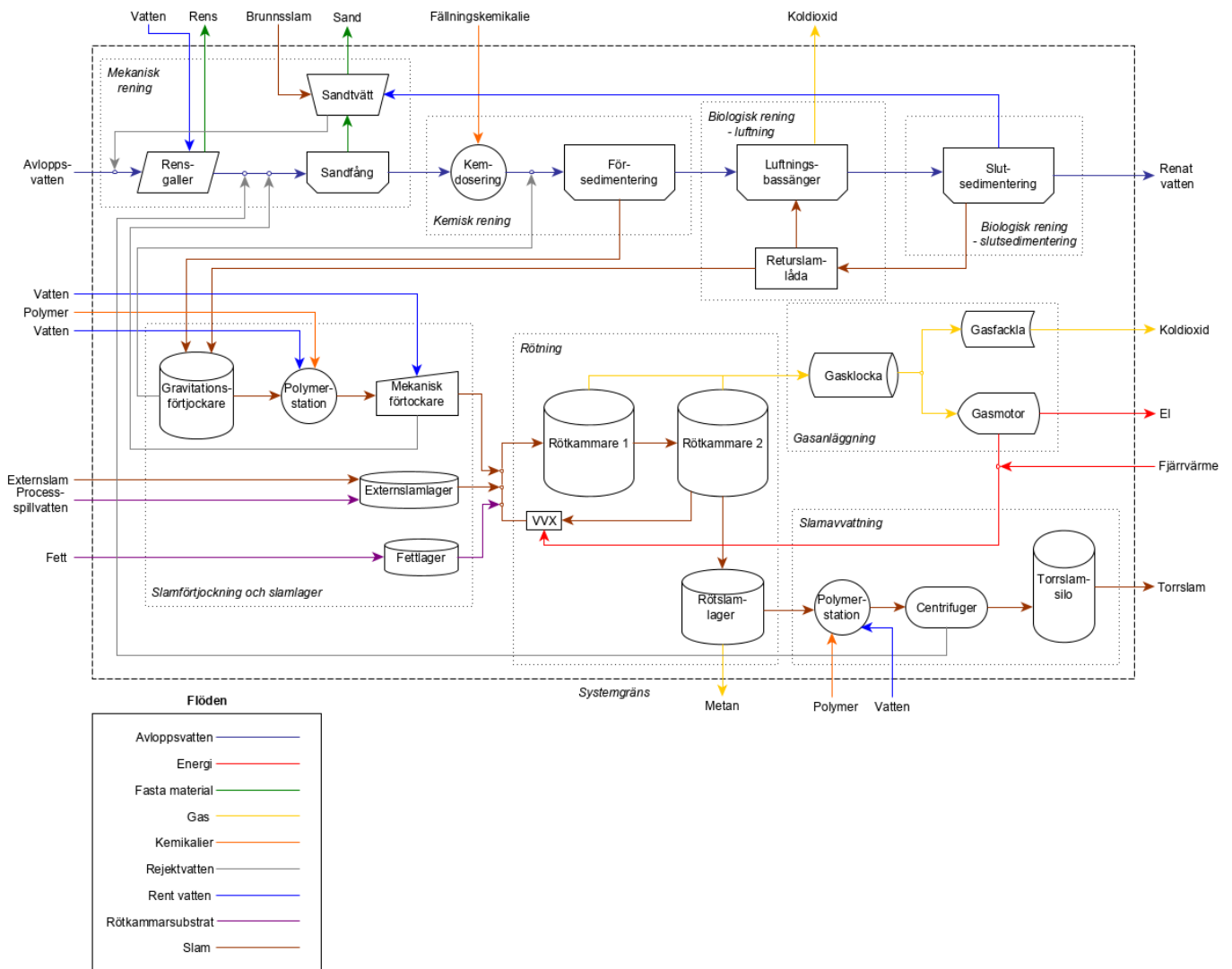
I röttningsanläggningen cirkulerar slammet mellan de två rötkamrarna och värms upp på cirkulationsledningen. Tillförsel av substrat och biogasbildning sker kontinuerligt och biogasen stiger uppåt i rötkamrarna och leds ut via rör i taket. Det rötade slammet tas ut ur en av rötkamrarna och förs till ett öppet rötslamlager.

Slamavvattning

Rötslammet förs från rötslamlagret vidare till två centrifuger som avvattnar slammet, det vill säga avskiljer vatten från slammet. Likt vid den mekaniska slamförtjockaren tillsätts polymer för att underlätta slamavvattningen. Det avvattnade slammet pumpas upp i en silo för lagring innan det körs till återvinningscentralen i Falun där det används för att producera anläggningsjord till sluttäckningen av en deponi.

Gasanläggning

Biogasen som bildats i röttkammarna leds till en gasklocka där en liten volym gas kan lagras. När gasklockan är full förbränns gasen i en gasmotor som producerar el till elnätet via en generator. Värme återvinns från avkyllningen av motorn och från rökgaserna och används till att värma upp slammet i röttkammarna. När gasflödet överstiger gasmotorns kapacitet eller om gasmotorn inte är i drift förbränns överskottsgasen i en fackla.



Figur 2. Schematisk bild över huvudsakliga processer och flöden på Främby reningsverk.

2.3 Energianvändning på reningsverk

2.3.1 Nyckeltal för energianvändning

Det är svårt att jämföra energianvändningen för olika reningsverk eftersom förutsättningarna ofta är mycket olika. Exempelvis har topografin betydelse för hur mycket energi som används för pumpning. Andra faktorer som påverkar energianvändningen är storleken på reningsverket och vilka renings-tekniker som används (Olsson 2008). Större verk har ofta lägre specifik energianvändning. Störst skillnader mellan liknande verk finns bland små reningsverk (Lingsten & Lundkvist 2008).

Kvaliteten på det utgående vattnet har högst prioritet på ett reningsverk eftersom det är där kraven från Naturvårdsverket finns (Olsson 2008). Energianvändningen måste därför alltid sättas i relation till vattnets renhet och egenskaperna hos det inkommande vattnet. Hög energianvändning kan bero på hårda miljökrav eller stora mängder industriellt spillvatten (Maktabifard, Zaborowska & Makinia 2018). Om kväverening finns på reningsverket blir energianvändningen högre (Kjellén & Andersson 2002).

Energianvändning för olika reningsverk kan jämföras med hjälp av nyckeltal eller specifik energianvändning, där energianvändningen anges i relation till en basenhet. Nyckeltalen kan vara baserade på volym inkommande vatten, antal anslutna pe eller behandlad mängd syreförbrukande organiskt material (BOD_7) (Balmér 2018). Nackdelen med att basera energianvändningen på volymen inkommande avloppsvatten är att inläckaget av tillskottsvatten på ledningsnätet är olika stort för olika verk. Om antalet anslutna pe används som basenhet förbises det industriella spillvattnet som varierar för olika verk (Lingsten & Lundkvist 2008). Istället används ofta teoretiskt antal pe beräknat utifrån mängden BOD_7 i det inkommande avloppsvattnet och då används ett medelvärde på 70 g BOD_7 per pe och dag (Balmér 2018). När pe baseras på mängden organiskt material i avloppsvattnet inkluderas också industri-spillvatten i belastningen.

Maktabifard, Zaborowska & Makinia (2018) har sammanställt resultat från flera olika studier som undersökt den specifika energianvändningen på olika reningsverk i Europa. Resultaten varierade mellan 15,3 och 48,2 kWh per pe och år för konventionella reningsverk på mellan 10 000 och 100 000 pe. Högst var energianvändningen för reningsverk med avancerad rening och energianvändningen per pe minskade något med reningsverkens storlek. I samma artikel redovisas också specifik energianvändning baserat på inflöde, med siffror från olika studier på 0,26 kWh/m³ till mer än 1 kWh/m³.

I Kjellén & Andersson 2002 anges att den specifika elanvändningen för mindre och medelstora reningsverk i Sverige är 90 kWh per pe och år och motsvarande siffra för tyska reningsverk är hälften så stor, ett resultat av högre elpriser i Tyskland. Noteras bör dock att denna publikation är över 15 år gammal. Balmér & Hellström (2011) hänvisar till en rapport från 2010 som anger toleransvärden för energianvändning på tyska reningsverk. För reningsverk på mellan 10 000 och 100 000 pe anges en årsenergianvändning för el på 30 kWh/pe inklusive inloppspumpning.

I Svenskt Vattens kartläggning av elanvändningen på svenska reningsverk år 2016 (Balmér 2018) var den specifika elanvändningen tydligt beroende av storleken på reningsverket men varierade även bland verk i samma storleksordning. För reningsverk med runt 50 000 pe var elanvändningen exklusive pumpning av avloppsvatten ungefär mellan 25 och 75 kWh per pe och år. I ett energieffektiviseringsprojekt hos Svenskt Vatten undersöktes år 2011 energianvändningen hos ett antal avloppsreningsverk i Sverige med viss överrepresentation av större verk (Lingsten, Lundkvist & Hellström 2013). Elanvändningen per pe för reningsverk med en belastning på minst 2 000 pe hade ett medelvärde på

110 kWh/pe och ett medianvärde på 85 kWh/pe. I samma undersökning år 2008 var medelvärdet 123 kWh/pe och medianvärdet 93 kWh/pe (Lingsten et al. 2011). I Balmér & Hellström 2011 har elanvändningen för svenska avloppsreningsverk uppskattats till i genomsnitt 52 kWh per pe och år. Användningen av värmeenergi i rötkammaren uppges i Kjellén & Andersson 2002 vara ungefär lika stor som den totala elanvändningen.

Luftningen är den process som använder mest el på de flesta reningsverk, men luftningens andel av den totala elanvändningen varierar. I Svenskt Vattens underökning från 2016 varierade den mellan 16 och 76 %, i vissa fall var dock hela biosteget inkluderat (Balmér 2018). I samma undersökning konstateras att biosteget ofta svarar för över 50 % av den totala elanvändningen, men att detta inte enbart beror på luftningen utan även på hög energianvändning för pumpning och omrörning. I Jenkins & Wanner 2014 anges att luftning och omrörning står för 50 - 80 % av elanvändningen i aktivslamprocessen.

Maktabifard, Zaborowska & Makinia (2018) redovisar resultat från studier som har delat upp energianvändningen mellan olika processer. Resultaten varierar för olika typer av verk men gemensamt är att luftningen stod för mellan 50 och 70 % av energianvändningen. Kjellén & Andersson (2002) anger också att luftningens blåmaskiner ofta står för 50 - 70 % av den totala elanvändningen. Konventionella biosteg med aktivslamprocess brukar som riktvärde ha en specifik energianvändning på 0,2 - 0,4 kWh/m³ behandlat vatten (Huber Technology u.å; Fenu et al. 2010).

2.3.2 Tidigare energikartläggningar på Främby

Samarbetsorganisationen Dala-VA som samlar Dalarnas reningsverk och vattenverk har gjort flera energiinventeringar på sina anläggningar. I rapporten Energihushållning i VA-sektorn som gavs ut av Länsstyrelsen Dalarna år 2013 (Danielsson 2013) presenteras resultaten av en inventering som genomfördes år 2012. Främby reningsverk är tillsammans med Borlänge Energis reningsverk Dalarnas största, båda har en belastning på ungefär 50 000 pe. Resultaten visar att den specifika totala energianvändningen per pe och per behandlad volym vatten var lägre för stora reningsverk än för små. För reningsverk med minst 2 000 pe var medelenergianvändningen 120 kWh/pe och 80 kWh/100 m³ behandlat vatten. Den lägsta energianvändningen var 45 kWh/pe respektive 25 kWh/100 m³. I denna undersökning ingick dock belysning, ventilation och uppvärmning vilka tillsammans stod för ungefär 34 % av den totala energianvändningen för alla undersökta reningsverk. Främby var ett av de reningsverk i Dalarna som använde mest energi, men också ett av de största och därmed effektivaste. Vid den senaste energiinventeringen år 2016 var den totala energitillförseln på Främby 3,7 GWh, vilket var något högre än år 2011 och 2014. Av den tillförda energin på Främby var 2,7 GWh el. Den specifika energianvändningen var 87 kWh/pe eller 64 kWh/100 m³ behandlat avloppsvatten, att jämföra med 81 kWh/pe respektive 55 kWh/100 m³ för Borlänges reningsverk.

År 2017 utförde Dala-VA en grundligare utvärdering av biostegen på Dalarnas reningsverk. Elanvändningen för luftning och omrörning i Främby's biosteg var 16,5 kWh/100 m³ inkommande vatten. Totalt för biosteget var energianvändningen 20,4 kWh/100 m³. Energianvändningen på Borlänges reningsverk var 6,8 kWh/100 m³ inkommande vatten för luftning och 12,2 kWh/m³ för hela biosteget. Borlänges biosteg använder inga omrörare i luftningen men har däremot ett extra steg i form av in-pumpning av avloppsvatten. Resultaten från energiinventeringen år 2016 och utvärderingen av biosteg år 2017 är inte publicerade, men materialet har tillhandahållits av Dala-VA.

Några exempel på energieffektiviseringsåtgärder som genomförts tidigare på Främby ARV enligt intern dokumentation är byte till energieffektiva pumpar i slutsedimenteringen och ny styrning av pumparna i försedimenteringen (Falun Energi & Vatten 2015).

2.4 Biogas

2.4.1 Bildning av biogas

Biogas bildas när organiskt material bryts ner under syrefria (anaeroba) förhållanden (Energimyndigheten 2018b). Röttningsprocessen utförs av speciella metanbildande mikroorganismer och sker naturligt i syrefria miljöer såsom våtmarker (Bioenergiportalen 2014). Biogasen som bildas består i huvudsak av metan och koldioxid, där gasens energiinnehåll bestäms av metanhalten. Metanhalten för biogas producerad på reningsverk i Sverige år 2017 hade ett medelvärde på 62,2 %. Biogas innehåller även små mängder svavelväte och vattenånga (Energimyndigheten 2018b).

Vid biogasproduktion används olika typer av råvaror (substrat) såsom slam från reningsverk, matavfall, gödsel eller restprodukter från industrier och jordbruk (Energigas Sverige 2017). Processen sker i en rötchamber där mikroorganismerna bryter ner substraten under lång tid (Energimyndigheten 2018b). Biogas är ett förnybart bränsle eftersom det bildas genom nedbrytning av biomassa, vilket nybildas kontinuerligt. Ytterligare en fördel med biogas är att restprodukter kan användas som råvara (Energigas Sverige 2017).

Restprodukten från biogasproduktionen kallas rötrest och kan användas som gödsel på grund av sitt höga näringsinnehåll. Rötrestens innehåll beror på vilken typ av substrat som har rötats, vilket gör att rötslammet som bildas vid rötning av avloppsslam ofta innehåller giftiga ämnen som gör att det inte kan användas som gödselmedel (Schnürer & Jarvis 2009). En stor del av alla rötresten i Sverige används som gödningsmedel i jordbruk, men endast en knapp tredjedel av rötresten från avloppsreningsverk (Energimyndigheten 2018b). Andra användningsområden för rötresterna är förbränning och deponi (Bachmann 2015).

2.4.2 Biogas i Sverige

Flest biogasanläggningar i Sverige finns på avloppsreningsverk som tillsammans producerar drygt en tredjedel av all biogas. Mest biogas produceras dock i storskaliga samröttningsanläggningar där matavfall, slakteriavfall, gödsel och energigrödor rötas. På grund av att substraten på dessa anläggningar är torrare och mer energirika än på exempelvis reningsverk blir biogasutbytet högre (Energimyndigheten 2018b). På reningsverk är ett av syftena med rötningen att stabilisera slammet, det vill säga minska den biologiska aktiviteten och få bort smittämnen. Ett annat resultat av rötningen är att mängden torrsustans minskar samt att slammet blir lättare att avvattna. På så vis kan slamvolymen reduceras mycket, vilket är fördelaktigt inför vidare hantering av slammet (Bachmann 2015).

3 Teori

3.1 Energibegrepp

3.1.1 Energi

För elektriska maskiner är energianvändningen E i Wh för en viss tidsperiod en funktion av maskinens aktiva effekt P i W och drifttid t i timmar enligt (1.). Formeln gäller även vid energiproduktion där P motsvarar effekten och E är den producerade energin.

$$E = P * t \quad (1.)$$

3.1.2 Effekt

Effekten för en fas på en trefasansluten motor beror av fasspänningen V_f i V (230 V på det svenska elnätet) och strömmen I i A enligt (2.) (Nordling & Österman 2006).

$$S = I * V_f \quad (2.)$$

S uttryckt i VA är den skenbara effekten som består av aktiv effekt P i enheten W och reaktiv effekt Q i enheten var. Förhållandet mellan aktiv och reaktiv effekt hos en motor anges av effektfaktorn $\cos \varphi$, där vinkeln φ är fasförskjutningen mellan strömmen och spänningen (Neuman 2013). Om $\varphi = 0$ är strömmen och spänningen i fas, $\cos \varphi = 1$ och motorn använder endast aktiv effekt. Den aktiva effekten är den effekt som energibolagen tar betalt för och som är angiven som märkeffekt på elektriska motorer och apparater. Eftersom elmotorer också förbrukar reaktiv effekt har de effektfaktorer som är mindre än 1 (Ma & Bai 2018). I detta projekt undersöktes endast den aktiva effekten P som kan beräknas med (3.) (Nordling & Österman 2006).

$$P = I * V_f * \cos \varphi \quad (3.)$$

För trefasanslutna motorer blir effekten tredubbel och spänningen är huvudspänning V_h i V (normalt 400 V). Sambandet mellan V_f och V_h beskrivs av (4.) (Neuman 2013). Den totala aktiva effekten för trefasanslutna maskiner kan därför beräknas med (5.) (Panepinto et al. 2016). Ekvationen gäller om elmotorn är symmetrisk, det vill säga om alla tre faser drar samma ström och därmed förbrukar samma effekt, vilket är fallet för en motor som fungerar som den ska.

$$V_f = \frac{V_h}{\sqrt{3}} \quad (4.)$$

$$P = 3 * I * \frac{V_h}{\sqrt{3}} * \cos \varphi = \sqrt{3} * I * V_h * \cos \varphi \quad (5.)$$

3.1.3 Energineutralitet

Avloppsvatten innehåller energi i olika former som förändras under reningsprocessen. Det innehåller kemisk energi i organiska molekyler som finns i vattnet, termisk energi beroende på vattnets temperatur och hydrodynamisk energi när vattnet är i rörelse. Trots att avloppsvattnet i sig innehåller mycket energi är den mesta energin lågkvalitativ och svår att utvinna (Maktabifard, Zabrowska & Makinia 2018).

Enligt energiprincipen som säger att energi inte kan skapas eller förintas utan endast omvandlas mellan olika former är energin för ett slutet system utan in- eller utflöden konstant (Nationalencyklopedin u.å.a). Energibalansen för ett system i form av ett reningsverk bestäms därför av energiinnehållet i flödena in och ut från reningsverket. I begreppet energineutralitet ingår dock bara högkvalitativa energiformer såsom el, värme och bränslen (Maktabifard, Zabrowska & Makinia 2018). För att energineutralitet ska uppnås krävs därför att energin som finns i olika former på reningsverket tas till vara och omvandlas till nyttiga energiformer. Ett reningsverk sägs vara energineutralt när det kan tillgodose sina egna behov av högvärdig energi (Granmar 2017). Detta innebär antingen att utflödet av högvärdig energi är minst lika stort som inflödet, eller att flöden av högvärdig energi endast sker internt på reningsverket. De huvudsakliga flödena på Främbyverket och systemets in- och utflöden kan ses i *Figur 2*.

3.2 Energianvändning och energieffektivisering på reningsverk

3.2.1 Uppvärmning

Värmebehovet på reningsverk består av uppvärmning av lokaler och uppvärmning av röt-kammare och slam vid rötning. Värmebehovet är ofta mindre än elbehovet och värmen produceras i många fall internt, varför värmeanvändningen är mindre intressant för energieffektivisering. En möjlig värmebesparande åtgärd är att förbättra isoleringen av röt-kammaren (Kjellén & Andersson 2002).

3.2.2 Elanvändning i elmotorer

Elanvändningen på reningsverk utgörs i huvudsak av elmotorer som används för att driva den utrustning som används i reningsprocesserna (Kjellén & Andersson 2002). De motorer som dominerar för industriella tillämpningar är trefasanslutna så kallade asynkronmotorer eller induktionsmotorer, vilka konsumerar både reaktiv och aktiv effekt (Ma & Bai 2018; Thumann & Dunning 2010). Vid lägre belastning drar motorn mindre aktiv effekt, medan behovet av reaktiv effekt är nästan konstant (Thumann & Dunning 2010) vilket gör att effektfaktorn som beskriver förhållandet mellan aktiv och reaktiv effekt varierar med motorns belastning.

Den elektriska effekten som motorn drar från elnätet är något större än den mekaniska effekten som motorn levererar till den roterande axeln, på grund av förluster i motorn. Hur stora förlusterna är beskrivs av motorns verkningsgrad. Verkningsgraden är kvoten av levererad mekanisk effekt och inkommande elektrisk effekt. Verkningsgraden hos en elmotor är som högst vid märkdriftpunkten och försämras drastiskt när belastningen är mindre än 40 %. Märkeffekten som finns angiven på motorns märkplåt är den effekt som levereras av motorn till axeln vid full last, det vill säga vid märkdriftpunkten (Thumann & Dunning 2010).

Energianvändningen hos motorn beror på hur belastad den är. En olastad motor roterar med ett varvantal som är synkront med nätets frekvens (Neuman 2013). När belastningen ökar minskar varvtalet något (Ma & Bai 2018), samtidigt som motorn måste leverera ett större vridmoment för att möta den ökande belastningen på axeln (Neuman 2013). Vridmomentet som levereras av motorn beror av effekten som levereras av motorn och därmed också av effekten som dras från nätet (Ma & Bai 2018). Genom att ansluta motorn till nätet via en frekvensomformare kan motorns varvantal varieras för att bättre passa den aktuella belastningen. Frekvensomformare medför dock en energiförlust på några procent av motorns effekt (Kjellén & Andersson 2002). I fall där varvtalsstyrning inte behövs för pumpar kan onödiga frekvensomformare också ge driftpunkter med lägre verkningsgrader (Lingsten 2014).

3.2.3 Övrig energianvändning

Utöver den energi som används i reningsverkets processer och som har undersökts i detta projekt finns ytterligare energianvändning i samband med avloppsrening. Exempelvis utgör pumpning av avloppsvatten till reningsverket som sker vid pumpstationer ute i avlopps nätet en betydande del av den totala energianvändningen (Olsson 2008). På avloppsreningsverk finns dessutom lokaler som hör till anläggningen som kräver uppvärmning, ventilation och belysning (Kjellén & Andersson 2002). Andra flöden till och från reningsverket sker ofta med transporter som använder bränsleenergi. De kemikalier som används i reningsprocessen kräver exempelvis energi vid tillverkning och transport (Olsson 2008).

3.2.4 Energieffektivisering

Energieffektivisering kan ske på flera olika sätt, bland annat genom att minska behovet av nyttigt arbete (Kjellén & Andersson 2002). Energin som tillförs reningsverk används för att driva olika processer på reningsverket, det vill säga utföra nyttigt arbete. Behovet av nyttigt arbete kan dock minskas genom effektivisering av processerna, till exempel genom att se till att slam är förtjockat innan det pumpas för att på så vis undvika att vatten pumpas i onödan. Detta innebär att genom att öka energianvändningen i en process (slamförtjockning) kan energi sparas på andra håll (slampumpning). Slammets TS-halt är avgörande för behovet av elenergi för pumpning och uppvärmningsbehovet i rökammaren (Kjellén & Andersson 2002).

En annan metod för energieffektivisering är att utföra ett visst nyttigt arbete så energieffektivt som möjligt. Effektiviteten påverkas både av vilken maskin som används och av styrning och drift av maskinen. För att energieffektiviseringsåtgärder ska ge så stora energibesparingar som möjligt bör de utföras på de maskiner som använder mest energi (Kjellén & Andersson 2002). Åtgärder som rör drift och styrning kan dock ofta vara enkla och billiga att utföra och därför intressanta att genomföra även på maskiner utan betydande energianvändning. För att energieffektiviseringsåtgärder ska kunna genomföras krävs att de är ekonomiskt möjliga och att kraven på det utgående vattnets renhet fortfarande kan

uppnås (Maktabifard, Zabrowska & Makinia 2018). Om målet är att minska reningsverkets klimatpåverkan eller ekologiska fotavtryck finns det fler möjliga åtgärder än energieffektivisering. Användning av andra resurser samt utsläpp till vatten och luft bidrar också till miljö- och klimatpåverkan (Lingsten 2014).

3.2.5 Effektstyrning

Elkostnaderna på ett reningsverk påverkas inte bara av hur mycket energi som används utan även av det maximala effektuttaget eftersom det avgör vilken överföringskapacitet eldistributionsnätet måste ha och därmed vilken huvudsäkringsnivå reningsverkets elabonnemang måste ha. En jämnare energi-användning med lägre effekttoppar kan därför innebära att ett billigare elabonnemang är möjligt (Olsson 2008). Styrsystem kan användas för att stänga av vissa processer såsom luftning och omrörning under kortare perioder för att undvika effekttoppar (Olsson 2008). Processer vars drift lätt kan förläggas till en annan tid kan också utnyttjas för effektstyrning, exempelvis uttag ur sandfång, slamcentrifugering och renspolning av filter (Kjellén & Andersson 2002).

En annan möjlighet med effektstyrning är så kallad efterfrågeflexibilitet, där elanvändare aktivt styr sin elanvändning utifrån elproduktionens och elnätets aktuella kapaciteter (Energimarknadsinspektionen 2017). Efterfrågeflexibilitet kan komma att bli en viktig del i framtidens elnät som står inför utmaningar såsom större andel intermittent förnybar elproduktion, ökad risk för effektbrist, ökad belastning på lokala elnät och problem med frekvenshållningen. För att efterfrågeflexibilitet ska kunna implementeras storskaligt krävs dock tekniska lösningar och bättre mätning. Ur elanvändarens perspektiv behövs ekonomiska incitament såsom tidsvarierande elhandelspriser eller ekonomisk kompensation för den som förändrar sin elanvändning under en viss period (Alvehag et al. 2016). Eftersom reningsverk är både stora användare och producenter av energi kan de ha en viktig roll i ett framtida hållbart energisystem (Bachmann 2015), bland annat genom att bidra med efterfrågeflexibilitet i elsystemet.

3.3 Energianvändande processer och effektiviseringspotential

3.3.1 Pumpning

Pumpning används i många av reningsverkets processer, framför allt för att transportera avloppsvatten och slam. Det finns två huvudtyper av pumpar: förträngningspumpar och turbopumpar. Förträngningspumpar har tvingat flöde, vilket innebär att lika stor volym pumpas varje varv oavsett mottryck. Några exempel på förträngningspumpar är excenterskrupumpar och dränkpumpar, vilka ofta används på reningsverk, och kolvpumpar (Olsson 2008). Turbopumpar har icke tvingat flöde, vilket innebär att flödet kan varieras. Centrifugalpumpar är en typ av turbopumpar (Olsson 2008). De är mycket vanliga på reningsverk och kan anpassas efter olika förhållanden med olika typer av löphjul, vilket också ger varierande verkningsgrad. Ofta används så kallade friströmshjul eftersom de kan pumpa inhomogena flöden utan att riskera att sättas igen, trots att verkningsgraden för dessa pumpar är låg (Kjellén & Andersson 2002). Skrupumpar är en annan typ av pumpar som är vanliga på reningsverk eftersom de inte är känsliga för grovt material och kan ha bra verkningsgrad. Mammutpumpar kan användas för att lyfta grovt material såsom grus och sand vid inloppet till reningsverket. De drivs av tryckluft och verkningsgraden är låg (Kjellén & Andersson 2002).

Varje pump har en specifik pumpkurva som beskriver förhållandet mellan pumptrycket och flödet och 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 motorn 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.

Det pumpade flödet är proportionellt mot pumpens varvtal. Effektbehovet för pumpen beror däremot på varvtalet i kubik. Om pumpens varvtal sänks, till exempel med en frekvensomformare, kommer längre tid krävas för att pumpa en viss volym. Effekten kommer dock sänkas mer än flödet i förhållande till varvtalet vilket gör att energianvändningen i slutändan blir mindre, trots den längre drifttiden. Om två pumpar används parallellt kan det därför vara energibesparande att köra båda pumparna på samma lägre varvtal än att bara köra den ena pumpen på fullt varvtal och låta den andra vara avstängd (Olsson 2008). Två parallella lika stora pumpar som körs omväxlande ger hög driftsäkerhet eftersom en pump klarar hela belastningen själv om den andra går sönder. Energimässigt är det dock bättre att ha en mindre pump som är dimensionerad för normala flöden och komplettera den med en större pump som kan användas vid större flöden (Lingsten 2014).

3.3.2 Omrörning

Omrörning behövs i exempelvis luftningsbassänger och rökammare för att förhindra sedimentering (Olsson 2008). Omrörningen kan utföras med hjälp av omrörare, pumpar eller blåsmaskiner (Kjellén & Andersson 2002). Energianvändningen för omrörare kan påverkas genom att ändra omrörarens varvtal eller genom att byta från kontinuerlig till intermitterande drift. För effektiv omrörning bör omröraren också placeras rätt och anpassas efter bassänggeometrin (Kjellén & Andersson 2002).

3.3.3 Luftning

Syftet med luftningen i den biologiska reningens aktivslamprocess är att tillföra syre till nedbrytningsprocessen och att hålla biomassan suspenderad. Effektiviteten hos luftningen bestäms av hur väl syre överförs till vattnet och kan mätas som tillfört syre per energienhet (Svenskt Vatten 2007). Förutom bra inblåsning av luftbubblor måste bra luftsystem möjliggöra effektiv övergång av det gasformiga syret till löst syre (Olsson 2008). Små luftbubblor har större kontaktyta med vattnet per volymenhet och ger därför effektivare syreöverföring (Svenskt Vatten 2007).

Mikroorganismerna i aktivslamprocessen är beroende av löst syre och deras tillväxthastighet bestäms av syrekoncentrationen. Hur mycket syre som behövs varierar för olika mikroorganismer och förhållandet mellan syrehalt och tillväxthastighet är inte linjärt. Vid låga syrehalter ger små öknings i syrehalt stora förbättringar i tillväxthastighet, men när koncentration av löst syre uppnår en viss nivå förblir tillväxthastigheten konstant (Olsson 2008). Om koncentrationen löst syre överstiger den som är optimal för mikroorganismernas nedbrytning sker därför ingen förbättring av processen. Detta innebär att kontrollsystem behövs för att optimera luftningens energianvändning och undvika syreöverflöd (Jenkins & Wanner 2014).

Syrebehovet beror av BOD₇-belastningen i biosteget, det vill säga hur mycket organiskt material vattnet innehåller (Svenskt Vatten 2007). Det är vanligt att det önskade värdet på syrehalten sätts

onödigt högt, vilket ger en större elanvändning än nödvändigt. Som riktvärde används ofta max 2 mg syre per liter vatten (Kjellén & Andersson 2002). Styrningen av blåsmaskinerna i luftningsprocessen har en avgörande roll för energieffektiviteten. On/off-styrning innebär att mätningar av syrehalten används för att starta och stoppa vissa blåsmaskiner för att hålla syrenivån inom ett önskat intervall. Ett bättre alternativ som ger en jämnare syrenivå och minskat slitage på blåsmaskinerna är varvtalsstyrning med hjälp av reglersystem och regulatorer (Olsson 2008).

Luftare kan delas upp i tryckluftare som är nedsänkta i bassängerna och mekaniska ytluftare (Jenkins & Wanner 2014). Verkningsgraden är sämre hos ytluftarsystem än hos finluftarsystem (Olsson 2008). Bottenluftarsystem med fina bubblor är vanligast på nya anläggningar på grund av deras effektivitet (Jenkins & Wanner 2014). Kombinerade system består av blåsmaskiner som ger grova bubblor som sedan finfördelas och sprids av omrörare (Olsson 2008). Omrörare kan också användas som komplement till ytluftare för att hålla biomassan suspenderad i vattnet. Vid låg belastning kan luftningen vara så låg att omrörningen blir otillräcklig och då är separata omrörare en fördel (Kjellén & Andersson 2002).

3.3.4 Biologisk rening med MBR

Biologisk rening med membranbioreaktorer (MBR) innebär att sedimenteringsbassänger och eventuella sandfilter i den konventionella aktivslamprocessen ersätts av membranfilter (Ladewig & Al-Shaeli 2017). Omsättningen av organiska partiklar sker precis som vid konventionell rening i luftningsbassänger med aktivslamprocess, men avskiljningen av slam från vatten sker med membran (Huber Technology u.å.). Membranfiltrering är en mekanisk avskiljningsprocess där tunna selektiva barriärer (membran) skiljer olika faser från varandra. Membranen släpper igenom vissa ämnen men är ogenomträngliga för andra (Ladewig & Al-Shaeli 2017). Hur genomsläppligt membranet är beror på porstorleken, vilken också används för att klassificera filtren (Judd & Judd 2011). För avloppsrening med MBR används ofta ultrafilter eller mikrofilter. Membranen kan också vara utformade på olika sätt, där hollow fiber (HF) och flat sheet (FS) är de vanligaste membrantyperna som används i MBR (Ladewig & Al-Shaeli 2017).

MBR-tekniken används främst för att rena biologiska ämnen och kväve, men har potential att rena även andra typer av föroreningar såsom bakterier och mikroförroreningar (Ladewig & Al-Shaeli 2017; Baresel et al. 2017). En annan fördel med MBR-anläggningar är att de är platseffektiva, vilket ofta är av betydelse då många reningsverk är lokaliserade i tätbefolkade områden (Baresel et al. 2017). Tidiga hinder för MBR-tekniken var att membranen var dyra och att filtrens livslängd förkortades av igensättning (eng. fouling) (Ladewig & Al-Shaeli 2017). Idag fokuserar utvecklingen av MBR på igensättning av membran och energianvändning, vilka båda har stor påverkan på kostnaderna (Krzeminski et al. 2017).

Igensättning av membran innebär önskad deposition av partiklar och olika ämnen på membranytan och inuti porerna (Ladewig & Al-Shaeli 2017). Igensättning påverkas av avloppsvattnets och biomassans egenskaper, membranmaterial, modulernas utformning samt driftsätt. Vid igensättning försämras separationsprocessen och membranen måste rengöras eller bytas ut ofta, vilket medför höga kostnader (Le-Clech, Chen & Fane 2006). Förebyggande underhåll leder också till stor energianvändning, främst i samband med luftning (Krzeminski et al. 2017). Igensättning kan kontrolleras och förhindras genom olika metoder av mekanisk och kemisk rengöring. Grovbubblig luftning från botten av membranen används för att begränsa påväxten på membranytan. Vid backspolning leds det filtrerade flödet tillbaka genom membranet för att avlägsna partiklar från membranytan (Krzeminski et al. 2017).

Genom viloperioder pausas processen tillfälligt så att trycket mot membranerna lättar vilket gör att påväxten faller av (Le-Clech, Chen & Fane 2006). Både backspolning och viloperioder kan integreras i den normala driften (Krzeminski et al. 2017). Med tiden bildas irreversibel igensättning som inte påverkas av den mekaniska reningen (Le-Clech, Chen & Fane 2006). Membranerna måste också regelbundet rengöras med kemikalier, vilket på sikt reducerar deras livslängd (Krzeminski et al. 2017).

Den hydrauliska belastningen är en viktig faktor som påverkar energianvändningen för MBR och därför bör flödet anpassas så att membranerna utnyttjas optimalt. Flödet ska vara konstant och så nära det dimensionerade flödet som möjligt för minskad igensättning och ökad energieffektivitet (Krzeminski et al. 2017). Därför är det önskvärt om flöden kan kontrolleras och jämnas ut, exempelvis genom användning av flera parallella linjer och avstängning av moduler (IVL Svenska Miljöinstitutet u.å.; Krzeminski et al. 2017). Den specifika energianvändningen ökar nästan linjärt när den hydrauliska belastningen understiger det optimala flödet (Gabarrón et al. 2014). Flöden som överskrider det kritiska flödet kan göra att igensättning ökar eller att membranerna täpps igen (Krzeminski et al. 2017).

Luftningen har också stor betydelse för energianvändningen och genom att variera driften med avseende på intensitet och varaktighet kan luftningen effektiviseras. Målet med anpassad luftning är att minska luftbehovet utan att påverka kvaliteten på det filtrerade vattnet eller möjligheterna att minska igensättning. För att undvika att luftningen är överdimensionerad vid låga flöden bör luftningen styras efter flödet. Några åtgärder som kan förbättra energieffektiviteten är intermittent luftning med on/off-styrning eller frekvensstyrning av luftarna (Krzeminski et al. 2017). Energinvändningen kan också reduceras genom optimering av andra delar av rengöringen (Krzeminski et al. 2017). Viloperioderna kan anpassas genom att variera deras längd och frekvens, backspolning kan anpassas genom flöde, frekvens och längd på spolningsperioderna och kemisk rengöring kan optimeras genom val av kemikalier och tider för rengöring (IVL Svenska Miljöinstitutet u.å.). Ibland kan dock möjligheter till driftvariationer begränsas av membrantillverkarna (Krzeminski et al. 2017).

Förutom luftning för att förhindra igensättning på membranytan används luftning i MBR för att syresätta luftningsbassänger och förhindra att biomassan sedimenterar (Le-Clech, Chen & Fane 2006). I storskaliga MBR-anläggningar utgör luftning mellan 50 och 80 % av den totala energianvändningen (Wang et al. 2013). Gabarrón et al. (2014) hänvisar till en källa som anger att luftningen för membran och luftningen i biobassängerna utgör 60 - 80 % av energianvändningen i biosteget och en annan källa som anger minst 50 % för total luftning och minst 35 % för membranluftning.

Energianvändningen för dagens MBR är typiskt mindre än 1 kWh/m³ behandlat vatten enligt Ladewig & Al-Shaeli (2017). Detta bekräftas av Le-Clech, Chen & Fane (2006) som konstaterar att dagens energibehov på mindre än 1 kWh/m³ är betydligt lägre än 1,9 kWh/m³ och 2,5 kWh/m³ som uppmättes år 2001 respektive 1999. IVL som bedriver forskning på MBR i Sverige hävdar att optimala processer kan nå 0,5 kWh/m³, varav 30 - 50 % är luftning för att rengöra membranerna (IVL Svenska Miljöinstitutet u.å.). Membrantillverkaren Huber anger en total energianvändning på 0,7 - 1,5 kWh/m³ för MBR-processer (Huber Technology u.å.).

Fenu et al. (2010) undersökte energianvändningen på en MBR-anläggning i Belgien och uppmätte 0,64 kWh/m³ utflöde, vilket konstateras vara högt jämfört med konventionell aktivslamprocess med typvärde 0,3 kWh/m³. I samma rapport hänvisas till en studie från Nederländerna där en fullskala-MBR med FS-moduler uppvisade en energianvändning på mellan 0,8 och 1,2 kWh/m³ utflöde. På demonstrationsanläggningen Vasserveld i Nederländerna har en specifik energianvändning på mindre än 0,65 kWh/m³ uppmätts vid torrt väder och mindre än 0,45 kWh/m³ vid maximala flöden (Judd &

Judd 2011). Dessa resultat bekräftar att den hydrauliska belastningen är avgörande för energianvändningen.

Krzeminski et al. (2017) har sammanställt resultaten från flera studier som har undersökt den specifika energianvändningen i kWh/m³ behandlat vatten för storskaliga MBR-anläggningar inom kommunal avloppsvattenrening. Resultaten varierade mellan 0,8 och 2,4 kWh/m³ i en studie av reningsverk i Frankrike från 2013, 0,8 - 3,0 kWh/m³ i en studie av reningsverk i Japan från 2014, 0,4 - 0,6 kWh/m³ i en studie av reningsverk i Kina från 2014, 0,8 - 1,1 kWh/m³ i en studie av reningsverk i Nederländerna från 2012 och 0,7 - 1,8 kWh/m³ i en studie av reningsverk i Tyskland från 2010. En studie på en fullskaleanläggning med HF-membran i Singapore från 2012 visade hur den specifika energianvändningen minskade från 0,8 till 0,37 kWh/m³ genom olika energieffektiviseringsåtgärder såsom anpassade flöden och reglerad luftning (Krzeminski et al. 2017).

I en studie av fullskaliga MBR-anläggningar på spanska reningsverk visade Gabarrón et al. (2014) att energianvändningen i genomsnitt minskade från 1,12 - 0,71 kWh/m³ för anläggningar med FS-membran och från 1,54 - 1,12 kWh/m³ för anläggningar med HF-membran genom implementering av olika energieffektiviseringsåtgärder, såsom kontrollerad luftning för både biobassänger och membranrengöring. Detta resultat går emot att HF-membran generellt är mer energieffektiva än FS-membran på grund av lägre luftningsbehov (IVL Svenska Miljöinstitutet u.å.). Gabarrón et al. (2014) hänvisar också till samma studie av reningsverk i Nederländerna från 2012 som Krzeminski et al. (2017) och anger att energianvändningen på MBR-anläggningar som kördes vid optimala förhållanden och flöden nära de dimensionerade var 0,7 - 0,8 kWh/m³ för både HF- och FS-membran. I studien av reningsverk i Frankrike som också refereras av Krzeminski et al. (2017) från 2013 uppnåddes en specifik energianvändning på mellan 0,5 och 0,7 kWh/m³ på energioptimerade anläggningar, varav 0,45 - 0,55 kWh/m³ var luftning av FS-membran (Gabarrón et al. 2014). Krzeminski et al. (2017) framhåller att studier har visat att energianvändningen kan nå 0,4 - 0,5 kWh/m³ genom energieffektiviseringsåtgärder, men att få försök har uppvisat resultat på under 0,4 kWh/m³. Detta bekräftas av Judd & Judd (2011) som anger att 0,4 kWh/m³ som uppnåtts på en optimerad anläggning är bland de lägsta värdena för energianvändning.

Mycket forskning inom MBR handlar idag om att minska energianvändningen för MBR. Det finns potential att minska energianvändningen genom nya modulkonfigurationer och kontrollsystem samt nya mindre energikrävande rengöringsmetoder. Några metoder som är under utveckling är mekanisk rengöring med granulat, membranvibration och elektriska fält. Dessutom förväntas nyutvecklade luftningsstrategier och styr- och reglerprocesser snart bli kommersiellt tillgängliga (Krzeminski et al. 2017).

3.4 Biogasproduktion

3.4.1 Processparametrar

De mikroorganismer som är verksamma i en rötningsprocess är mycket känsliga och kräver speciella förhållanden. Temperatur, pH och syrehalt är exempel på viktiga parametrar som är avgörande för hur väl rötningsprocessen fungerar (Schnürer & Jarvis 2009). Vanligen är rötningsprocessen antingen mesofil (37 °C) eller termofil (50 - 55 °C), pH ska vara neutralt och miljön ska vara syrefri (Energimyndigheten 2018b, Bioenergiportalen 2012d). Vid rötning av avloppsslam är det vanligast att mesofil rötning med en temperatur på 35 - 39 °C tillämpas (Bachmann 2015).

Ett substrat består av vatten och torrsustans (TS) (Carlsson & Uldal 2009). TS kan i sin tur delas upp i glödförlust (GF) och glödrest, där GF är substratets förbränningsbara substans. GF relaterar till substratets innehåll av organiskt material och är den del av substratet som kan omvandlas till biogas. För att utnyttja rötkammarvolymen maximalt bör substratet därför ha högt GF-innehåll. Hög TS-halt kan ge problem med pumpning av substratet medan låg TS-halt gör att mer energi krävs för uppvärmning av substratet (Carlsson & Uldal 2009; Bachmann 2015). Om substratets densitet är 1 ton/m³ är volymen i m³ lika med massan i ton. Massan TS m_{TS} och GF m_{GF} kan då beräknas utifrån våtvikten m_v och TS- och GF-halten i procent h_{TS} och h_{GF} med (6.) respektive (7.) nedan.

$$m_{TS} = m_v * \frac{h_{TS}}{100} \quad (6.)$$

$$m_{GF} = m_{TS} * \frac{h_{GF}}{100} \quad (7.)$$

Hydraulisk uppehållstid beskriver hur länge substratet stannar i rötkammaren eller hur lång tid det tar att byta ut allt substrat i rötkammaren (Schnürer & Jarvis 2009). Eftersom rötkammarens volym är konstant varierar uppehållstiden med inflödet av substrat. Om tillförseln av substrat är lägre än det dimensionerade flödet blir uppehållstiden större än dimensionerat. Uppehållstiden är ofta mellan 16 och 25 dagar vid rötning av avloppsslam (Bachmann 2015). Vilken uppehållstid som är optimal beror bland annat på temperaturen och substratets sammansättning. Svårnedbrytbara substrat kräver längre uppehållstid. Eftersom de metanbildande mikroorganismerna ofta har en fördubblingstid på upp till 12 dagar bör uppehållstiden i regel vara längre än så (Schnürer & Jarvis 2009). Den hydrauliska uppehållstiden T i dagar kan beräknas med rötkammarens volym V_{RK} i m³ och inflödet av substrat Q_{in} i m³/dag enligt (8.).

$$T = \frac{V_{RK}}{Q_{in}} \quad (8.)$$

Organisk belastning är ett mått på hur mycket nytt organiskt material som tillförs rötkammaren i förhållande till rötkammarens volym. Den organiska belastningen bör anpassas efter hur stor mängd mikroorganismer som finns i processen och kan därför vara låg vid uppstarten av en ny process. För en ny process kan den organiska belastningen vara så låg som 0,5 kg GF per m³ och dag och sedan ökas succesivt till 2 - 3 kg GF per m³ och dag som är normalt för en mesofil process. Den organiska belastningen bör hållas konstant över tid (Schnürer & Jarvis 2009). Organisk belastning måste optimeras tillsammans med hydraulisk uppehållstid eftersom hög organisk belastning ofta kräver längre uppehållstid för att en tillfredsställande nedbrytningsgrad ska kunna uppnås. Organisk belastning B i kg/m³,d kan beräknas med rötkammarens volym V_{RK} i m³ och massflödet av GF $Q_{GF, in}$ i kg/d enligt (9.).

$$B = \frac{Q_{GF, in}}{V_{RK}} \quad (9.)$$

Nedbrytningsgrad eller utröttningsgrad anger hur stor del av det organiska materialet i substratet som brutits ner och omvandlats till biogas efter en viss tid. Längre uppehållstid leder ofta till att mer metan kan bildas av substratet. I en väl fungerande process är nedbrytningsgraden mellan 50 och 70 % (Schnürer & Jarvis 2009). Nedbrytningsgraden för slam är vanligtvis 45 – 55 % (Bachmann 2015). Enligt Wan et al. (2011) kan den vara så låg som 30 – 45 % men öka om den organiska belastningen är låg. Nedbrytningsgraden α i procent kan beräknas enligt (10.) med massflödet in, $Q_{GF, in}$ och massflödet

ut, $Q_{GF,ut}$ av GF i kg/d, under förutsättning att volymflödet genom röt-kammaren är kontinuerligt (Svenskt Vatten 2013).

$$\alpha = \frac{Q_{GF,in} - Q_{GF,ut}}{Q_{GF,in}} * 100 \quad (10.)$$

3.4.2 Biogasutbyte

Hur mycket biogas som kan produceras varierar mellan olika substrat. Det teoretiska biogasutbytet bestäms av innehållet av fett, kolhydrater och protein i det organiska materialet. Hur mycket biogas som faktiskt produceras påverkas också av yttre faktorer såsom uppehållstid, omrörning och tillgång till näringsämnen. Lång uppehållstid leder till större nedbrytningsgrad och högre metanhalt i biogasen (Carlsson & Uldal 2009). Metanhalten i den biogas som bildas bestäms också av substratens innehåll. Exempelvis ger fett både mer gas och gas med högre metanhalt än kolhydrater (Schnürer & Jarvis 2009). Biogasen som bildas vid nedbrytning av slam har vanligtvis ett metaninnehåll på 63 – 67 % (Bachmann 2015).

Metanproduktionen är som störst de allra första dagarna och avtar sedan (Rodriguez 2011). Davidsson et al. (2008) fann att ungefär 90 % av metanet bildades de första 14 dagarna vid samrötning av fett och slam. Nedbrytningshastigheten varierar också för olika substrat, fett bryts exempelvis ner snabbare än slam (Carlsson & Uldal 2009; Yalcinkaya & Malina 2015b). Genom samrötning av olika typer av substrat kan biogasproduktionen förbättras (Carlsson & Uldal 2009).

Primärslam som tas ut i försedimenteringen på reningsverk har ett högt innehåll av organiskt material och bryts lätt ner (Bachmann 2015). Bioslam har däremot lägre nedbrytbarhet eftersom det redan brutits ner i tidigare reningssteg (Carlsson & Uldal 2009). Biogasutbytet är därför större för primärslam än för bioslam (Bachmann 2015). Biogasutbytet från avloppsslam brukar vara 450 – 500 Nm³/ton GF, men beror bland annat på slammets sammansättning av primärslam och bioslam. Under optimala förhållanden kan primärslam ge 315 - 400 Nm³ metan/ton GF, medan bioslam kan ge 190 - 240 Nm³ metan/ton GF (Bachmann 2015). Enligt Wan et al. (2011) har avloppsslam en teoretisk metanpotential på 300 - 400 Nm³/ton GF, medan flera studier har resulterat i faktiska metanutbyten på 250 - 280 Nm³/ton GF. Rodriguez (2011) undersökte metanpotentialen hos slam från Hammarby Sjöstadsvärk och Henriksdals reningsverk i Stockholm och kom fram till att metanutbytet var mellan 290 och 330 Nm³ metan/ton GF.

Davidsson et al. (2008) samrötade avloppsslam och fett från fettfällor i pilotskaleförsök och visade hur metanutbytet ökade från 276 Nm³/ton GF för bara slam till 295 Nm³/ton vid 5 % fett och 360 Nm³/ton vid 10 % fett. De konstaterar att samrötningen förbättrade metanpotentialen och metanutbytet och att fettet inte bidrog mycket till rötslamproduktionen på grund av dess höga GF-halt. Andra studier har uppvisat liknande resultat (Wan et al. 2011).

Yalcinkaya & Malina (2015b) mätte metanutbytet från fett från fettfällor och slam från kommunalt avloppsvatten i en experimentell mesofil rötningsprocess och fann att oavvattnat fett hade en metanpotential på 606 m³/ton GF och slam hade en metanpotential på 223 m³/ton GF. I en annan studie undersökte de hur metanutbytet ökade med andelen fett i substratet, från 384 m³/ton GF för bara avloppsslam till 536 m³/ton GF och 641 m³/ton GF vid 25 respektive 46 % fett i substratmixen (Yalcinkaya & Malina 2015a). Försöken utfördes i reaktorer i labbskala under mesofila förhållanden.

Fettavskiljarslam har en metanpotential på 682 Nm³/ton GF (Carlsson & Uldal 2009). Davidsson et al. (2008) anger att fett har en teoretisk metanpotential på 1 014 Nm³/ton GF. Rötning av fett kan leda

till att fettsyror bildas i röt-kammaren vilket kan orsaka problem i processen (Wan et al. 2011). Exempelvis misslyckades försöken med samrötning utförd av Yalcinkaya & Malina (2015a) när andelen fett var 70 %.

3.4.3 Användningsområden för biogas

Värmevärdet för metan är ungefär 10 kWh/Nm³, vilket innebär att energiinnehållet per Nm³ biogas med en metanhalt på 65 % är 6,5 kWh (Svenskt Gastekniskt Center 2012). Energin i biogasen kan utvinnas som el och värme eller bara värme eller användas som fordonsbränsle (Svensson 2017). En liten del av biogasen som produceras i Sverige används också inom industrin som råvara eller energikälla (Energigas Sverige 2017). Ett mindre önskvärt alternativ är fackling, vilket innebär att biogasen förbränns utan att energin tas till vara (Bioenergiportalen 2012a). När gasen förbränns omvandlas den till koldioxid och vatten (Energimyndigheten 2018b). Syftet med förbränningen är att minska växthusgasutsläppen då metan har 25 gånger högre uppvärmningspotential än koldioxid (Naturvårdsverket u.å.). Fackling sker vanligen under kortare perioder för att förhindra metanutsläpp vid driftproblem på biogasanläggningar (Energimyndigheten 2018b).

Vilket användningsområde som passar bäst för biogasen beror bland annat på anläggningens storlek, det vill säga hur stor biogasproduktionen är. Kraftvärmeproduktion rekommenderas för alla biogasanläggningar, framför allt då det finns möjligheter att använda värmen på plats eller att skicka in den på fjärrvärmenätet. Teknikerna för uppgradering till fordonsgas som finns idag lämpar sig för anläggningar med en biogasproduktion på minst 100 Nm³ i timmen (Bachmann 2015). Produktion av enbart värme med gaspanna rekommenderas inte i en teknisk broschyr utgiven av IEA Bioenergy (Bachmann 2015).

Värme

Värmeproduktion med biogas är en enkel metod som fungerar även för gas med lågt metaninnehåll (Bioenergiportalen 2012e). Gasen förbränns i en panna med en speciell typ av brännare och värmer vatten i ett värmesystem (Svenskt Gastekniskt Center 2012). Innan förbränning måste dock vattenånga avlägsnas från gasen. Ofta används värmen för uppvärmning av röt-kammare och närliggande lokaler. Det är fördelaktigt om värmepannan är kopplad till fjärrvärmenätet eftersom gasen då kan tas till vara även när värmebehovet på anläggningen är lågt (Naturvårdsverket 2012). Värmeproduktion var tidigare det vanligaste användningsområdet för biogas i Sverige, men idag används endast en knapp femtedel av biogasen till värmeproduktion (Energimyndigheten 2018b).

Kraftvärme

Vid kraftvärmeproduktion används biogasen för att producera både el och värme. En förutsättning för kraftvärmeproduktion är att biogasens metanhalt inte är för låg (Bioenergiportalen 2012c). Dessutom måste vattenånga och korrosiva ämnen såsom svavelväten avlägsnas innan förbränningen (Naturvårdsverket 2012).

Elproduktionen sker oftast i förbränningsmotorer med en verkningsgrad på ungefär 30 - 35 % (Energimyndigheten 2018b). Svenskt Gastekniskt Center (2012) anger en elverkningsgrad på 30 - 40 % och en värmeverkningsgrad på 60 - 70 %, beroende på motorns storlek. Gasmotorer är vanligast, men även andra typer av förbränningsmotorer kan användas beroende på anläggningens storlek. På större anläggningar används ibland gasturbiner (Bioenergiportalen 2012c). Mikroturbiner på 15 - 500 kW är

ett nyare alternativ som även kan användas på mindre anläggningar (Naturvårdsverket 2012; Bioenergiportalen 2010). Ibland används också andra tekniker för elgenerering, på små anläggningar kan stirlingmotorer användas och på större anläggningar kan ångturbiner eller bränsleceller användas (Bioenergiportalen 2012c).

Verkningsgraden för mikroturbiner är ungefär 25 - 30 % för el och 70 - 80 % totalt, vilket är lägre än för förbränningsmotorer (Bioenergiportalen 2010; Brown et al. 2010). Jämfört med gasmotorer har mikroturbiner däremot lång livslängd, mindre underhåll och därmed också lägre underhållskostnader (Brown et al. 2010; Greer 2012). Gasens renhet är viktigt för att mikroturbinerna ska vara effektiva och därför kan tilläggsystem behövas (Greer 2012). Eftersom mikroturbinerna är små och tekniken är ny kan den specifika investeringskostnaden vara högre än för förbränningsmotorer (Brown et al. 2010). Sundberg, Svensson & Johansson (2011) har sammanställt specifika investeringskostnader för olika tekniker för kraftvärmeproduktion. Kostnaden för en gasmotor varierar mellan 4 000 och 29 000 kr/kW el beroende på kapaciteten (5,5 kW - 1 MW). En mikroturbin på 100 kW anges ha en investeringskostnad på 15 000 kr/kW el.

Fordonsgas

För att biogasen ska kunna användas som fordonsgas måste energidensiteten höjas i en uppgraderingsanläggning (Energimyndigheten 2018b). Detta sker genom att koldioxid avlägsnas, vilket gör att metanhalten ökar från ca 60 % till ca 97 %. Vid uppgraderingen går en liten mängd metan förlorad i processen, så kallad metanslip, ungefär 1 % av det ursprungliga metaninnehållet (Hoyer et al. 2016). Biogasen renas också från svavelväte, vattenånga och partiklar (Bioenergiportalen 2012b). Vid uppgradering är kraven på biogasens kvalitet och metaninnehåll ännu högre än vid förbränning (Svensson 2017).

Efter uppgraderingen komprimeras biogasen till ett tryck på ungefär 200 bar innan den distribueras med transportfordon. Uppgraderad biogas är tekniskt likvärdig med fossil naturgas och kan därför matas in på gasnätet. Dessutom kan gasdrivna bilar köras på både biogas och naturgas (Bioenergiportalen 2012b). Uppgraderad biogas kan kondenseras till flytande biogas (LBG) som har ännu högre energiinnehåll per volymenhet (Svenskt Gastekniskt Center 2012).

Uppgradering av biogas till fordonsgas blir allt vanligare och är idag det vanligaste användningsområdet för biogas i Sverige (Energimyndigheten 2018b). Gasens användning som bränsle i bussar och taxibilar har varit en bidragande orsak till den snabba ökningen (Svensson 2017). År 2017 uppgraderades 61 % av biogasen som producerats på reningsverk i Sverige (Energimyndigheten 2018b). På många små reningsverk är det dock inte lönsamt att bygga uppgraderingsanläggningar eftersom biogasproduktionen är för låg (Svensson 2017). Det finns flera olika tekniker för uppgradering av biogas. I Sverige används vattenskrubber, pressure swing adsorption (PSA), kemisk absorption och membran (Energimyndigheten 2018b). Tekniker för småskalig uppgradering av biogas håller på att utvecklas, men dessa tekniker är fortfarande inte kommersiella (Bauer et al. 2012).

Vattenskrubber är den vanligaste och äldsta tekniken för uppgradering av biogas (Bioenergiportalen 2012b). Tekniken bygger på att metan och koldioxid har olika löslighet i vatten (Hoyer et al. 2016). Biogasen trycksätts innan den förs in i en absorptionskolumn där koldioxiden löser sig i vatten medan metan passerar igenom och lämnar kolumnen som uppgraderad biogas (Bauer et al. 2012).

Kemisk absorption liknar vattenskrubbern men använder kemikalier istället för vatten (Biogas Syd 2010). Det är den näst vanligaste uppgraderingstekniken i Sverige (Energimyndigheten 2018b). I en aminskrubber separeras koldioxiden genom att den kemiskt binds till aminer i en vattenlösning. Biogasen behöver inte trycksättas innan den förs in i kolumnen, men däremot måste värme tillföras när

koldioxiden avlägsnas från vattenlösningen (Bauer et al. 2012). Fördelen med kemisk absorption framför vattenskrubber är att metanförlusterna är låga och att en högre metanhalt kan uppnås (Biogas Syd 2010).

PSA är en väletablerad uppgraderingsteknik som utnyttjar gasernas fysiska egenskaper för att separera dem (Bauer et al. 2012). Processen består av flera parallella kolumner som innehåller ett aktivt material, ofta aktivt kol (Hoyer et al. 2016). Trycksatt biogas förs in i kolumnen, där koldioxiden tas upp av det aktiva materialet medan metan passerar igenom (Bauer et al. 2012).

Membranseparering används endast på ett fåtal anläggningar i Sverige (Energimyndigheten 2018b). Tekniken bygger på att gaser har olika förmåga att passera genom membran (Hoyer et al. 2016). Ofta används hålfibermembran genom vilka koldioxid men inte metan kan passera (Hoyer et al. 2016; Bauer et al. 2012). Processen sker vid ett högt tryck, vilket gör att den resulterande uppgraderade biogasen får ett högt tryck. Ett högt tryck på gasen är önskvärt vid användning som fordonsbränsle eftersom det minskar behovet av ytterligare kompression (Hoyer et al. 2016).

Elanvändningen för vattenskrubber, PSA och membran är 0,2 - 0,3 kWh/Nm³. För aminoskrubbern är elanvändningen lägre, men där används också värme för att separera koldioxiden från aminen (Bauer et al. 2012). Då den resulterande uppgraderade biogasen har olika tryck i de olika metoderna varierar behovet av ytterligare kompression och därmed också energianvändningen för kompressionen. Kompressorerna som används för att höja trycket i processerna är ofta de största energianvändarna (Bauer et al. 2012). Specifik energianvändning (kWh/Nm³) beror på storleken på uppgraderingsanläggningen och är störst för små anläggningar. När anläggningen behandlar mindre gas än maxkapaciteten blir den specifika energianvändningen högre. Energinvändningen beror också på biogasens egenskaper, anläggningens utformning och omgivande klimat. Förutom energin som används vid uppgraderingen förbrukas andra resurser, i huvudsak vatten och kemikalier (Bauer et al. 2012).

I Svenskt Gastekniskt Centers sammanställning och utvärdering av uppgraderingstekniker från år 2012 (Bauer et al.) framkommer att det inte finns några tydliga skillnader i specifik investeringskostnad mellan olika uppgraderingstekniker. Gemensamt för alla tekniker är att den specifika investeringskostnaden, alltså investeringskostnaden i förhållande till kapaciteten, är starkt beroende av anläggningens storlek. Den specifika investeringskostnaden minskar med ökad kapacitet och stabiliseras för anläggningar med biogasflöden av minst 1 000 Nm³/h. För anläggningar med flöden under 300 Nm³/h är kostnaden betydligt högre. Skillnad i pris mellan olika tillverkare är också störst för små anläggningar (Hoyer et al. 2016).

Förutom investeringskostnaden för själva uppgraderingsanläggningen tillkommer projektspecifika kostnader såsom kostnader för förbehandling (Hoyer et al. 2016). De årliga kostnaderna för underhåll av anläggningarna är liknande för de olika teknikerna, ungefär 2 - 4 % av investeringskostnaden. Eftersom energianvändningen är liknande för de olika teknikerna finns heller inga stora skillnader i driftkostnader mellan dem (Bauer et al. 2012). Svenskt Gastekniskt Centers sammanställning är baserad på uppgifter från tillverkare av uppgraderingsanläggningar och av de tillfrågade är det endast tillverkarna av vattenskrubber och membran som tillhandahåller anläggningar med kapaciteter på mindre än 500 Nm³ i timmen (Bauer et al. 2012).

4 Metod

4.1 Energikartläggning och energieffektivisering av dagens Främby

4.1.1 Inventering av energianvändande komponenter

Material från tidigare energikartläggningar på Främby reningsverk användes tillsammans med teknisk dokumentation (Falu Energi & Vatten 2018b) och funktionsbeskrivning (VA-Ingenjörerna 2015) för Främbyverket för att identifiera och sammanställa alla energianvändande maskiner som används i reningsprocessen. Resultaten kontrollerades mot processcheman från övervakningssystemet VA-Operatör som används för övervakning, kontroll och datainsamling på Främby reningsverk. Märkeffekter för varje maskin har sammanställts vid tidigare energikartläggningar genom avläsning av maskinernas märkplåtar.

Länspumpar med låg kapacitet som körs ytterst sällan och inte används vid normal drift togs inte med i kartläggningen. Olika typer av eldrivna mätare och provtagare undersöktes inte var för sig och antogs inte vara intressanta för energieffektivisering, men togs med för helhetens skull. Mätarna antogs gå kontinuerligt och deras totala energianvändning beräknades utifrån deras sammanlagda märkeffekter.

Reningsprocessen delades upp i olika processteg baserade på de olika reningstyperna mekanisk, kemisk och biologisk rening. Den biologiska reningen förväntades vara energikrävande och delades därför upp i två delar. Uppdelningen av övriga processteg baserades på processbilder från VA-Operatör.

4.1.2 Beräkning av energianvändning

Energianvändningen beräknades som genomsnittlig energianvändning för ett år. På en kompressor finns en energimätare och för den användes avläsningar från åren 2014 - 2017 för att beräkna ett medelvärde på elanvändningen. Energimätning finns också för värmen som tillförs substraten i rötkamrarna och även i detta fall användes ett medelvärde för åren 2014 - 2017.

Några maskiner på Främby är anslutna via frekvensomformare som mäter energianvändningen och sparar den som en kumulativ summa. Manuell avläsning av frekvensomformarna sker i januari vartannat år. Med hjälp av avläsningar från år 2015 och 2017 beräknades ett medelårsvärde $E_{\text{år}}$ i kWh/år för perioden 2015-2016 enligt (11.), där E_1 och E_2 är den avlästa energianvändningen år 2015 respektive 2017 och d är antalet dagar mellan avläsningarna. Tidigare avläsningar användes inte eftersom de ansågs

ligga för långt bakåt i tiden. Drifftider för åren 2015 och 2016 användes för att beräkna medeleffekten för varje maskin med frekvensomformare enligt (1.).

$$E_{\text{år}} = \frac{E_1 - E_2}{d} * 365 \quad (11.)$$

Energianvändningen för maskiner utan energimätning eller frekvensomformare beräknades med (1.). Drifftider erhöles från processövervakningssystemet VA-Operatör. Ett medelvärde för åren 2014-2017 användes eftersom drifftiderna kan variera mellan åren på grund av olika belastning eller driftstörningar. Under denna tidsperiod har inga större förändringar skett i mängden behandlat avloppsvatten eller processens utformning, varför den valdes ut i samråd med personal på reningsverket. Årsdrifftider avrundades till hela timmar innan ett medelvärde beräknades. Den tillgängliga statistiken innehöll drifftider för varje dygn, men endast ett årsvärde för varje maskin användes vidare. Statistikens höga upplösning användes dock för att upptäcka eventuella felaktigheter i data och ersätta felaktig data. För dygn där data saknades eller var uppenbart felaktig beräknades värden för årsenergianvändningen $E_{\text{år}}$ i kWh/år med medelvärden från tillgänglig data enligt (12.). E_n är summan av energianvändningen för alla dagar med korrekt data i kWh och n är antalet dagar med korrekt data. I de fall då drifftiderna följde ett tydligt mönster över tid användes ibland kortare tidsperioder för att beräkna drifftider där data saknades.

$$E_{\text{år}} = \frac{E_n}{n} * 365 \quad (12.)$$

Om detta inte var möjligt användes endast åren med korrekt data för att beräkna medelvärdet. För maskiner vars drifftider inte registreras i VA-Operatör användes skattade drifftider som tagits fram av drifttekniker vid tidigare energikartläggningar. Driftpersonalen provade att stänga av en av de tre linjerna i biostegets luftningsbassänger under delar av 2016 och 2017, vilket inte påverkade drifftiderna för maskinerna i de andra linjerna. Eftersom detta driftsätt avviker från den normala driften räknades drifftiderna för de avstängda bassängerna för 2016 och 2017 om till normal drift.

Effekter beräknades med (5.) med hjälp av uppmätta värden på den elektriska strömmen för varje maskin. För motorer utan varvtalsstyrning via frekvensomformare sker styrning av maskiner endast genom de två lägena på och av. Effekten antogs vara konstant vid läget på, oavsett belastning på motorn. Därför mättes effekten endast vid ett tillfälle och mätvärdet antogs vara representativt för all tid motorn var påslagen. Maskinerna på reningsverket är trefasanslutna och strömmen mättes med strömtång på en fas in till varje maskin. Ibland mättes endast strömmen för en av flera liknande maskiner och den beräknade effekten användes för alla dessa maskiner. Mätningen och avläsningen av strömtången utfördes av reningsverkets elektriker. Effektfaktorer $\cos \varphi$ för varje motor erhöles från märkplåten. Om märkplåten inte kunde avläsas, exempelvis för att motorn är placerad under vatten, skattades ett värde baserat på liknande maskiner. Spänningen mättes på ett ställe och antogs vara densamma på hela reningsverket.

För några komponenter som antogs ha låg energianvändning på grund av låg märkeffekt eller kort drifftid beräknades energianvändningen utifrån märkeffekten. Mätning av ström var inte möjlig på ett antal svårtillgängliga maskiner och i de fallen användes också märkeffekter istället för beräknade effekter. I Tabell A1 – A5 i Appendix finns angivet vilka specifika antaganden som gjorts vid beräkning av energianvändningen för varje maskin.

4.1.3 Rekommendation av energieffektiviseringsåtgärder

Resultaten från energikartläggningen användes för att identifiera enskilda maskiner och processer med hög energianvändning. Jämförelser med andra studier och nyckeltal visade om energianvändningen var ovanligt hög. Möjliga energieffektiviseringsåtgärder som ofta genomförs på reningsverk togs fram genom litteraturstudier.

För att underlätta jämförelser mellan resultaten och energianvändningen på andra reningsverk beräknades nyckeltal för energianvändningen baserade på olika enheter. Nyckeltal för pumpar e_{pump} uttryckt i kWh per m³ pumpat flöde beräknades enligt (13.) med pumpens årliga energianvändning E_{pump} i kWh/år och pumpad volym V_{pump} i m³/år.

$$e_{pump} = \frac{E_{pump}}{V_{pump}} \quad (13.)$$

Nyckeltal för omrörare, $e_{omrörare}$ i kWh/m³,år beräknades med årsenergianvändningen för omröraren, $E_{omrörare}$ i kWh/år och volymen V_{tank} på bassänger, lager och tankar i m³ enligt (14.)

$$e_{omrörare} = \frac{E_{omrörare}}{V_{tank}} \quad (14.)$$

För många maskiner och processer beräknades nyckeltal för energianvändningen $e_{process}$ som kWh/m³ behandlat vatten enligt (15.) med processens årliga energianvändning, $E_{process}$ i kWh/år och den behandlade volymen vatten $V_{behandlad}$ i m³/år. I vissa fall beräknades nyckeltal för energianvändningen som $e_{process,pe}$ uttryckt i kWh/pe,år enligt (16.), där p är antalet pe. Vilka enheter som användes för varje maskin och process kan ses i Tabell A6 i Appendix.

$$e_{process} = \frac{E_{process}}{V_{behandlad}} \quad (15.)$$

$$e_{process,pe} = \frac{E_{process}}{p} \quad (16.)$$

4.2 Energianvändning på Framtidens Främby

4.2.1 Utformning av framtidens anläggning

FEV har tagit hjälp av en konsultfirma för att ta fram förslag på hur Främby reningsverk kan komma att se ut efter en ombyggnation respektive en nybyggnation. Beskrivningen av Framtidens Främby i detta projekt baserades på rapporter från konsultfirman (Tyréns 2018a, 2018b). Där informationen var otydlig eller bristfällig i konsultrapporterna gjordes egna uppskattningar med utgångspunkt i dagens reningsverk. Eftersom skillnaderna mellan den ombyggda och den nybyggda anläggningen är små användes endast den nybyggda anläggningen vid beräkningen av framtidens energianvändning. Detta gäller dock inte det biologiska reningssteget där en aktivslamprocess föreslås på den ombyggda anläggningen och MBR-teknik föreslås på den nybyggda anläggningen, vilket förväntas ge stora skillnader i energianvändning.

4.2.2 Beräkning av energianvändning

Många anläggningsdelar och maskiner på Framtidens Främby finns redan i liknande utformning på dagens reningsverk. Den framtida energianvändningen för dessa delar beräknades med nyckeltal för dagens energianvändning från Tabell A6 i Appendix och antogs öka proportionellt med flöden, volymer eller antal pe. Energianvändning hos omrörare antogs vara proportionell mot volymen på lagret eller bassängen som omröraren sitter i. Pumpars energianvändning antogs vara proportionell mot det pumpade flödet. Dessa antaganden grundar sig i att uppgifter om flöden och volymer finns tillgängliga på reningsverket. Andra faktorer som kan påverka energianvändningen såsom pumparnas lyfthöjd, egenskaper hos pumpat och omrört material eller typ av pumpar och omrörare är inte lika väl-dokumenterade. Dessutom kommer en ökad belastning och ett reningsverk dimensionerat för större belastningar medföra att flöden och volymer ökar, vilket kommer kräva maskiner med högre kapacitet eller längre drifttider och därmed högre energianvändning, medan de andra faktorerna kan vara opåverkade trots att reningsverket uppgraderas.

För många delar av processen antogs energianvändningen vara proportionell mot volymen behandlat avloppsvatten. För slamskrapor användes antingen slamflöde eller bassängvolym för att skala upp energianvändningen. Energianvändningen för processövergripande maskiner såsom spolvattenpumpar och kompressorer skalades upp med belastningen uttryckt i pe. Den framtida energianvändningen för pumpar $E_{pump,framtid}$ i kWh/år beräknades enligt (17.), där e_{pump} är nyckeltal för pumpens energianvändning i kWh/m³ pumpat flöde och $V_{pump,framtid}$ är den förväntade pumpade volymen i framtiden i m³/år. Energianvändningen för övriga maskiner och processer beräknades på liknande sätt, men utgick från (14.) – (16.).

$$E_{pump,framtid} = e_{pump} * V_{pump,framtid} \quad (17.)$$

Där energianvändningen idag var hög antogs effektivisering ske och framtidens energianvändning beräknades därför med nyckeltal från andra effektivare processer på Främby eller från andra reningsverk. För luftningen i framtidens aktivslamprocess användes nyckeltal från Borlänges reningsverk som tillhandahållits av Dala-VA. Energianvändningen i luftningen antogs ligga mellan energianvändningen på dagens Främby och på Borlänges reningsverk. Pumparna i slutsedimenteringens nya del antogs vara lika effektiva som de i den gamla delen. Skruvpressarna som ersätter centrifugerna i slamavvattningen använder enligt konsultrapporterna bara 20 % av centrifugernas energi och därför användes detta antagande vid beräkningen.

Energianvändning för utrustning på Framtidens Främby som inte finns idag men som liknar utrustning som finns idag men med andra funktioner beräknades med nyckeltal för den liknande utrustningen. Energianvändningen för några nya maskiner uppskattades utifrån trolig drifttid och trolig effektkapacitet hos motorn. Denna metod användes i de fall då flöden och volymer var okända och svårbedömda. Vilka antaganden som ligger till grund för beräkningarna kan ses i Tabell A7 i Appendix.

I konsultrapporterna anges att endast en typ av förtjockare ska finnas på framtidens Främby men vid energiberäkningen antogs TS-halter före och efter förtjockningen vara samma som idag för att underlätta flödesberäkningar. En ensam förtjockare måste därför ha samma kapacitet som dagens gravitationsförtjockare och mekaniska slamförtjockare tillsammans och därför användes nyckeltal från båda dagens förtjockare vid beräkningen av framtidens energianvändning vid förtjockning.

Energianvändning för MBR-processen E_{MBR} i kWh/år beräknades med (18.) och nyckeltal e_{MBR} för energianvändningen i kWh/m³ behandlad volym vatten uppskattade utifrån en litteraturstudie. $V_{behandlad}$

är behandlad volym vatten i m³/år. Energianvändningen för användning av biogasen har beräknats i avsnitt 5.3.2.

$$E_{MBR} = e_{MBR} * V_{behandlad} \quad (18.)$$

4.2.3 Beräkning av förändringar i belastningar, volymer och flöden

Volymer på bassänger och lager på dagens anläggning togs från en teknisk beskrivning över Främbyverket (Falu Energi & Vatten 2018b), vilken innehåller flera olika källor med ofta motstridiga uppgifter. I första hand användes siffror från den del där drifttekniker sammanställt reningsverkets olika delar, i andra hand användes uppgifterna från konsulten som dimensionerade rötkastrarna år 2008 och i sista hand uppgifter från dimensioneringen av verket för 50 000 pe från år 2000. I konsultrapporterna (Tyréns 2018a, 2018b) finns ibland andra volymer angivna, men eftersom det är otydligt var de siffrorna kommer från användes de inte i detta projekt. Dimensioner på bassänger och lager på Framtidens Främby togs från konsultrapporterna. Där siffrorna skiljde mellan den ombyggda och den nybyggda anläggningen användes siffror från den nybyggda anläggningen vid beräkningar.

Flödesdata som användes för att beräkna nyckeltal för dagens energianvändning togs från processövervakningsprogrammet VA-Operatör. Ett årsmedelvärde för åren 2014 - 2017 användes för varje flöde. Det finns ingen flödesmätning på slammet efter den mekaniska förtjockaren, det avvattnade slammet efter centrifugerna eller på rejektvatten. Med hjälp av mätningar av TS-halt i procent på slammet före och efter den mekaniska förtjockaren, $h_{TS,oförtjockat}$ respektive $h_{TS,förtjockat}$, beräknades istället volymen avvattnat slam $V_{förtjockat}$ i m³/år från volymen slam $V_{oförtjockat}$ innan förtjockaren i m³/år under antagandet att all TS bevaras genom den mekaniska förtjockaren enligt (19.). På samma sätt beräknades slamflödet efter avvattningscentrifugerna. Vidare antogs volymen rejektvatten V_{rejekt} i m³/år vara lika stort som slammets volymreducering enligt (20.).

$$V_{förtjockat} = \frac{V_{oförtjockat} * h_{TS,oförtjockat}}{h_{TS,förtjockat}} \quad (19.)$$

$$V_{rejekt} = V_{oavvattnat} - V_{avvattnat} \quad (20.)$$

Eftersom ingen flödesmätning finns på slammet som pumpas ut från slutsedimenteringen till retur-slamlådan beräknades ett flöde under antagandet att 10 % av returslammet tas ut som överskottsslam. Då denna siffra är en ren uppskattning kontrollerades de resulterande nyckeltalen för returslampumparna mot andra pumpar för att bedöma rimligheten i det beräknade flödet. För att möjliggöra jämförelser mellan pumparna i den gamla respektive nya delen av slutsedimenteringen antogs en tredjedel av slamflödet komma från den gamla delen och två tredjedelar från den nya delen, baserat på att en av luftningsbassängernas tre linjer leds till den gamla delen och de resterande två leds till den nya delen.

Enligt konsultrapporterna består inflödet av vatten till reningsverket av spillvatten från hushåll, spillvatten från industri och tillskottsvatten (Tyréns 2018a, 2018b). Tillskottsvatten är oönskat vatten som läcker in på ledningsnätet, exempelvis dagvatten och grundvatten. Vidare anges att spillvatten från hushåll ökar proportionellt med antalet pe och att spillvatten från industri förväntas fördubblas till år 2040. Mängden tillskottsvatten antas vara densamma som idag. I detta projekt antogs volymen inkommande avloppsvatten i framtiden vara mellan dagens medelflöde och den siffra som anges i konsultrapporterna, vilken har ett längre tidsperspektiv än detta projekt och gäller för 90 000 pe år 2040.

Ingen hänsyn togs till att karaktären på det inkommande vattnet kan komma att förändras och därmed också reningsbehovet.

Belastningen i form av BOD₇ på framtidens reningsverk beräknades med hjälp av ett medelvärde på 70 g BOD₇ per pe och dag, vilket är ett vedertaget antagande som används vid beräkning av belastningen på reningsverk (Balmér 2018). På samma sätt beräknades belastningen på dagens reningsverk p uttryckt i antalet pe utifrån uppmätt faktisk BOD₇-belastning b i kg per år enligt (21.).

$$p = \frac{b * 1000}{70 * 365} \quad (21.)$$

För att underlätta biogasberäkningarna antogs mängden processslam från Främby som förs in i röt-kamrarna öka proportionellt med antalet pe med utgångspunkt i dagens uppmätta slamvolym $V_{slam, idag}$ i m³/år till $V_{slam, framtid}$ i m³/år enligt (22.). Antalet pe idag och i framtiden betecknas $p_{framtid}$ respektive p_{idag} .

$$V_{slam, framtid} = V_{slam, idag} * \frac{p_{framtid}}{p_{idag}} \quad (22.)$$

På den nya anläggningen tillkommer flera extra steg med slamuttag: förluftning, extra slutsedimentering och slamuttag från rejektvatten. Andelen bioslam antogs vara samma som idag, men då en del av detta kommer från förluftningen minskar slamuttaget i biosteget. Av bioslammet antogs 20 % tas ut i förluftningen och 80 % i biosteget. Primärslam till röt-kamrarna kommer precis som idag bara från försedimenteringen. Slam som tas ut i en extra sista kemfällning och vid rening av rejektvatten ska inte rötas och därför antogs detta slamuttag vara extra utöver slammet som produceras idag. Slamuttag från slutsedimenteringen och slamuttag från rejektvattnet uppskattades vara små i förhållande till den totala slamproduktionen. Vid beräkning av mängden rejektvatten försumrades rejektvatten som tas ur slam-lagren och det vatten som tillförs i den mekaniska slamförtjockaren.

Flöden och volymer som rör röt-kammare och gas har beräknats i avsnitt 5.3.2. I Tabell A8 i Appendix finns uppmätta flöden och beräknade flöden på dagens reningsverk sammanställda. Tabell A9 visar data på dimensionerade volymer och Tabell A10 anger beräknade förändringar i flöden och vilka antaganden som har använts.

4.3 Förbättrat resursutnyttjande - biogas

4.3.1 Utvärdering av dagens biogasprocess

Vid utvärderingen av dagens rötningsprocess användes endast värden från år 2017 eftersom mängden externslam och processpillvatten har ökat under perioden 2014 - 2017. Beräkningen av framtidens biogasproduktion utgick från befintlig data och därför var det fördelaktigt att använda den mest aktuella statistiken. I andra delar av projektet användes ett medelvärde av data från 2014 - 2017 vid alla beräkningar om inget annat anges, vilket innebär att värden kan skilja mellan olika tabeller. Vid biogas-beräkningarna användes dygnsvärden som beräknades som medelvärden från angivna årsvärden i drift-datan.

Mängden TS beräknades med (6.) och mängden GF beräknades med (7.). I alla beräkningar och för alla substrat antogs densiteten vara 1 ton/m³ för att underlätta beräkningar av mängden TS och GF då TS- och GF-halter är angivna i volymprocent medan mängden TS och GF beräknades i massa. Detta

antagande brukar användas vid beräkningar på Främby reningsverk eftersom densiteten för de olika substraten inte är känd.

Flödesmätare registrerar kontinuerligt volymerna av de olika substraten som förs in i rötkamrarna och data från dessa mätare användes för att beräkna det totala inflödet i rötkamrarna. TS- och GF-halter i olika delar av processen mäts och dokumenteras regelbundet på reningsverket vid provtagning av slam. Volymen fett togs direkt från mätvärden och för att beräkna massan TS och GF i fett användes de uppskattade TS- och GF-halter som brukar användas vid beräkningar på Främby reningsverk eftersom ingen mätning av TS- och GF-halt görs på fett.

Externslam och processpillvatten går via ett gemensamt lager in i rötkamrarna och därför finns endast en flödesmätare för blandningen av de två substraten. Däremot registreras hur stora volymer av respektive substrat som tas emot på Främby. Skillnader i mottagen och inpumpad volym kan förklaras av att lagret ibland bräddar över när det blir överfullt. Uppmätt inpumpad volym användes tillsammans med värden för mottaget externslam för att beräkna volymen processpillvatten som förs in i rötkamrarna. Externslammet från olika externa verk har olika TS- och GF-halt och för vissa verk saknades data. En gemensam TS- och GF-halt beräknades för externslammen med hjälp av tillgängliga data. De uppmätta TS- och GF-halter som finns för blandningen av externslam och processpillvatten antogs inte vara representativa för blandningen. Enligt personalen som utför provtagningen är det troligt att blandningen vid provtagningstillfället ofta innehåller nästan bara processpillvatten. Därför uppskattades TS-halten för processpillvattnet vara något högre än den som kan beräknas utifrån de kända TS-halterna på blandningen och på externslammet, det vill säga att en större andel TS vid provtagningstillfället kom från processpillvattnet än vad de mottagna volymerna antyder. Den uppskattade TS-halten resulterade i en ny fördelning mellan processpillvatten och externslam som antogs vara representativ för provtagningstillfällena och utifrån denna fördelning kunde en GF-halt för processpillvattnet beräknas.

Gasmätaren som mäter volymen biogas som produceras i rötkamrarna var felinställd fram till mitten av år 2018, vilket innebär att tidigare mätvärden var oanvändbara. Det finns dock ytterligare två gasmätare, en som mäter flödet till facklan och en som mäter flödet till gasmotorn och summan av dessa borde ge huvudgasflödet. Den period under senare delen av 2018 som har korrekta mätvärden för alla tre mätare användes för att kontrollera om så verkligen var fallet. Då det fanns en viss skillnad mellan huvudgasflödet och summan av de två andra mätarna antogs att en av mätarna visade fel. När gasmotorn var ur drift och gasflödet till motorn var noll stämde mätningen av huvudgasflödet väl överens med mätningen av gasflödet till facklan, varför mätaren av flödet till gasmotorn antogs vara den som visade fel. Med hjälp av mätningarna från den period av 2018 då huvudgasflödesmätaren fungerade beräknades en korrigeringsfaktor x att multiplicera gasmotorflödet med för att få summan av flödena till facklan Q_{fackla} och gasmotorn $Q_{gasmotor}$ att stämma så bra överens som möjligt med huvudgasflödet Q_{biogas} enligt (23.). Mätningar för varje dygn användes och summan av skillnaden varje dygn minimerades genom att prova olika korrigeringsfaktorer. Den beräknade korrigeringsfaktorn användes därefter tillsammans med tidigare mätningar av gasflöden till facklan och gasmotorn för att beräkna huvudgasflödet för alla tidsperioder enligt (23.).

$$Q_{biogas} = Q_{fackla} + Q_{gasmotor} * x \quad (23.)$$

Data som användes vid dimensioneringen av rötkamrarna år 2008 samt driftdata från processövervakningsprogrammet VA-Operatör användes för att beräkna processparametrar som beskriver hur rötkamrarna fungerar idag. Resultaten utvärderades genom jämförelser med de antaganden som låg till grund för dimensioneringen 2008 och med litteraturvärden. Upphållstiden beräknades med (8.) utifrån

totalt inflöde till röt-kamrarna och röt-kammarvolym. Organisk belastning beräknades med (9.) och totalt inflöde av GF och röt-kammarvolym. Nedbrytningsgraden beräknades med (10.) som skillnaden mellan tillförd massa GF till röt-kamrarna och massa GF i rötslammet.

Metanutbytet för substratmixen U_{metan} i Nm³/ton GF beräknades med hjälp av tillförd mängd GF $m_{GF,in}$ i ton/år, uppmätt genomsnittlig metanhalt i procent h_{metan} och volym producerad biogas V_{biogas} i Nm³/år enligt (24.). Därefter delades den totala massan GF upp på de olika substrattyperna slam (både från Främby och externa verk), processpillvatten och fett. Metanutbytet för de olika substraten uppskattades genom att den producerade metangasen fördelades på de olika substraten med stöd av litteraturvärden.

$$U_{metan} = \frac{V_{biogas} * \frac{h_{metan}}{100}}{m_{GF,in}} \quad (24.)$$

Driftdata för gasmotorn användes för att utvärdera energiproduktionen från biogasen. Energiinnehållet i biogasen E_{biogas} i kWh/år antogs bestå av endast metan och beräknades enligt (25.) med värmevärdet för metan q_{metan} i kWh/Nm³ erhållet från litteratur och volymen producerad biogas V_{biogas} i Nm³/år.

$$E_{biogas} = V_{biogas} * \frac{h_{metan}}{100} * q_{metan} \quad (25.)$$

Elverkningsgraden för gasmotorn η_{el} i procent beräknades med hjälp av energiinnehållet i biogasen E_{biogas} i kWh/år och statistik på producerad el E_{el} i kWh/år enligt (26.).

$$\eta_{el} = \frac{E_{el}}{E_{biogas}} * 100 \quad (26.)$$

Värmeproduktionen från gasmotorn $E_{värme}$ i kWh/år beräknades utifrån energiinnehållet i biogasen E_{biogas} i kWh/år med (27.) och en uppskattad värmeverkningsgrad $\eta_{värme}$ i procent eftersom ingen mätning av värmeproduktionen finns.

$$E_{värme} = E_{biogas} * \frac{\eta_{värme}}{100} \quad (27.)$$

Drifttiden för gasmotorn registreras inte men drifttid för utrustning som endast går i samband med motorn finns för en period av 2017. Med denna data och uppmätt elproduktion för motorn beräknades motorns medeleffekt enligt (1.). Medeleffekten och elproduktion för resterande tid användes därefter för att beräkna gasmotorns drifttid för alla tidsperioder.

4.3.2 Beräkning av framtida biogasproduktion

Röt-kammarvolymen som behövs på Framtidens Främby beräknades med (9.) utifrån förväntad volym substrat vid 90 000 pe och ett önskat värde på organisk belastning som användes vid dimensioneringen av dagens röt-kammare. Röt-kammarvolymen beräknades trots att den fanns angiven i konsultrapporterna eftersom beräkningarna och bakgrunden till värdena som använts i konsultrapporterna var otydliga.

För scenariot med 70 000 pe antogs volymen fett vara oförändrad och volymen processpillvatten fördubblas, baserat på prognoser från personal på Främby. Mängden slam från Främby antogs öka proportionellt med antalet pe och mängden externslam antogs minska eftersom några av de yttre reningsverken ska läggas ner. Med hjälp av slamvolymen från de yttre verken beräknades en ny volym för externslammet. Egenskaperna hos de olika substraten antogs vara oförändrade och metanutbytet för respektive substrat antogs vara samma som idag.

Metanutbytet U_{metan} i Nm^3/ton GF för respektive substrat och de nya mängderna tillförd GF $m_{GF,in}$ i ton/år användes för att beräkna den totala årliga metanproduktionen i framtiden V_{biogas} i $Nm^3/år$ med (28.). Metanhalten h_{metan} i procent antogs vara samma som den genomsnittliga metanhalten år 2014 – 2017.

$$V_{biogas} = \frac{m_{GF,in,slam} * U_{metan,slam} + m_{GF,in,fett} * U_{metan,fett} + m_{GF,in,spillvatten} * U_{metan,spillvatten}}{\frac{h_{metan}}{100}} \quad (28.)$$

4.3.3 Jämförelse av olika användningsområden för biogasen

Energiinnehållet i biogasen beräknades med (25.). En uppskattad värmeverkningsgrad för gaspannan och värmeverkningsgraden som antagits för dagens gasmotor användes för att beräkna hur mycket värme som kan utvinnas ur gasen med (27). På motsvarande sätt beräknades elproduktionen med elverkningsgraden för dagens gasmotor. För uppgradering användes metanhalter h_{metan} i procent på den producerade biogasen (rågasen) och den uppgraderade gasen för att beräkna volymen uppgraderad gas $V_{fordonsgas}$ i $Nm^3/år$ utifrån volymen producerad biogas $V_{rågas}$ i $Nm^3/år$ med (29.). En liten del metan antogs gå förlorad i så kallad metanslip s som anges i procent.

$$V_{fordonsgas} = \frac{V_{rågas} * h_{metan,rågas} * \left(1 - \frac{s}{100}\right)}{h_{metan,fordonsgas}} \quad (29.)$$

Anläggningarna för användning av biogas dimensionerades efter biogasproduktionen vid en belastning på 70 000 pe, till skillnad från reningsverket som dimensionerats för 90 000 pe. Detta beror på att livslängden för dessa anläggningar antogs vara kortare än för hela reningsverket.

Energianvändningen för kraftvärme beräknades utifrån energianvändningen för den gasmotor som finns på Främby idag. Energianvändningen för en uppgraderingsanläggning beräknades med nyckeltal från litteratur och energianvändningen för en panna uppskattades godtyckligt.

Investeringskostnaden för en uppgraderingsanläggning med membranteknik och en gasmotor beräknades med nyckeltal från litteratur. Investeringskostnaden för en gaspanna uppskattades med hjälp av en offert på en aktuell panna som planeras att installeras på Främby i år. Energiproduktionen förväntades vara i drift hela året och gasproduktionen antogs vara konstant. Utifrån dessa antaganden beräknades med (1.) den kapacitet i kW som behövdes för respektive teknik.

Möjliga intäkter för den producerade energin beräknades med priser på värme, el och fordonsgas. Pris på fjärrvärme erhöles från personal på FEV (Runevad 2018). Förväntat framtida elpris togs från en prognos av Skellefteå Kraft som FEV har tillgång till. Pris på elcertifikat uppskattades baserat på historisk statistik över elcertifikatpriser (Energimyndigheten u.å.). För pris på biogas användes samma siffra som Borlänge Energi använt i en kalkyl inför en investering av en uppgraderingsanläggning från år 2018. Biogasens volym beräknades först om till massa med hjälp av ett litteraturvärde på densiteten. FEV har tagit del av Borlänge Energis investeringsunderlag som en del i samarbetet mellan de två företagen.

I detta projekt användes endast investeringskostnaden för själva anläggningen och möjliga intäkter för producerad och såld energi för att jämföra ekonomin för olika tekniker för användning av biogas. En fullständig investeringskalkyl innehåller även andra kostnader som uppstår i samband med installationen av en anläggning samt kostnader för drift och underhåll. Investeringskalkylen måste också inkludera räntor och avskrivningar för att en återbetalningstid ska kunna beräknas.

5 Resultat och diskussion

5.1 Energikartläggning och energieffektivisering av dagens Främby

5.1.1 Energikartläggning

Den totala energianvändningen för reningsprocessen på Främby är 3,4 GWh per år, varav 1,9 GWh är el och 1,5 GWh är värme. Energianvändningen består alltså av 55 % el och 45 % värme. Vid den senaste energikartläggningen 2016 var eltillförseln 2,1 GWh och värmertilförseln var 1,0 GWh. Tidigare energikartläggningar har även inkluderat belysning, ventilation och elanvändning i byggnader på reningsverket, vilket kan förklara att de resulterat i en högre elanvändning. Dessutom har energianvändningen för maskiner utan energimätning i tidigare energikartläggningar baserats på märkeffekter, medan effekter i detta projekt beräknats utifrån strömmätningar. Tabell A1 i Appendix visar dock att de beräknade effekterna kan vara både större och mindre än märkeffekterna. År 2018 köptes 2,2 GWh el till Främby vilket tyder på att resultatet av energikartläggningen med avseende på el är rimligt.

Resultaten från energikartläggningen är mest osäkra för de maskiner som inte har frekvensomformare som registrerar energianvändningen. En begränsning med (1.) är att den inte tar hänsyn till att effekten kan variera över tid. Om motors effektbehov vid tiden för mätningen inte är representativt för hela tidsperioden blir den beräknade energianvändningen felaktig. I detta projekt antogs att effekten för maskiner var konstant och ingen hänsyn togs därför till variationer i belastning eller avvikelser vid start och stopp. Mätning av effekt vid flera tillfällen eller användning av energimätare som mäter över en längre tidsperiod hade gett säkrare resultat. Strömtångens exakthet, avläsningen av strömtången och att strömmen endast mättes på en fas är ytterligare begränsningar i metoden. Energianvändningen beror också på drifttider, vilka innehåller osäkerheter såsom felaktigheter i data och uppskattningar. Ytterligare felkällor är skattade effektfaktorer och energiberäkningar baserade på märkeffekter. Felkällorna har störst betydelse för energianvändningen för enskilda maskiner och kan därför påverka resultaten vid jämförelser av energianvändningen hos olika maskiner eller processteg.

Värmen står för knappt hälften av energianvändningen på Främby reningsverk, vilket är ett rimligt resultat enligt Kjellén & Andersson 2002. Däremot avviker värmeanvändningen från värmertilförseln som angavs vid den senaste energikartläggningen. Detta kan förklaras av att den tidigare kartläggningen undersökte hur mycket fjärrvärme som tillförts till Främby och därmed bortsåg från den värme som används för uppvärmning av rötkastrarna som produceras av gasmotorn. Dessutom inkluderade den tidigare energikartläggningen, till skillnad från detta projekt, fjärrvärme för uppvärmning av lokaler.

I Tabell 1 jämförs den specifika elanvändningen på Främby med nyckeltal för andra reningsverk som presenterats i artiklar och rapporter. De spridda resultaten för olika reningsverk bekräftar att det är svårt att jämföra energianvändningen för olika reningsverk. Elanvändningen på Främby ligger inom intervallen som anges i Maktabifard, Zabrowska & Makinia 2018 och i Balmér 2018. De högre elanvändningarna för reningsverk i Svenskt Vattens undersökningar 2011 och 2008 (Lingsten, Lundkvist & Hellström 2013; Lingsten et al. 2011) kan förklaras av att många små reningsverk som ingått i dessa kartläggningar har haft hög energianvändning. Siffran som anges i Kjellén & Andersson 2002 är också betydligt högre än resultatet för Främby, vilket kan förklaras av den publikationen är flera år gammal och att reningsverk generellt har blivit mer energieffektiva sedan dess (Balmér 2018). Några faktorer som försvårar jämförelsen mellan Främby och andra reningsverk är att Främby gynnas av att pumpning av avloppsvatten inte behövs inne i verket och att vissa av de andra studierna även inkluderat elanvändning för ventilation, belysning och lokaler.

Tabell 1. *Specifik elanvändning i kWh/pe och kWh/m³ inkommande avloppsvatten för Främby reningsverk i jämförelse med andra reningsverk.*

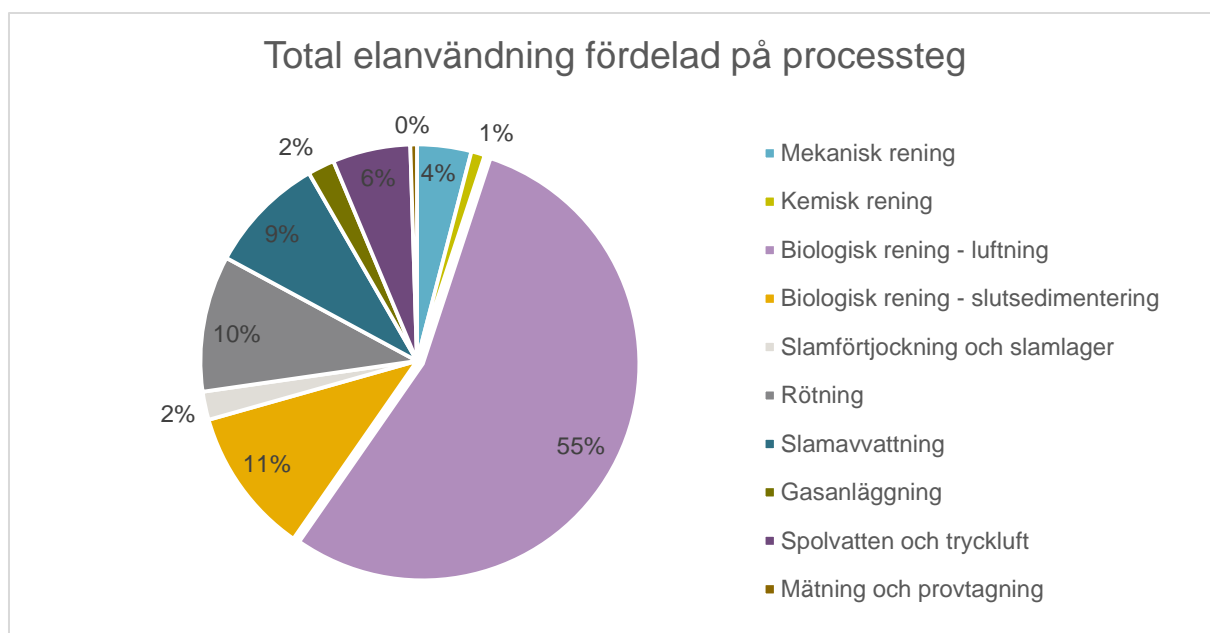
Specifik el-användning	Främby	Maktabifard, Zabrowska & Makinia (2018)	Kjellén & Andersson (2002)	Balmér & Hellström (2011)	Balmér (2018)	Lingsten, Lundkvist & Hellström (2013)	Lingsten et al. (2011)
kWh/pe	39	15,3-48,2	90	52	25-75	110	123
kWh/m ³	0,32	0,26->1					

Tabell 2 visar en jämförelse mellan Främby reningsverk och Borlänges reningsverk, vilka har liknande förutsättningar. Borlänges reningsverk har ungefär samma belastning som Främby och ligger nära Främby geografiskt och borde därför utgöra en bra grund för jämförelser. Energianvändningen på Främby är lägre än på Borlänges reningsverk baserat på pe, men högre baserat på volym behandlat avloppsvatten. Skillnaderna kan bero på varierande energieffektivitet, men också på att siffrorna för Borlänges reningsverk har beräknats annorlunda och därför kan skillnaderna inte anses vara tydliga. Jämförelserna mellan Främby och andra reningsverk tyder på att energianvändningen på Främby reningsverk inte är ovanligt hög men att det troligtvis finns utrymme för effektiviseringar.

Tabell 2. *Specifik energianvändning i kWh/pe och kWh/m³ inkommande avloppsvatten för Främby reningsverk i jämförelse med Borlänges reningsverk år 2016.*

Specifik energianvändning	Främby	Borlänges reningsverk
kWh/pe	71	81
kWh/m ³	0,59	0,55

Figur 3 visar att elanvändningen är överlägset störst i den biologiska reningens luftningssteg, vilket är ett förväntat resultat. Luftning och omrörning står för 55 % av den totala elanvändningen på Främby, vilket ligger inom intervallet på 50 – 70 % som anges i litteratur (Maktabifard, Zabrowska & Makinia 2018; Kjellén och Andersson 2002). För hela biosteget är andelen 66 % och luftning och omrörning står för drygt 80 % av energianvändningen i biosteget, vilket är något högre än de 50 - 80 % som anges i Jenkins & Wanner 2014. I detta projekt är dock överskottslampumpning inkluderat i luftningsdelen, men eftersom pumpningen är en förhållandevis liten del borde den inte påverka slutsatserna av jämförelserna.



Figur 3. Total elanvändning på Främby reningsverk uppdelad på de olika reningsprocesserna.

I Tabell 3 jämförs den specifika elanvändningen i luftningen och biosteget på Främby reningsverk med en tidigare kartläggning, Borlänges reningsverk och litteraturvärden. Enligt tabellen använder luftningen på Främby mer än dubbelt så mycket energi som luftningen på Borlänges reningsverk. På Borlänges reningsverk består luftningen endast av bottenluftare, vilka har lägre specifik energianvändning än Främby's luftare. På Främby finns dessutom omrörare som ingår i luftningen. För hela biosteget är skillnaden mindre, vilket kan förklaras av att Borlänges reningsverk har inpumpning till biosteget, något som inte behövs på Främby. Enligt Huber Technology (u.å.) är elanvändningen i Främby's biosteg låg i jämförelse vad som är vanligt för aktivslamprocesser. Noteras bör dock att energianvändningen jämförs baserat på volymen behandlat avloppsvatten och att luftningsbehovet också är beroende av vattnets innehåll (Olsson 2008).

Resultaten för Främby's elanvändning i biosteget stämmer ganska väl överens med resultaten från 2017. Skillnaden kan förklaras av att vid tidigare kartläggningar har energianvändningen beräknats med märkeffekter och inte genom mätningar av ström. Dessutom kan drifttider för maskiner och inflöde till biosteget variera beroende på vilka år data kommer från.

Tabell 3. Specifik elanvändning i kWh/m³ inflöde för det biologiska reningssteget på Främby reningsverk i jämförelse med resultat från en tidigare energikartläggning, Borlänges reningsverk och litteraturvärden.

	Främby idag	Främby 2017	Borlänge 2017	Litteraturvärde (Huber Technology u.å.)
Luftning	0,173	0,165	0,068	
Hela biosteget	0,207	0,204	0,122	0,2 - 0,4

Ingen jämförelse av energianvändningen för de övriga processtegen har gjorts med tidigare energikartläggningar på Främby eller med andra reningsverk. Detta beror på att uppdelningen mellan de olika processdelarna skiljer sig åt mellan olika studier vilket försvårar direkta jämförelser. En mer detaljerad beskrivning av energianvändningen i de olika reningsstegen i detta projekt presenteras nedan.

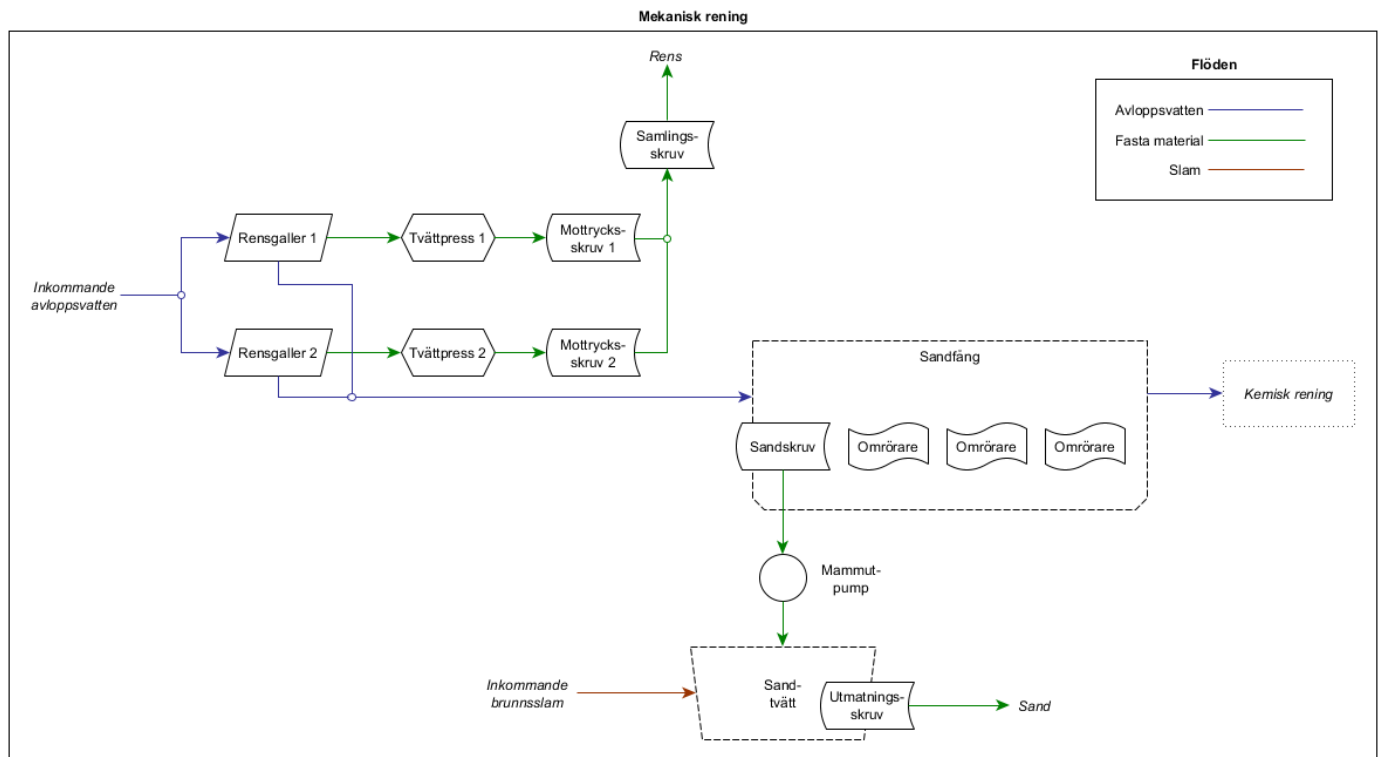
I Appendix finns tabeller med data från energikartläggningen. I Tabell A1 finns energianvändningen för alla maskiner sammanställd. Drifttider för alla maskiner finns i Tabell A2 och energianvändningen för maskiner med frekvensomformare finns i Tabell A3. I Tabell A4 finns resultaten av strömmätningarna sammanställda och Tabell A5 visar data från energimätare.

Mekanisk rening

Den årliga elanvändningen i det mekaniska reningssteget är 75 MWh, vilket motsvarar 2 % av reningsverkets totala energianvändning. *Figur 4* visar den mekaniska reningens komponenter.

Vid reningsverkets inlopp finns två parallella rengaller som körs ett i taget och styrs av skillnaden i vattennivå före och efter gallren. Till varje galler finns även en tvättpress som tvättar rensset som fångats i gallren från organiskt material och en mottrycksskruv som avvattnar det tvättade rensset. En samlingskruv transporterar rensset till en uppsamlingscontainer. I sandfånget finns tre omrörare som går kontinuerligt och förhindrar att organiskt material sedimenterar. I botten av sandfånget finns en sandskruv som samlar upp den sedimenterade sanden innan den transporteras till sandtvätten av en mammutpump. Den tvättade sanden förs från sandtvätten till en container av en utmatningsskruv.

De tre omrörarna i sandfånget står tillsammans för hälften av energianvändningen i det mekaniska reningssteget, medan mammutpumpens blåsmaskin är den enskilda motor som använder mest energi. Mammutpumpar har generellt låga verkningsgrader och de kan vara svåra att ersätta eftersom de behövs för att transportera svårpumpade grova material. Den största energieffektiviseringspotentialen i det mekaniska reningssteget bedöms därför finnas i omrörarna i sandfånget. Totalt sett kräver processen för sandavskiljning mer energi (85 %) än rensavskiljningen (15 %). I rensavskiljningen är tvättpressarna de största energianvändarna.



Figur 4. Processchema över den mekaniska reningen på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.

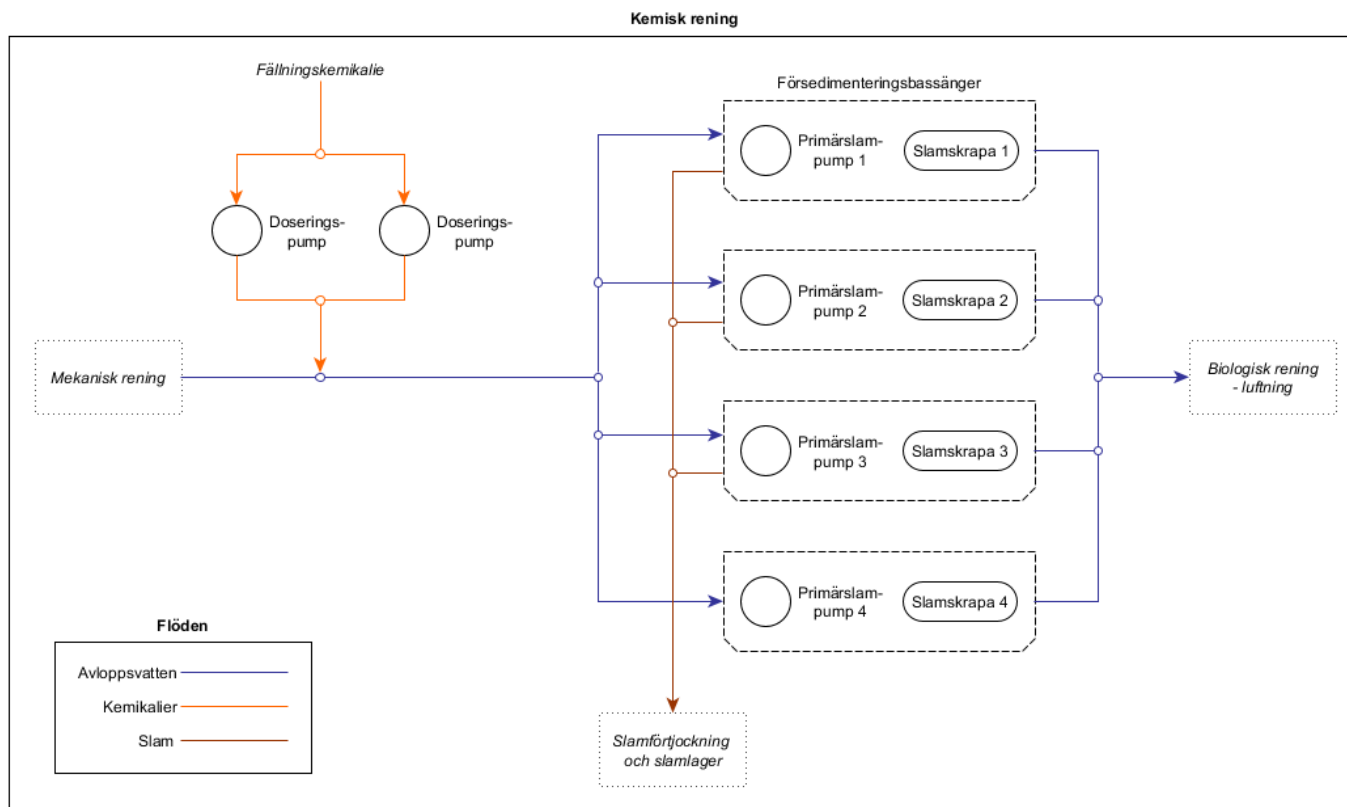
Kemisk rening

Den årliga elanvändningen i det kemiska reningssteget är 19 MWh, vilket motsvarar 1 % av reningsverkets totala energianvändning. Den kemiska reningens maskiner kan ses i *Figur 5*.

Efter den mekaniska reningen mäts halten organiskt material i vattnet och resultatet används till att dosera fällningskemikalien med hjälp av två doseringspumpar som alternerar med varandra.

Försedimenteringen består av fyra bassänger och i varje försedimenteringsbassäng finns en slamskrapa som går kontinuerligt och förflyttar slammet bakåt i bassängen längs botten. I den bakre delen av varje bassäng finns en djupare del, ett uppfång, där slammet samlas. I varje uppfång finns en slampump som pumpar det sedimenterade slammet till slamförtjockningen. Pumparna startar enligt inställning från operatören och körs tills halten organiskt material i det pumpade slammet understiger en viss nivå. Endast en av de fyra pumparna körs åt gången.

Pumparna i försedimenteringen använder mest energi i det kemiska reningssteget. Jämfört med hela reningsverket är dock energianvändningen för dessa pumpar låg, tack vare korta drifttider som är ett resultat av den styrning som tillämpas på dem. Slamskraporna är de näst största energianvändarna i det kemiska reningssteget men har heller ingen stor påverkan på den totala energianvändningen.



Figur 5. Processchema över den kemiska reningen på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.

Biologisk rening - luftning

Den årliga elanvändningen för luftningsdelen i det biologiska reningssteget är 1 000 MWh, vilket motsvarar 30 % av reningsverkets totala energianvändning. De energianvändande komponenterna i luftningssteget kan ses i Figur 6.

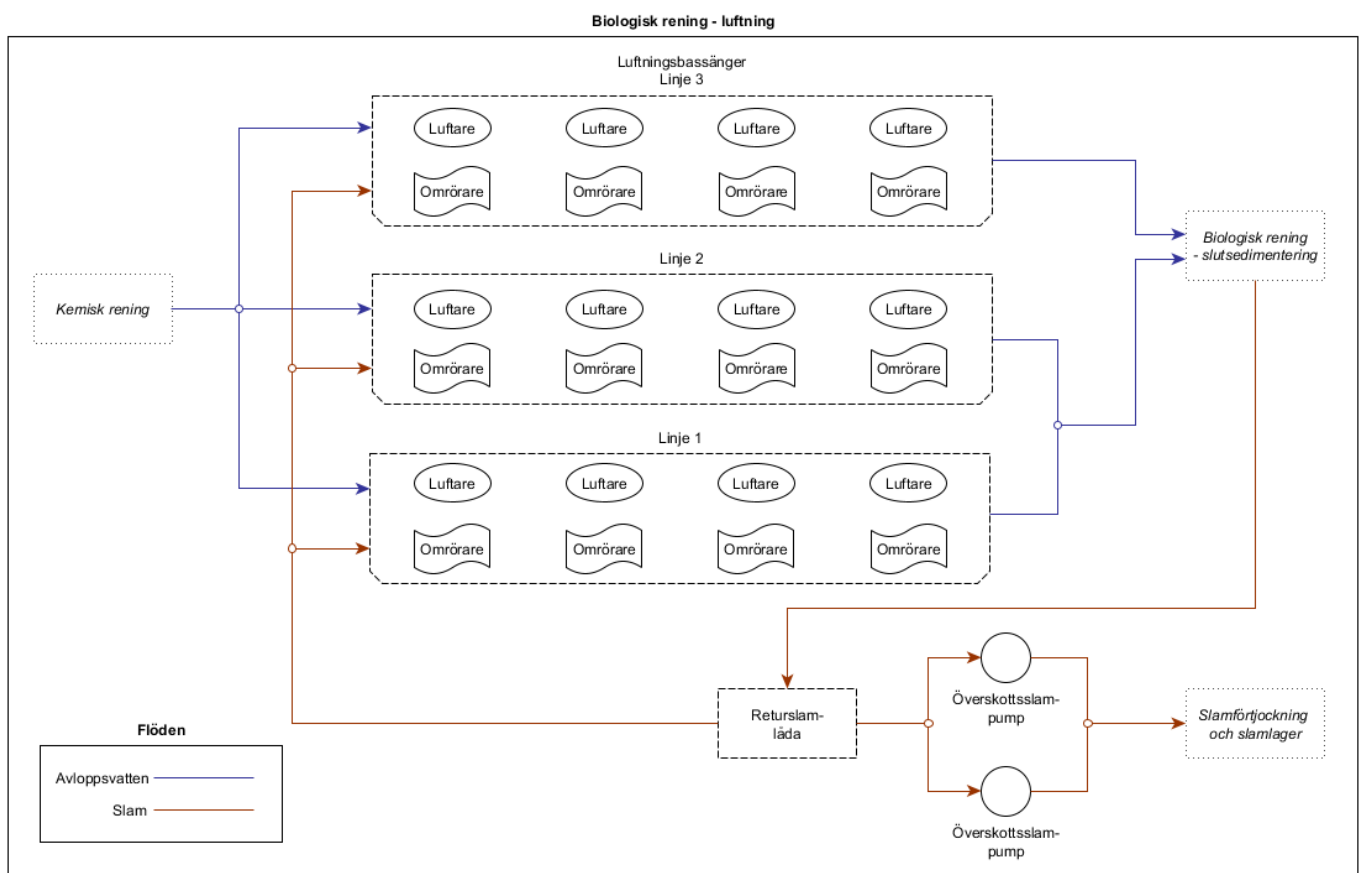
Den biologiska reningen är uppdelad på tre parallella linjer där varje linje består av en bassäng med fyra bioreaktorer som vattnet passerar igenom. En bioreaktor består av en luftare och en omrörare som drivs av varsin elmotor. Luftaren skapar turbulens i bassängen och finfördelar luften och den aktiva biomassan för att underlätta att reaktioner sker. Omröraren körs kontinuerligt och cirkulerar vattnet för att förhindra sedimentering. I varje bassäng finns också två syrehaltsmätare som används för reglering av luftningen. Luftaren startar och stoppar för att hålla syrenivån inom ett önskat intervall, på 0,5 - 1 mg syre per liter. Två överskottsslampumpar pumpar en liten del av slammet från returslamlådan till slamförtjockningen. Hur mycket slam som tas ut ur aktivslamprocessen beror bland annat på slamåldern, det vill säga hur lång tid slampartiklarna befinner sig i aktivslambassängerna.

Bioreaktorerna som används i luftningen på Främby tillhör en speciell teknik som liknar mekaniska luftare. Luftarna lyfter upp vattnet över ytan för att sedan trycka ner det och på så vis fånga luft på vägen. Omrörarna är av propellertyp och ser till att biomassan förblir suspenderad i vattnet och att inga syrefria zoner uppstår. Fördelen med bioreaktorerna är enligt tillverkaren att de skapar reaktionszoner med stor turbulens vilket minskar storleken på de biologiska partiklarna. Utanför reaktionszonerna är syrehalten lägre eftersom bakteriernas syreupptag gynnas när de passerar genom zoner med olika syrenivå (Falu Energi & Vatten 2018b). Enligt tillverkaren drar bioreaktorernas motorer 80 - 85 % av märkströmmen

eftersom de är medvetet överdimensionerade. Energikartläggningen visar att många av bioreaktorerna drar mer än så, vilket kan ses i Tabell A1 i Appendix.

Luftningen är det mest energianvändande steget på Främby, liksom på de flesta reningsverk. Tekniken som används på Främby skiljer sig dock mycket från de finblåsiga bottenluftarsystem som anses vara de mest energieffektiva idag, vilket tyder på att energianvändningen på Främby kan vara onödigt hög. På Främby styrs luftarna efter syrehalten med on/off-reglering medan omrörarna går kontinuerligt, vilket gör att omrörarna är de största energianvändarna i biosteget.

Biosteget på Främby är dimensionerat för 55 000 pe, vilket är mer än resten av reningsverket och mer än den faktiska belastningen på knappt 50 000 pe. Den förväntade konsekvensen av överkapaciteten är att luftarna borde ha korta drifttider eftersom syrebehovet de ska tillgodose borde vara lägre än deras maximala kapacitet. Trots detta är drifttiderna långa samtidigt som syrehalten redan är lägre än rekommendationen på max 2 mg/l som anges i Kjellén & Andersson 2002.



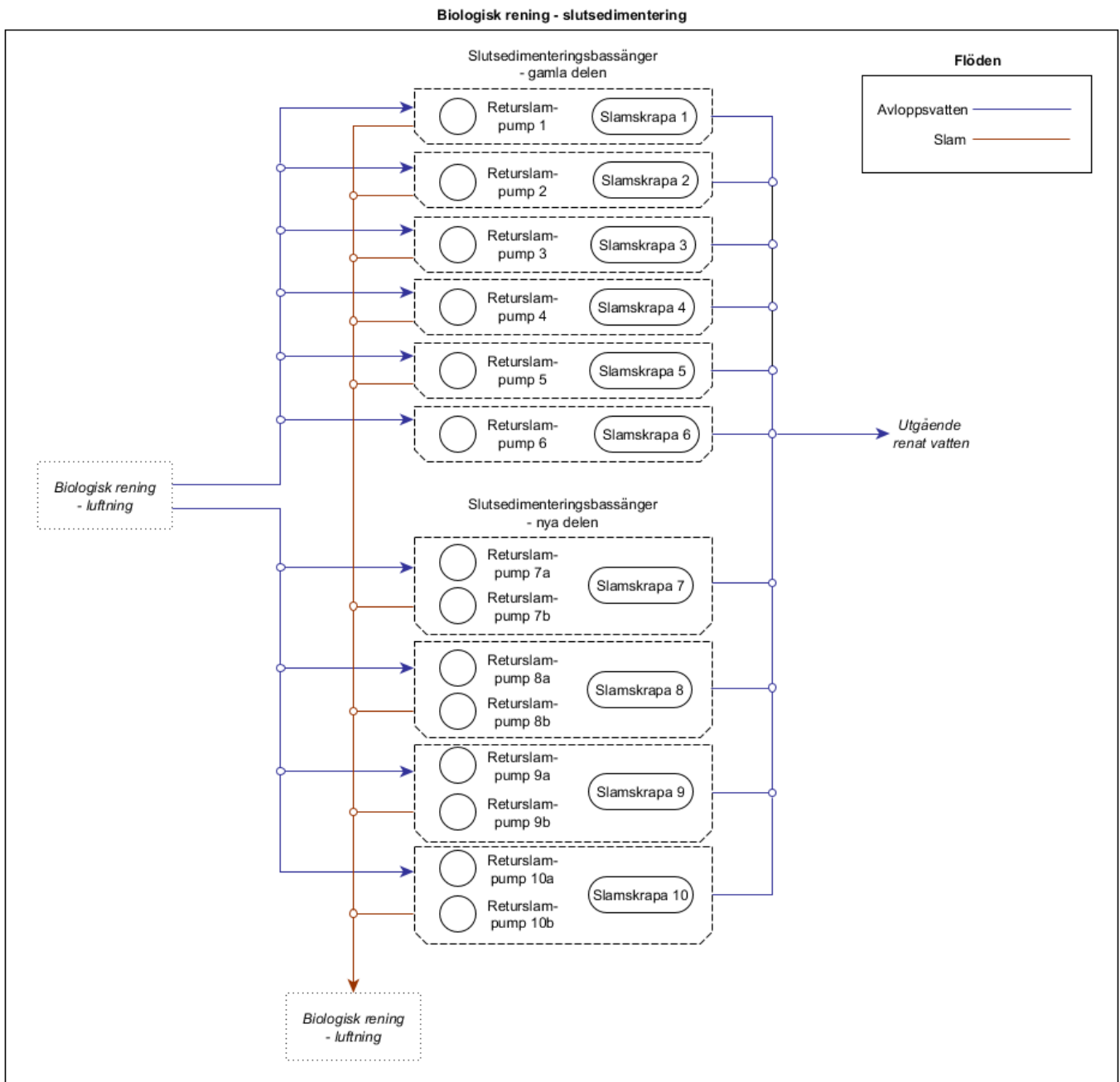
Figur 6. Processchema över den biologiska reningens luftning på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.

Biologisk rening - slutsedimentering

Den årliga elanvändningen för slutsedimenteringen är 200 MWh, vilket motsvarar 6 % av reningsverkets totala energianvändning. *Figur 7* visar ett processchema över slutsedimenteringen.

Slutsedimenteringen består av totalt tio bassänger där sex bassänger utgör den så kallade gamla delen och fyra bassänger som är byggda senare utgör den nya delen. Uppsamlingen av slam fungerar på samma sätt som i försedimenteringen. Varje slutsedimenteringsbassäng innehåller en slamskrapa som körs kontinuerligt och i varje uppfång finns minst en slampump. De fyra bassängerna i den nya delen har två slampumpar i varje bassäng. Till skillnad från slampumparna i försedimenteringen körs dessa pumpar kontinuerligt, de sex pumparna i gamla delen är dock anslutna via frekvensomformare.

I slutsedimenteringen står pumpning av slam för tre fjärdedelar av energianvändningen och slamskraporna för en fjärdedel. Energikartläggningen visar också att energianvändningen för både pumparna och slamskraporna är högre i den nya delen än i den gamla delen. Energianvändningen för olika pumpar och slamskrapor kan inte jämföras rakt av eftersom de behandlar olika stora mängder slam. Exempelvis har slamskraporna i den nya delen av slutsedimenteringen högre kapacitet än både de i den gamla delen och de i försedimenteringen.



Figur 7. Processchema över den biologiska reningens slutsedimentering på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.

Slamförtjockning och slamlager

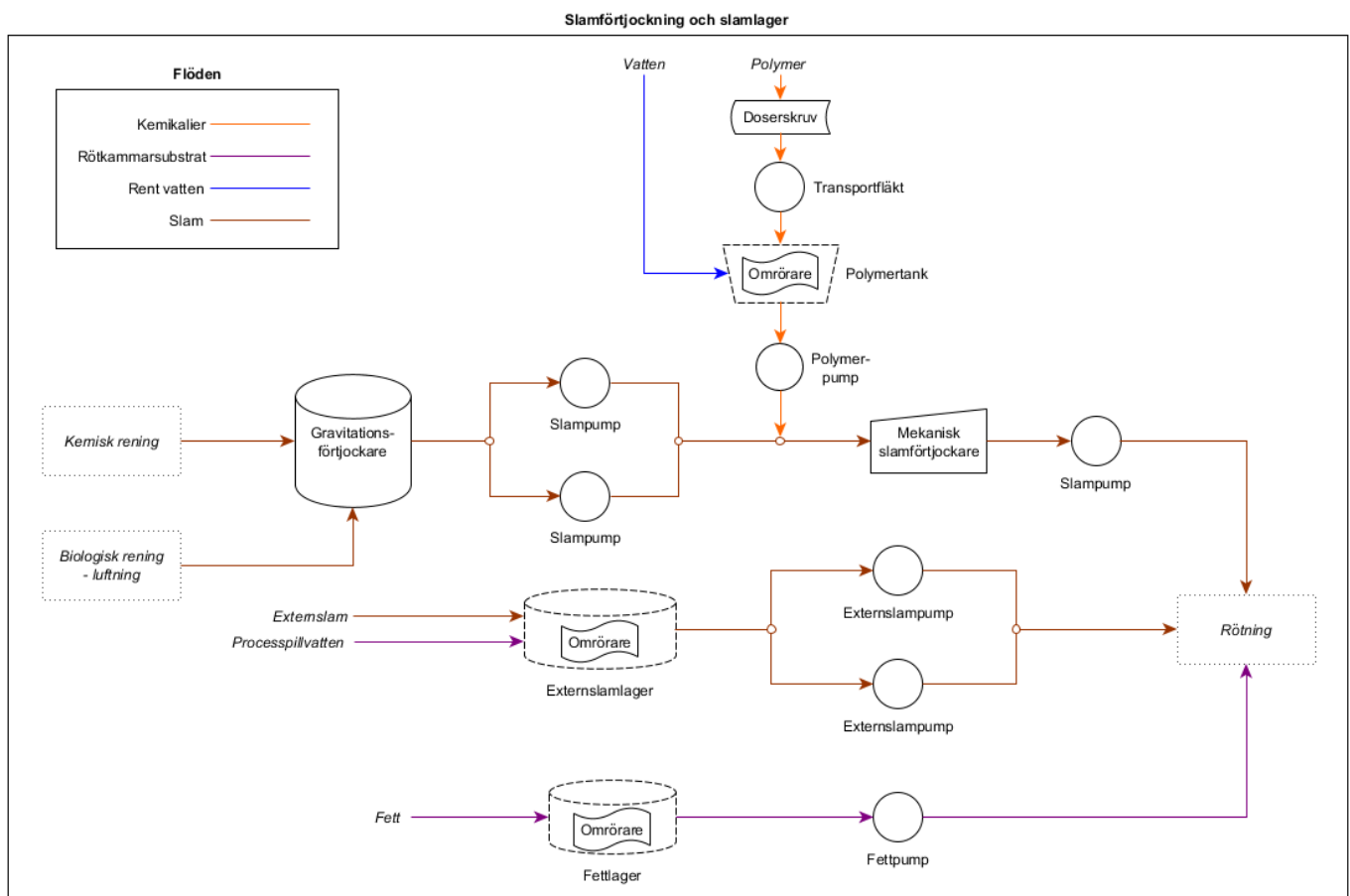
Den årliga elanvändningen för slamförtjockning och slamlager är 39 MWh, vilket motsvarar 1 % av reningsverkets totala energianvändning. Alla energianvändande maskiner kan ses i Figur 8.

Gravitationsförtjockaren består av en stor tank med en omrörare som separerar vatten från slammet. Omröraren körs kontinuerligt och gör att slammet sjunker mot tankens botten där det tas ut och pumpas vidare till den mekaniska slamförtjockaren medan vattnet (rejektet) rinner över tankens överkanter. Utpumpningen av slammet sköts av två excenterskruvpumpar som körs växelvis varje dygn beroende på mängden slam i gravitationsförtjockaren. Före den mekaniska slamförtjockaren finns en polymerstation som består av en blandningstank med omrörare för blandning av polymer i pulverform och vatten

samt en doserskruv och fläkt som tillsätter polymer till tanken. En polymerpump tillsätter polymerblandningen till slammet. Den mekaniska slamförtjockaren består av ett silband, ett slags galler i rörelse som separerar vatten från slammet och höjer TS-halten från 3 % till 7 %. Slammet pumpas in i röttkamrarna av en frekvensstyrd pump som styrs av nivån i ett slamschakt efter den mekaniska förtjockaren. Den mekaniska förtjockaren arbetar bara när slam tillförs från gravitationsförtjockaren.

I externslamlagret finns en toppmonterad omrörare som förhindrar sedimentering. Externslammet pumpas in i röttkamrarna av två pumpar. Även fettlagret har en omrörare och en pump som pumpar in fett i röttkamrarna. Även dessa pumpar är frekvensstyrda.

De största energianvändarna i detta processteg är de två omrörarna i lagren för externslam respektive fett. Eftersom omrörningen sker kontinuerligt blir energianvändningen hög trots att effekten är relativt låg. Slampumparnas energianvändning är låg, dels på grund av att de inte körs så ofta men framför allt eftersom de alla är varvtalsstyrda och körs långt under sin märkeffekt. Den mekaniska förtjockaren avvattnar slammet mer energieffektivt än centrifugalförtjockaren eftersom den använder mindre energi trots att den höjer TS-halten mer. I den mekaniska förtjockningen används dock kemikalier. Bra förtjockning kan gynna den totala energianvändningen eftersom den gör att slamvolymen som behöver pumpas senare i processen reduceras. Högre TS-halt hos slammet innebär också att energidensiteten i substraten som förs in i röttkamrarna är högre.



Figur 8. Processchema över slamförtjockning och slamlager på Främby reningsverk. Figurer med heltäckta linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.

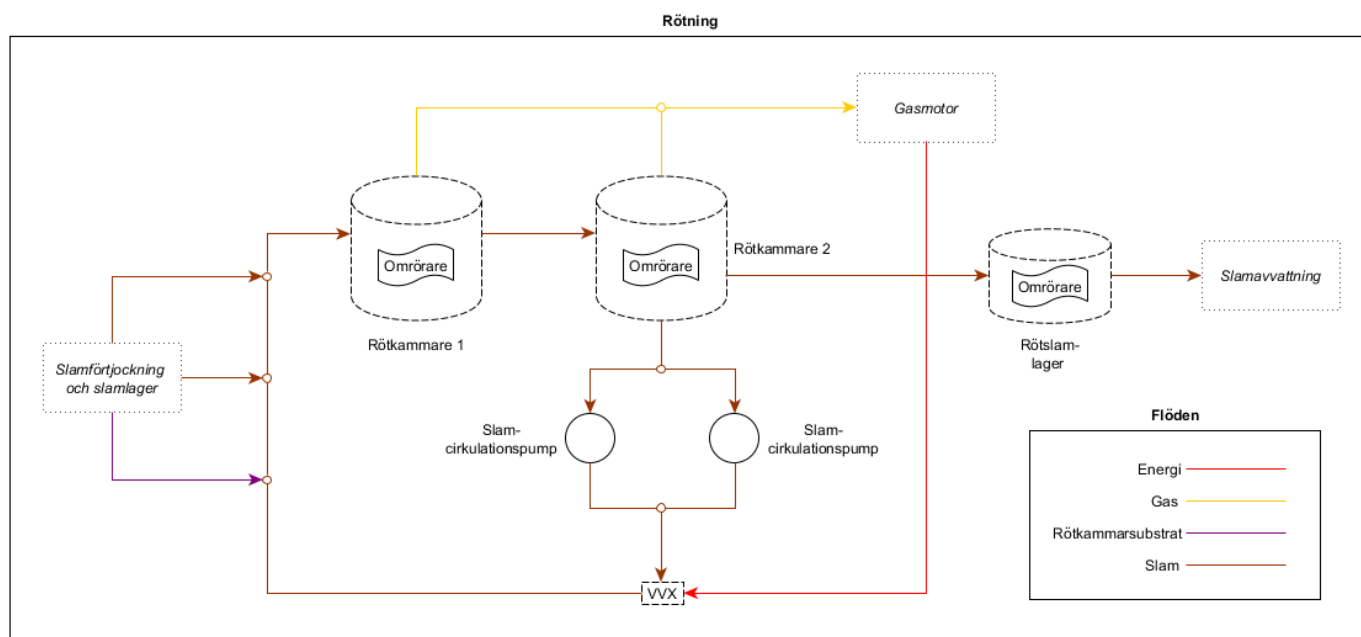
Rötning

Den årliga energianvändningen för rötningsprocessen är 1 700 MWh, varav 190 MWh är el och 1500 MWh är värme. Detta motsvarar 51 % av reningsverkets totala energianvändning. Rötningen är det enda processteg som använder värme. De energianvändande komponenterna i rötningsprocessen kan ses i *Figur 9*.

I varje rötchammare finns en propelleromrörare som körs kontinuerligt utom när den byter riktning. Två pumpar som körs växelvis varje dygn cirkulerar slammet mellan de två rötchammarna. På förbindelseledningen finns en värmeväxlare som värmer upp slammet till en temperatur på 35 - 37 °C. Värmen kommer i första hand från gasmotorn och i andra hand från fjärrvärme. Uppvärmningen och omrörningen av substraten i rötchammarna behövs för att rötningsprocessen ska fungera.

Röttslammet som tagits ur rötchammarna lagras i en tank med en omrörare som går kontinuerligt innan det skickas till slamavvattningen. Omröraren är sidomonterad och har två olika hastigheter där nivån i tanken avgör omrörningshastigheten.

Omröraren i röttslamlagret är den enskilda maskin utanför luftningssteget som använder mest energi. De två slamcirkulationspumparna körs växelvis och har tillsammans hög energianvändning på grund av deras höga effektkapacitet, trots att de är frekvensstyrda. Omrörarna i rötchammarna har också hög energianvändning på grund av att de körs kontinuerligt. Värmeanvändningen för uppvärmning av substraten i rötchammarna är nästan lika stor som reningsverkets totala elanvändning. Eftersom en del av värmen som används produceras på reningsverket och resten kommer från fjärrvärme finns få incitament att minska värmeanvändningen.



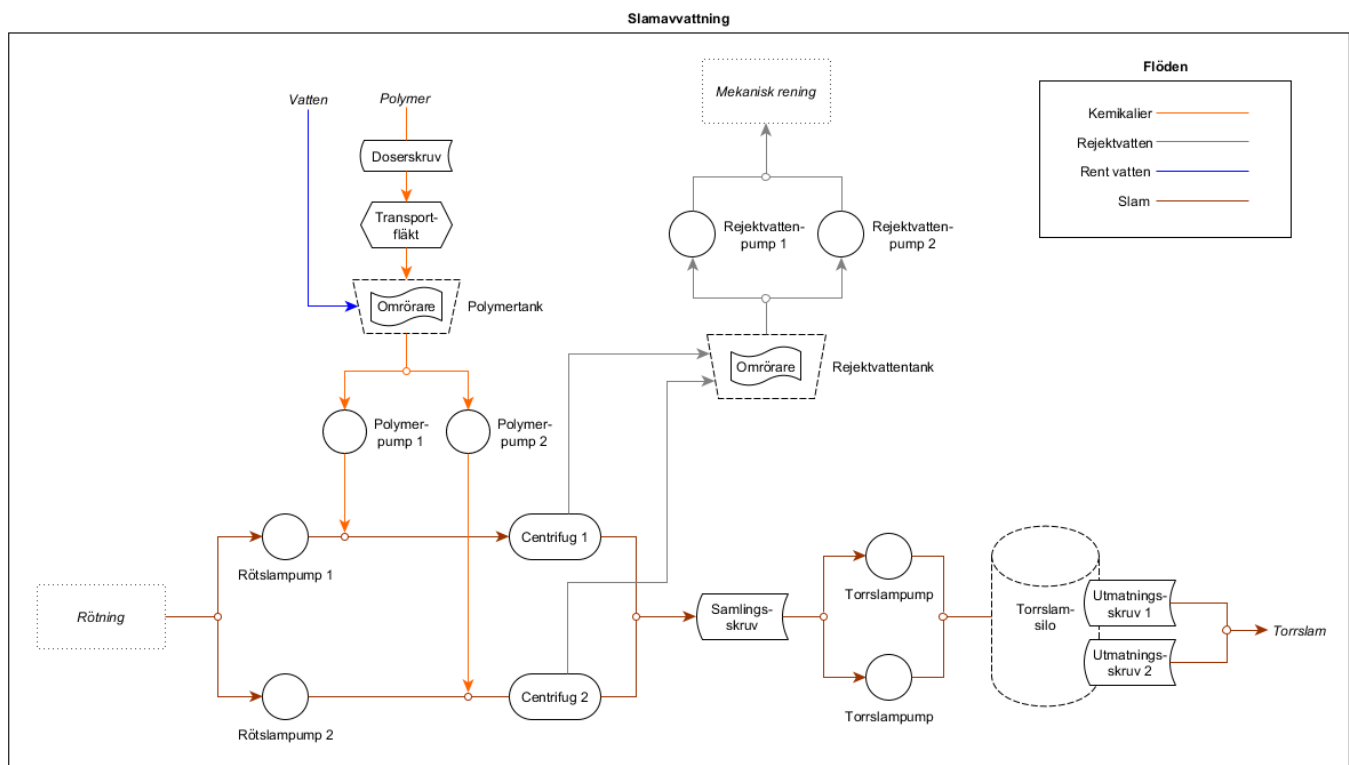
Figur 9. Processchema över rötningen på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.

Slamavvattning

Den årliga elanvändningen för slamavvattningsdelen är 160 MWh, vilket motsvarar 5 % av reningsverkets totala energianvändning. *Figur 10* visar alla komponenter i slamavvattningsdelen.

De två avvattningscentrifugerna matas av varsin röt slampump. Centrifugerna består av en trumma och en skruv som roterar i olika hastigheter och på så vis avvattnar slammet från en TS-halt på 3 % till 26 %. Centrifugerna körs när nivån i röt slamlagret är hög. Före centrifugerna finns en polymerstation där polymer i pulverform blandas med vatten av en omrörare. Polymer doseras och blåses till blandtanken av en doserskruv och en transportfläkt. Polymerblandningen tillsätts slamflödet vid respektive centrifug av varsin polymerpump. Vattnet som avskiljs i centrifugerna samlas i en rejektvattentank med kontinuerlig omrörning innan det pumpas tillbaka till reningsverkets inlopp. Det finns två rejektvattentankar, en primär och en kompletterande, och de styrs av nivån i rejektvattentanken. Det avvattnade röt slammet faller ut ur centrifugerna och förs till en torr slampump via en samlingskruv. Torrslampumpen drivs av två kompressorer som skjuter upp slammet i silon. När silon töms används två hydrauldrivna utmatningsskruvar för att leda ut slammet.

De två kompressorerna som driver torr slampumpen använder mest energi i slamavvattningssteget och står för 64 % av energianvändningen. Energianvändningen för de två kompressorerna som driver torr slampumpen har dock beräknats utifrån märkeffekterna vilket innebär att siffrorna är osäkra. Centrifugerna är de andra stora energianvändarna i slamavvattningen som tillsammans står för 25 % av energianvändningen. Det är förväntat att slamavvattningen är en energikrävande process, eftersom centrifugerna står för en stor höjning av TS-halten.

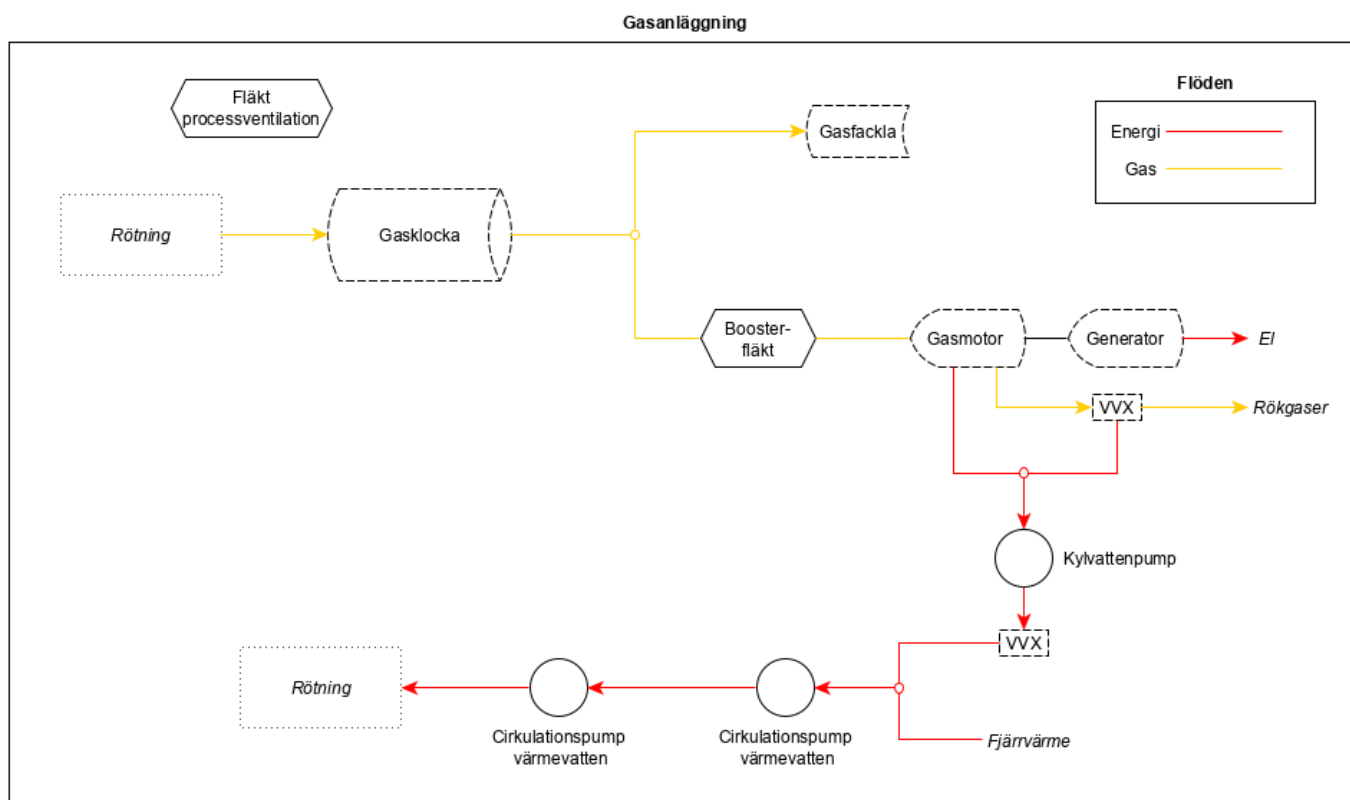


Figur 10. Processchema över slamavvattningen på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.

Gasanläggning

Den årliga elanvändningen för gasanläggningen är 37 MWh, vilket motsvarar 1 % av reningsverkets totala energianvändning. *Figur 11* visar ett processschema över gasanläggningen på Främby.

En boosterfläkt används för att höja trycket på gasen innan den förbränns i motorn. Vid gasmotorn finns även en fläkt för processventilation. Kretsen för kylning av gasmotorn och rökgaserna drivs av en kylvattenpump. I värmevattenkretsen finns två cirkulationspumpar som går kontinuerligt, en vid gasmotorn och en vid röttningskammarna. Samtliga pumpar i denna del av reningsverket är frekvensstyrda och kylvattenpumpen har både störst kapacitet och högst energianvändning.



Figur 11. Processchema över gasanläggningen på Främby reningsverk. Figurer med heldragna linjer symboliserar elanvändande maskiner. Endast de flöden som har betydelse för energianvändningen är inkluderade i bilden.

Spolvatten och tryckluft

Den årliga elanvändningen för spolvatten och tryckluft är 110 MWh, vilket motsvarar 3 % av reningsverkets totala energianvändning.

Två spolvattenpumpar ser till att trycket hålls i en tank med så kallat brutet vatten. Det brutna vattnet används i reningsverkets processer och tappas upp från det kommunala ledningsnätet för att undvika att vatten som kommit i kontakt med reningsverket trycks tillbaka ut på nätet. För att vattnet ska komma vidare ut på reningsverket från tanken behöver det trycksättas. En av spolvattenpumparna har lägre kapacitet och används endast som backup till den andra.

En stor skruvkompressor försörjer reningsverket med tryckluft tillsammans med en mindre tryckluftskompressor och en tryckluftstork. Kompresserna håller trycket i tryckluftssystemet som bland annat används till att öppna och stänga tryckluftsventiler. I de delar av processen som kräver vatten används vatten från det kommunala dricksvattnenätet, förutom i sandtvätten där renat avloppsvatten från

slutsedimenteringen används. Vatten används bland annat vid tvättning av rens, på polymerstationerna och i den mekaniska slamförtjockaren. Drygt 60 % av energin i denna del används av kompressorerna.

Mätning och provtagning

Den årliga elanvändningen för mätning och provtagning är 9,2 MWh, vilket motsvarar 0,3 % av reningsverkets totala energianvändning.

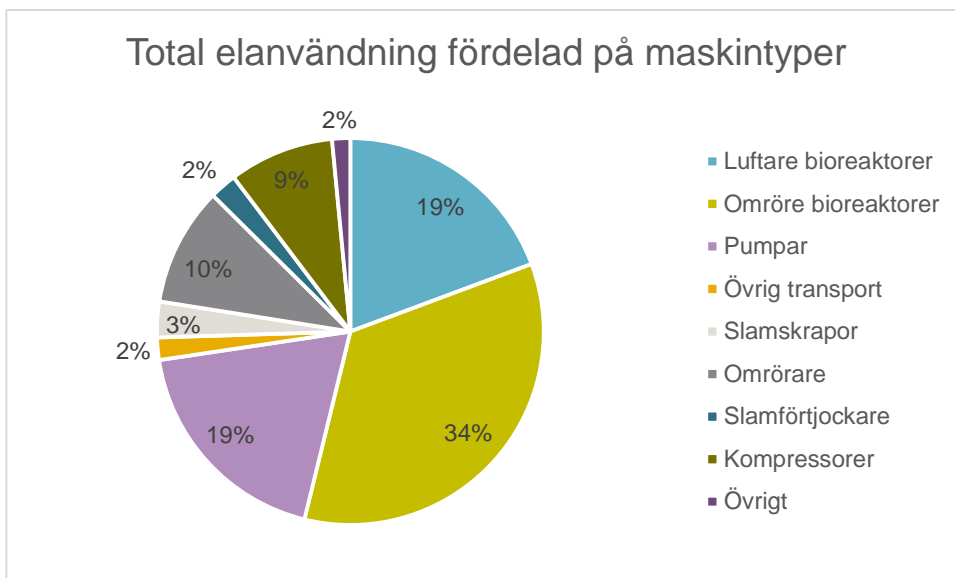
I alla delar av reningsprocessen finns olika typer av mätare och provtagare vars registrerade värden används för att styra och övervaka processen. Flödesmätare, syremätare och susphaltsmätare är de huvudsakliga mätarna som används. Susphaltsmätare mäter mängden suspenderat material i vattnet, det vill säga mängden partiklar som kan sedimentera. Dessutom finns nivåmätare, tryckmätare, temperaturmätare och pH-mätare. Sist på reningsverket finns en provtagningskur där prover tas på det utgående vattnet. Proverna analyseras och resultaten används bland annat till miljörapportering.

Energianvändningen för mätare utgör mindre än 1 % av den totala energianvändningen och är därför obetydlig. De flesta mätare går kontinuerligt men har låg effekt. Kontinuerlig mätning av tillstånd i olika delar av reningsprocessen är en förutsättning för bra styrning av andra maskiner i processen. Fler mät punkter och mer avancerade mätare kan därför leda till en reduktion av den totala energianvändningen på hela verket. För att maximal nytta ska uppnås är det dock viktigt att mätarna fungerar som de ska och registrerar rätt värden.

5.1.2 Vidare analys av resultatet

Enligt Tabell A1 i Appendix återfinns 13 av de 20 enskilda maskiner som använder mest el i den biologiska reningens luftningssteg. Utanför luftningen är rötslamlagrets omrörare är den maskin som använder mest el. Högt på listan finns också den stora skruvkompressorn som förser hela reningsverket med tryckluft och de två kompressorerna som driver torrslampumpen. Övriga maskiner bland de 20 som använder mest el är rötkamrarnas slamcirkulationspumpar och den primära spolvattenpumpen. Förutom enskilda maskiner som använder mycket el kan energieffektivisering av flera likadana maskiner som tillsammans har hög energianvändning ge stora energivinster.

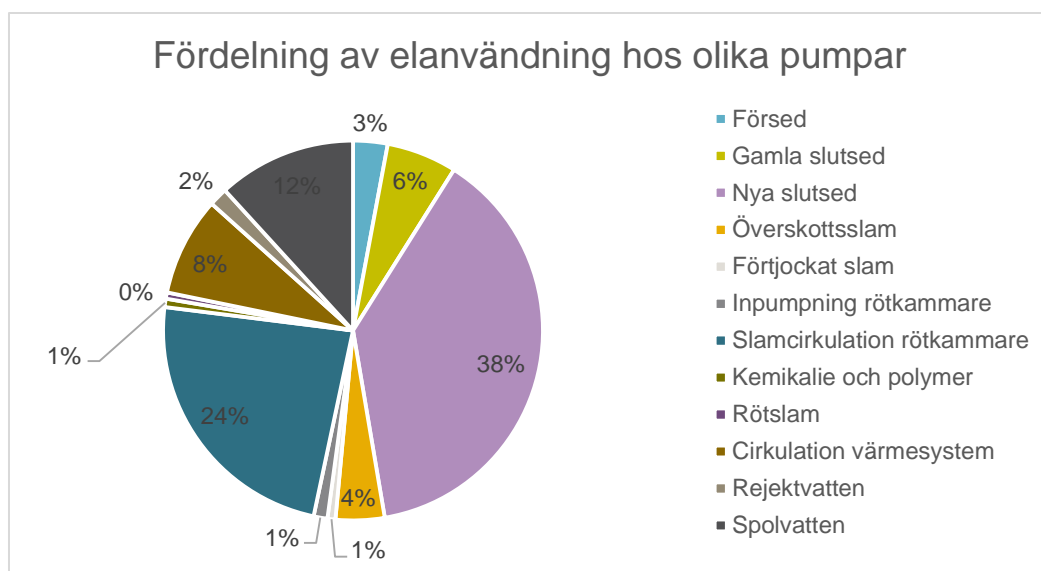
I *Figur 12* presenteras elanvändningen för hela reningsverket fördelat på olika maskintyper istället för processteg. Resultatet visar att förutom luftare och omrörare i det biologiska reningsteget används mest el av olika typer av pumpar. Omrörare och kompressorer har också en betydande elanvändning, vilket indikerar att energieffektiviseringsåtgärder bör riktas mot dessa maskiner. Den största kompressorn har en mätare som registrerar energianvändningen och därför kan energianvändningen för den antas vara ett säkert resultat. Beräkningen av energianvändningen för de två kompressorerna som driver torrslampumpen är osäker eftersom den baseras på märkeffekter. Det är troligt att kompressorerna inte alltid går på maxeffekt och att den verkliga energianvändningen därför är lägre. Kompressorernas relativt höga effektkapacitet jämfört med andra maskiner på reningsverket tyder dock på att de har en betydande elanvändning.



Figur 12. Total elanvändning på Främby reningsverk uppdelad på olika typer av maskiner. I Tabell A1 i Appendix finns angivet vilken kategori varje maskin har placerats i.

Främbyverkets lokalisering gör att vattnet kan rinna på självfall genom reningsverket ner mot recipienten utan att pumpas, vilket ofta inte är fallet för andra reningsverk. Trots detta utgör pumpning 19 % av den totala elanvändningen på Främby enligt Figur 12. Figur 13 visar att returslumpumparna i den nya delen av slutsedimenteringen använder mest el följt av rötkamrarnas slamcirkulationspumpar. Därefter följer spolvattenpumparna och cirkulationspumparna i gasmotorns värmesystem. Eftersom elanvändningen för pumpar beror av volymen och egenskaperna hos de medier som pumpas behöver en hög elanvändning inte innebära att pumparna har dålig energieffektivitet. Däremot visar resultaten i Figur 13 var energieffektiviseringsåtgärder kan ge störst energivinster.

Ingen flödesmätning finns för slammet som pumpas ut från slutsedimenteringsbassängerna och därför är det svårt att jämföra pumparna i slutsedimenteringen med de i försedimenteringen. Eftersom pumparna i slutsedimenteringen cirkulerar den aktiva biomassan i aktivslamprocessen är det dock rimligt att anta att pumparna i slutsedimenteringen utför ett större arbete. Det går inte heller att exakt jämföra pumparna i slutsedimenteringens gamla och nya del eftersom flödesmätningen på slammet ut från slutsedimenteringen är gemensam för alla bassänger. Då två av luftningens tre linjer leds in i den nya delen antogs ungefär två tredjedel av slammet från slutsedimenteringen komma från den nya delen. Om den gamla och nya delen istället delas upp efter bassängvolym utgör den nya delen 62,5 % av den totala volymen, vilket stämmer överens med antagandet om att fördelningen är två tredjedelar. Slutsatsen är därför att den nya delens slampumpar är ineffektiva i jämförelse med pumparna i den gamla delen, trots att viss osäkerhet finns i resultatet.



Figur 13. Elanvändning för pumpning på Främby reningsverk uppdelad på olika pumpar.

5.1.3 Förslag på energieffektiviseringsåtgärder

Luftning

Styrning efter syrehalt tillämpas redan idag i luftningsbassängerna på Främby, men de långa drifttiderna tyder på att marginalerna för att variera luftningen efter belastningen är små. Syrehalten är redan lägre än riktvärdet och en sänkning av syrehalten skulle kunna äventyra processens funktion. Möjligen skulle energieffektiviteten och processen kunna förbättras genom att övergå från on/off-styrning till att variera luftningen med hjälp av ett mer avancerat styrsystem som anpassar luftarnas varvtal efter syrebehovet (Olsson 2008). Mätning av syrehalter på fler ställen i processen kan också ge bättre styrning av luftarna. Den största energibesparingen kan troligtvis uppnås om bioreaktorerna byts ut mot finblåsiga bottenluftare som är de mest energieffektiva luftarna (Jenkins & Wanner 2014).

Sammansättningen av vattnet som ska renas i det biologiska reningssteget avgör behovet av nyttigt arbete, vilket inte kan reduceras genom effektivare elektrisk utrustning. Kvaliteten på vattnet i biosteget är beroende av de tidigare reningsprocesserna samt kvaliteten på vattnet innan det når reningsverket. Det uppströmsarbete som genomförs på Främby i syfte att undersöka kvaliteten på inkommande vatten och kartlägga källor till föroreningar utanför reningsverket kan därför ha effekt på energibehovet på reningsverket, både i luftningen och i andra reningssteg.

Pumpning

Störst potential för energieffektivisering av pumpar finns i slutsedimenteringens nya del. En stor skillnad mot försedimenteringen är att pumparna i slutsedimenteringsbassängerna går hela tiden. Om pumparna är överdimensionerade eller om belastningen av organiskt material är låg kommer slammet som pumpas ur bassängerna vara tunt och innehålla mycket vatten. Det slam som tas ut ur aktivslamprocessen och pumpas till gravitationsförtjockaren kommer då kräva mer energi för behandling och transport vidare i reningsverket. Även om det mesta slammet återförs till luftningsbassängerna utför slutsedimenteringspumparna också ett onödigt arbete om de pumpar runt vatten. Genom att inte köra alla pumpar hela tiden kan energianvändningen reduceras. En annan metod är att installera frekvensomformare precis som på pumparna i slutsedimenteringens gamla del och på så vis sänka effekten.

Pumpar med frekvensomformare som körs kontinuerligt på Främby idag körs ofta på konstant effekt, det vill säga frekvensomformarna används för att minska effekten hos överdimensionerade pumpar. Frekvensomformarna kan utnyttjas bättre genom att tillämpa varvtalsstyrning på pumparna och aktivt reglera effekten beroende på belastningen och anpassa driften till pumparnas optimala driftpunkt (Kjellén & Andersson 2002). De flesta pumpar på Främby har både reglerad drifttid och sänkt varvtal med frekvensomformare och därför är möjligheterna till energieffektiviseringsåtgärder genom styrning begränsade. Nästa steg är att undersöka vilken typ av pumpar som används och byta ut pumpar som har låg verkningsgrad eller är onödigt grova. I senare delar av reningsprocessen är de pumpade medierna ofta homogena vilket möjliggör finare pumpar.

Omrörning

Med frekvensomriktare kan omrörningshastigheten varieras efter nivån i lagren. Detta gäller exempelvis fettlagret och externslamlagret eftersom nivån i dessa varierar. Förmodligen är det också möjligt att inte köra omrörarna hela tiden utan stoppa driften ibland och på så vis reducera energianvändningen (Kjellén & Andersson 2002). Omröraren i rötslamlagret är den enda frekvensstyrda omröraren, men trots detta är det den omrörare som använder mest el. Denna är till skillnad från övriga omrörare sidomonterad, vilket skulle kunna innebära att den är mindre effektiv.

Omrörningen i röt-kamrarna är viktig för rötningsprocessen och energieffektiviseringsåtgärder måste därför ske utan att biogasproduktionen påverkas negativt. En möjlig åtgärd som kan påverka energianvändningen är att byta ut de mekaniska omrörarna mot ett annat omrörningssystem. I den mekaniska reningen finns effektiviseringspotential i att undersöka om alla omrörare i sandfånget måste köras kontinuerligt och om de måste det, undersöka om de är underdimensionerade och om det finns någon bättre lösning för sandfånget, exempelvis bottenluftning.

Kompressorer

Eftersom flera av kompressorerna använder mycket el kan det vara bra att göra en noggrannare utvärdering av deras energianvändning. Framför allt bör de kompressorer som driver torrslampumpen undersökas vidare, dels för att energianvändningen som beräknats i detta projekt är osäker och dels för att de använder mycket energi i förhållande till andra maskiner.

5.2 Energianvändning på Framtidens Främby

5.2.1 Utformning av framtidens anläggning

Nedan beskrivs de delar av den framtida anläggningen som har betydelse för energianvändningen. Beskrivningen är en sammanfattning av de förslag på ombyggd respektive nybyggd anläggning som tagits fram av en konsultfirma. En förenklad bild på utformningen av den nya anläggningen kan ses i *Figur 14*. Den stora skillnaden mellan den nybyggda och den ombyggda anläggningen är det biologiska reningssteget. Övriga huvudsakliga skillnader mellan de två framtidsscenarierna är vilken typ av slamförtjockare som används, om fällningskemikalier tillsätts i flockningskammare eller inte och hur rejektvattnet behandlas. På den ombyggda anläggningen används ofta befintliga bassänger medan helt nya bassänger byggs på den nybyggda anläggningen.

En mottagningsstation byggs där inkommande vatten lugnas ner i en bassäng innan det leds till rensavskiljningen. Dagens rens-galler byts ut mot rens-silar och samlings-skruben som transporterar det tvättade rens-et byts ut mot launderrännor. Precis som idag finns tvättpressar som tvättar och pressar rens-et. Sandfånget på det framtida reningsverket är större än det som finns idag och omrörarna ersätts av bottenluftare med kompressorer. Sandtransporten sker likt idag med sandskruv och mammutpump vidare till en sandtvätt.

Ett nytt steg med förluftning byggs till. Där blandas inkommande avloppsvatten och brunns-slam i två förluftningsbassänger, i syfte göra blandningen homogen inför vidare reningssteg. Förluftningsbassängerna innehåller bottenluftare med kompressorer, recirkulationumpar och slampumpar som pumpar slam vidare till det första slamlagret. Kemdoseringen sker efter förluftningen på samma sätt som idag på den ombyggda anläggningen, men på den nybyggda anläggningen tillförs fällningskemikalien i en flockningskammare med omrörare. Slammet som tas ut i den efterföljande försedimenteringen pumpas till det första slamlagret.

Den biologiska reningen på den ombyggda anläggningen sker precis som idag med aktivslamprocess. Bioreaktorerna i dagens luftningsbassänger byts dock ut mot kompressordrivna bottenluftare. Luftningsbassängerna ska också kunna delas upp i olika zoner, vilket möjliggör kväverening som kräver både luftade och syrefria zoner. I detta projekt antogs dock att ingen kväverening kommer finnas på den framtida ombyggda anläggningen. Efter luftningen leds vattnet till tre mellansedimenteringsbassänger. Det mesta av bioslammet som avskiljs i mellansedimenteringen återförs till aktivslamprocessen och en liten del överskottsslam pumpas vidare till det första slamlagret.

På den nybyggda anläggningen ingår kväverening i den biologiska reningen. Det biologiska reningssteget består av MBR-reaktorer som avskiljer biomassan och en del läkemedelsrester och mikroplaster. Bioslammet leds tillbaka till början av biosteget, förutom en liten del överskottsslam som pumpas till det första slamlagret.

På vägen till slutsedimenteringen sker dosering av efterfällningskemikalier. På den nybyggda anläggningen blandas kemikalierna med vattnet i en flockningskammare med omrörare. Slammet som sedimenterar i slutsedimenteringsbassängerna pumpas direkt till rötslamlagren och genomgår inte rötningsprocessen. Innan vattnet leds ut i recipienten tillkommer ytterligare ett steg på Framtidens Främby, läkemedelsrening med filter med granulerat aktivt kol (GAK). I detta projekt har dock inte läkemedelsrening inkluderats i energiberäkningarna.

Slam som pumpas ut från förluftningen och försedimenteringen samt överskottsslam från biosteget leds till det första slamlagret med omrörare. På den ombyggda anläggningen pumpas slammet vidare från lagren till den befintliga mekaniska förtjockaren som kompletteras med ytterligare en likadan förtjockare. På den nybyggda anläggningen används en cylinderformad gravitationsförtjockare med grindomrörare. I detta projekt antas TS-halterna före och efter förtjockningen vara samma som på dagens anläggning oavsett vilken förtjockare som används och även om andra TS-halter angivits i konsultrapporterna. Det förtjockade slammet pumpas till ytterligare ett slamlager innan det förs in i röt-kammarna. I lagret utjämnas TS-halten på slammet med hjälp av omrörning. Informationen om lager för fett, externslam och processpillvatten är otydlig i konsultrapporterna. I detta projekt antas därför att dagens fettlager finns kvar och att externslamlagret fördubblas i storlek eftersom mängden processpillvatten förväntas fördubblas.

Den framtida anläggningen har två röt-kammare med en ny större volym som har beräknats i avsnitt 5.3.2. Rötningsprocessen är likt idag mesofil med en temperatur på 35 - 37 °C. Varje röt-kammare har en egen cirkulationspump och värmeväxlare för uppvärmning av slammet för att undvika driftstopp.

5.2.2 Energianvändning för biologisk rening med MBR

Baserat på litteraturvärden är det troligt att den specifika energianvändningen för MBR-processen på Framtidens Främby kommer vara mellan 0,4 och 1,0 kWh per m³ behandlat vatten om anläggningen fungerar som den ska (Ladewig & Al-Shaeli 2017; Judd & Judd 2011). Om problem med igensättning uppstår kan energianvändningen komma att bli högre (Krzeminski et al. (2017)).

Det är inte troligt att en nystartad MBR-process kommer vara energioptimerad eftersom driftsäkerhet kommer prioriteras högst. Det är också troligt att anläggningen till en början kommer vara överdimensionerad eftersom den dimensioneras efter förväntad belastning år 2040, vilket också bidrar till sämre energieffektivitet. Däremot kommer det nya reningsverket inkludera en mottagningsstation med möjlighet att jämna ut inflödet till reningsverket, vilket kan minska energianvändningen för MBR-anläggningen som gynnas av en stabil hydraulisk belastning (Krzeminski et al. 2017). Dessutom kan energianvändningen bli lägre än förväntat genom att tekniken hela tiden förbättras då mycket forskning och utveckling idag fokuserar på att minska energibehovet hos MBR. Flera av nyckeltalen i avsnitt 3.3.4 kommer också från studier som bedrivits för flera år sedan.

Energianvändningen i biosteget har stor påverkan på reningsverkets totala energianvändning och därför kan små skillnader i specifik energianvändning för MBR få stora konsekvenser för den totala energianvändningen. För att påvisa betydelsen av energianvändningen i biosteget har beräkningar gjorts både med ett troligt värde på 0,8 kWh/m³ och ett best case-värde på 0,4 kWh/m³.

Trots att flera studier har visat att slamproduktionen är mindre för MBR än för konventionella aktivslamprocesser (Judd & Judd 2011) antogs i detta projekt att slamproduktionen är densamma i de båda framtidsscenarierna för att underlätta beräkningen av framtidens biogasproduktion.

5.2.3 Beräknad energianvändning

Energianvändningen på Framtidens Främby med biologisk rening i form av aktivslamprocess exklusive gasanvändning beräknas bli 4,9 GWh, vilket är 47 % mer än idag. *Figur 15* visar att ökningen är störst för kategorin övrig el. Detta beror på att framtidens anläggning innehåller fler processteg än dagens anläggning. Förluftning, efterfällning inklusive sedimentering, behandling av rejektvatten samt extra slamlager har tillkommit.

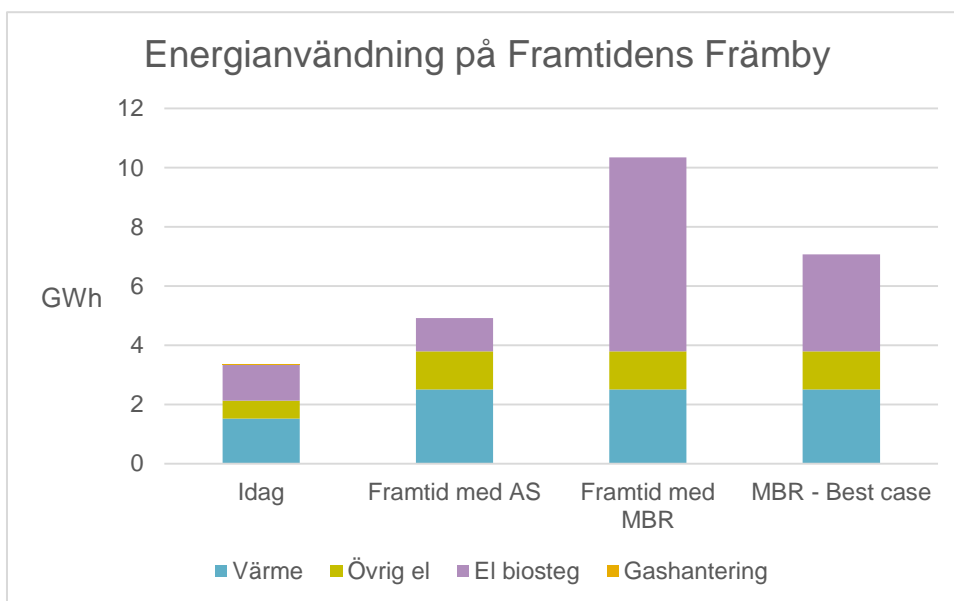
Den stora ökningen i energianvändning för värme som kan ses i *Figur 15* kan förklaras av att volymen processpillvatten förväntas fördubblas i framtiden samtidigt som värmeanvändningen antogs vara proportionell mot volymen substrat som tillförs röt-kammarna. Processpillvattnet har stor volym i förhållande till energiinnehåll jämfört med de andra röt-kammarsubstraten.

Energianvändningen i det biologiska reningssteget förväntas minska med 8 % på Framtidens Främby trots att belastningen ökar med 39 %. Energianvändningen beräknas bli 0,14 kWh/m³ behandlat vatten, vilket är lågt i jämförelse med de värden på 0,2 - 0,4 kWh/m³ som anges i litteratur (Huber Technology u.å.; Fenu et al. 2010). Orsaken till minskningen är att beräkningen baseras på antaganden om att energi-effektivisering kommer ske, även om resultaten i avsnitt 5.1.1 visar att luftningen på Främby's reningsverk varken utgör en orimligt stor del av den totala energianvändningen eller är orimligt hög i relation till volymen behandlat vatten. I projektet antogs dock att dagens bioreaktorer kommer ersättas av bottenluftare, vilket med stor sannolikhet kommer minska energianvändningen eftersom bottenluftare är den luftningsteknik som är mest energieffektiv (Jenkins & Wanner 2014). Dessutom tyder den

låga energianvändningen för luftarna på Borlänges reningsverk på att en effektivare luftning är möjlig. Däremot är det osäkert om luftningen kan bli lika energieffektiv som luftningen på Borlänges reningsverk eftersom luftningsbehovet inte bara beror på inflödet till biosteget, vilket har antagits i detta projekt, utan också av vattnets egenskaper. Vid beräkningen användes en specifik energianvändning för luftningen på 0,12 kWh/m³ som ligger mellan dagens på 0,17 kWh/m³ och Borlänges på 0,068 kWh/m³. Eftersom energianvändningen för luftningen antogs vara proportionell mot volymen behandlat avloppsvatten beror resultatet mycket på den uppskattning som gjorts av volymen inkommande avloppsvatten i framtiden.

Energieffektivisering antogs också för slampumparna i slutsedimenteringen genom att samtliga pumpar antogs vara varvtalsstyrda likt de i den gamla delen av dagens slutsedimentering. Den specifika energianvändningen i kWh/m³ slamflöde som användes vid beräkningen baseras på slampumparna i den gamla delen av dagens slutsedimentering. Energinvändningen i förhållande till flöde är låg för dessa pumpar jämfört med andra slampumpar på reningsverket men det finns en osäkerhet i detta värde eftersom slamflödet från dagens slutsedimentering saknar flödesmätning.

Energianvändningen på Framtidens Främby med MBR i den biologiska reningen beräknas bli 10,3 GWh. Detta är mer än dubbelt så mycket som energianvändningen för alternativet med aktivslamprocess och mer än tre gånger så mycket som dagens energianvändning. Jämförelsen med aktivslam-anläggningar är inte helt korrekt eftersom MBR uppnår högre renhet på vattnet och även inkluderar kväverening, vilket kräver mer energi. Den höga energianvändningen är dock ett välkänt problem med MBR. Då nyckeltalen för energianvändning hos MBR varierar stort finns även ett best case-scenario som kan ses i *Figur 15*. I detta scenario användes en specifik energianvändning på 0,4 kWh/m³, vilket är den lägsta energianvändningen som uppnåtts för MBR-processer hittills (Judd & Judd 2011).



Figur 15. Energianvändning på Framtidens Främby med olika metoder för biologisk rening. Energianvändningen för dagens användning finns med för jämförelse. Gashantering är inte inkluderad för Framtidens Främby.

Vid beräkningarna antogs energianvändningen för slambehandlingen vara proportionell mot behandlade slamvolym, vilka är svåra att uppskatta. Exempelvis har TS-halter betydelse för hur stora volymflödena blir och därför påverkas resultaten av hur väl förtjockning och avvattning fungerar. Vid beräkningarna antogs all TS bevaras i förtjockning och avvattning, vilket innebär att inget slam skulle kunna tas ur rejektivattnet i SBR-reaktorn. Trots detta inkluderades ett visst slamuttag i beräkningarna. Denna typ av inkonsekventa resonemang har använts för att underlätta beräkningarna i de fall eventuella felaktigheter inte antas ha betydande påverkan på det sammanlagda resultatet.

Uppskattningen av hur mycket slam som kommer produceras på Framtidens Främby är osäker eftersom slamproduktionen på ett reningsverk inte bara beror på vilka reningstekniker som används utan också på driften av reningsprocesserna. För enkelhets skull antogs slamflödet till röt-kamrarna vara samma som idag i förhållande till pe. Detsamma gäller andelen bioslam och primärslam. Ytterligare en liten del slam som inte rötas tas också ut och denna volym uppskattades vara liten för att slamuttaget i framtiden inte skulle skilja så mycket från slamuttaget idag. Hur slamuttaget har fördelats på de olika reningsstegen påverkar inte den totala energianvändningen förutom då den specifika energi-användningen skiljer mellan olika pumpar.

Inkommande avloppsvatten förväntades öka med 39 %, att jämföra med antalet pe och därmed även slamvolymen som förväntades öka med 48 %. Ökningen i inkommande flöde är därmed procentuellt mindre än ökningen i antalet pe, vilket beror på att volymen inkommande vatten inte bara beror på antalet anslutna personer utan även på hur mycket industriellt spillvatten som tillförs ledningsnätet och hur stort inläckaget av tillskottsvatten är. Mängden tillskottsvatten antogs vara oförändrad i framtiden men skulle kunna öka på grund av att avloppsnätet förlängs vid anslutning av de yttre verken eller minska genom tätningsarbete som förhindrar inläckage. Eftersom elanvändningen för biosteget baserades på volymen behandlat vatten har uppskattningen av volymen inkommande avloppsvatten stor betydelse för den resulterande energianvändningen för hela reningsverket. Luftningsbehovet och därmed också energianvändningen beror också på innehållet i avloppsvattnet. Antagandet om att innehållet i vattnet kommer vara samma i framtiden som idag trots att sammansättningen av spillvatten från hushåll och industri och tillskottsvatten har ändrats är därför ytterligare en felkälla.

Energianvändningen för pumpar antogs öka proportionellt med det pumpade flödet. Detta antagande är en förenkling som inte tar hänsyn till att pumparnas energianvändning också påverkas av pumptrycket, det vill säga uppfodringshöjden (Olsson 2008). Resultaten visar att energianvändningen per flödesenhet för olika slampumpar varierar mellan 4,1 och 13,2 kWh/100 m³. Andra förklaringar till skillnaderna är olika pumptyper, olika karaktär hos det pumpade slammet och osäkerheter i de värden för energianvändning och flöden som använts vid beräkningarna.

Vilka nyckeltal som har valts för den helt nya utrustningen har stor betydelse för den resulterande energianvändningen för de nya processtegen. Beräkningarna av energianvändningen för processteg som baserades på hur energianvändningen ser ut på dagens anläggning är också osäkra eftersom det inte finns någon koppling mellan utrustningen på dagens anläggning och framtidens anläggning om ett helt nytt reningsverk byggs. Det är troligt att den nya utrustningen kommer vara bättre dimensionerad och genomgående mer energieffektiv än den utrustning som finns idag, vilket inte har beaktats vid beräkningarna. Tidigare energikartläggningar av olika reningsverk i Sverige har också visat att energi-användningen skiljer stort mellan olika anläggningar och olika processteg. Den metod som användes för att skala upp energianvändningen bortser också från de skillnader i specifik energianvändning som finns mellan reningsverk av olika storlek (Maktabifard, Zaborowska & Makinia 2018). Om Främby växer är det troligt att den specifika energianvändningen kommer minska.

Då energiberäkningarna för framtiden innehåller många antaganden, uppskattningar och felkällor bör resultaten inte tolkas som exakta. Energianvändningen för enskilda maskiner i Tabell A7 i Appendix bör ej analyseras var för sig utan utgör tillsammans resultatet. Slutsatsen som kan dras från resultaten är att effektivisering av dagens aktivslamprocess kan ge stora energivinster. Det är också tydligt att energianvändningen kommer öka betydligt om MBR används på den framtida anläggningen, men att det finns stora möjligheter att påverka energianvändningen genom drift och underhåll.

5.2.4 Rekommendationer inför framtiden

För att främja en energieffektiv reningsprocess bör det vara lätt att övervaka energianvändningen på Framtidens Främby. Stora maskiner bör utrustas med energimätare som registrerar energianvändningen och visar den i realtid så att effekterna av energieffektiviseringsåtgärder eller variationer i driftsätt enkelt kan utvärderas. Även andra processparametrar är viktiga att övervaka eftersom de gör att fler delar av processen kan styras och anpassas efter aktuell belastning. För detta krävs att framtidens anläggning är utrustad med olika typer av mätare i alla delar av processen och fungerande styr- och reglersystem. Utrustning såsom pumpar, omrörare och blåsmaskiner bör vara frekvensstyrda och styras efter flöde eller liknande.

Verket kommer att dimensioneras efter 90 000 pe men denna belastning kommer inte uppnås de närmaste åren. Det är därför bra om det finns flera parallella linjer med möjlighet att driftsätta dem vid olika tid. Om elektriska maskiner såsom pumpar också dimensioneras efter denna belastning kommer de vara överdimensionerade hela sin livstid. Ur energisynpunkt är det därför viktigt att pumpar och annan utrustning dimensioneras efter den belastning som förväntas råda under deras livstid. Det är också viktigt att välja effektiv utrustning, exempelvis motorer med bra verkningsgrad och inte använda grövre pumpar än nödvändigt.

Effektstyrning kan ge samma resultat som energieffektivisering i form av reducerade energikostnader och minskad miljöpåverkan och bör därför också tas i beaktande. Många maskiner på dagens Främby styrs efter belastningen på reningsverket som i sin tur beror helt på inflödet till verket som inte går att kontrollera. Möjligheten att jämna ut flödet med en mottagningsstation på den framtida anläggningen kan därför ge lägre effekttoppar och en mer välfungerande process. Potential för effektstyrning finns i slamavvattningsprocessen med efterföljande torrslampumpning. Framför allt kompressorerna som driver torrslampumpen är stora energianvändare som inte körs kontinuerligt. Tack vare rötslamlagren avgör inte heller reningsverkets aktuella belastning när de måste köras. Med en tidsvarierande prissättning i framtiden skulle elkostnaderna kunna minskas om slamavvattningen körs när elpriset är lågt. På samma sätt möjliggör de två första slamlagren att slamförtjockning och tillhörande pumpar kan köras vid väl valda tider. I de delar som idag körs kontinuerligt kan det finnas möjligheter att stänga av maskinerna under korta perioder när effektbrist råder utan att påverka reningsprocesserna. Detta gäller exempelvis luftarna i aktivslamprocessen, luftarna som rengör MBR-membranen och olika typer av omrörare.

Förutom eventuella framtida ekonomiska incitament är effektstyrning något som kan göra Främby reningsverk till en viktig aktör i elsystemet ur ett större perspektiv. Främby är en stor elanvändare som kan bidra till att stabilisera elsystemet. Eftersom företaget FEV som Främby avloppsreningsverk är en del av även bedriver elhandel och ansvarar för elnätet borde intresse finnas att arbeta mot mål som ligger utanför reningsverkets verksamhet.

Motiven för att minska energianvändningen på ett reningsverk kan vara både ekonomiska och miljömässiga. Om målet är en miljömässigt hållbar reningsprocess är energianvändningen inte det enda som bör beaktas. Nyttjandet av andra resurser såsom rent vatten och kemikalier bidrar också till negativ miljöpåverkan. Fler processer än sandtvätten skulle kunna förses med vatten från slutsedimenteringsbassängerna istället för från dricksvattnenätet som idag. Målet om energineutralitet skulle till och med kunna missgynna andra miljömål, exempelvis om en reningsprocess som kan minska utsläppen till vattenmiljön väljs bort på grund av hög energianvändning.

Utsläpp till recipient och luft har stor betydelse för miljöpåverkan och bör sättas i relation till energianvändningen. Nedbrytningen av slammet och därmed också metanbildningen fortsätter ofta efter att slammet lämnat rötammaren (Schnürer & Jarvis 2009). Eftersom rötslammet på Främby förvaras i ett öppet lager är det troligt att metangas läcker till atmosfären och bidrar till växthuseffekten. Det sker även utsläpp av andra gaser som bildas i reningsprocessen, exempelvis kan växthusgasen lustgas bildas i den biologiska reningen vid ofullständig nitrifikation och denitrifikation (Baresel et al. 2017).

5.3 Förbättrat resursutnyttjande med biogas

5.3.1 Biogas på dagens Främby

5.3.1.1 Röttningsprocess

Fyra olika substrat rötas i rötammarna på Främby idag: slam från Främby reningsverk, externslam från FEV:s yttre reningsverk, fett från restaurangers fettfällor och processpillvatten från två lokala producenter av hygienprodukter. Slammet från Främby består ungefär till hälften av bioslam och till hälften av primärslam. Data från 2017 som användes vid biogasberäkningarna visar dock på ett innehåll av 58 % primärslam för just detta år.

Rötammarnas volym är 2 300 m³ och röttningsprocessen är mesofil. Tabell 4 visar data för dagens röttningsprocess tillsammans med data som användes vid dimensioneringen av rötammarna (Falun Energi & Vatten 2018b).

Tabell 4. Data för dagens röttningsprocess i jämförelse med data som användes vid dimensioneringen av rötammarna år 2008.

	Dimensionering 2008	Idag (2017)
Antal pe	55 000	46 000
Inflöde rötammare [m ³ /d]	160	120
TS-halt [%]	4,5	4,3
GF-halt [% av TS]	71	78
Massflöde TS [ton/d]	7,4	5,1
Massflöde GF [ton/d]	5,3	4,0
Organisk belastning [kg GF/m ³ ,d]	2,3	1,7
Hydraulisk uppehållstid [d]	14	19
Biogasproduktion [Nm ³ /d]	2 200	2 400
Nedbrytningsgrad [%]	45	55

Idag är belastningen på Främby reningsverk nästan uppe i de 55 000 pe som rötkamrarna dimensionerades för, men inflödet är långt under det dimensionerade flödet. Både TS- och GF-halten är högre än de som användes vid dimensioneringen men inflödet av TS och GF är ändå lägre än förväntat, vilket också resulterar i en lägre organisk belastning. Eftersom mängden GF är avgörande för hur mycket biogas som kan produceras borde biogasproduktionen vara lägre än den förväntade, men den faktiska biogasproduktionen är istället högre än den förutspådda.

Ett resultat av att det faktiska inflödet till rötkamrarna är lägre än det dimensionerade flödet är att uppehållstiden i rötkamrarna blir längre. Den längre uppehållstiden kan vara en förklaring till varför biogasproduktionen idag är högre än förväntat. När substratet är i rötkamrarna längre tid hinner mer av dess GF omvandlas till metangas (Schnürer & Jarvis 2009). Detta bekräftas av att nedbrytningsgraden på 55 % är högre än förväntat och hög enligt litteraturvärden (Bachmann 2015; Wan et al. 2011).

Upphållstiden för dagens rötningsprocess är normal enligt litteraturen medan den organiska belastningen är låg (Bachmann 2015; Schnürer & Jarvis 2009). Rötkamrarna på Främby har inte tömts sedan de togs i drift 2009, varför det är rimligt att anta att volymen idag är lägre än den angivna. Detta innebär att den verkliga organiska belastningen kan vara högre och att uppehållstiden kan vara kortare än de beräknade värdena.

5.3.1.2 Biogasproduktion

Biogasproduktionen per dag hade under år 2017 ett medelvärde på 2 400 Nm³, vilket motsvarar en genomsnittsproduktion på 100 Nm³/h. Den maximala produktionen under en dag nådde över 5 000 Nm³ enligt driftdata från VA-Operatör. Metanhalten var i genomsnitt 61 %, vilket är något lägre än värden angivna i Bachmann (2015).

Metanutbytet för substratmixen är 365 Nm³ per ton GF och liknar de metanutbyten som uppmätts vid samrötning av avloppsslam och fett av Davidsson et al. (2008), men är lägre än de som uppmätts av Yalcinkaya & Malina (2015a). Metanutbytet på Främby är ändå ovanligt högt eftersom dessa studier utförts i experimentell skala och därför gett bättre resultat än verkliga processer. Enligt litteraturvärden borde slammet ha ett metanutbyte på ungefär 300 Nm³/ton GF och fett lägre än 700 Nm³/ton GF (Bachmann 2015; Rodriguez 2011; Wan et al. 2011; Carlsson & Uldal 2009). Beräknade metanutbyten för de olika substraten kan ses i Tabell 5.

Tabell 5. Sammansättning och metanutbyte för substratmixen i Främby's rökammare år 2017.

	Andel av GF [%]	Metanutbyte [Nm ³ /ton GF]
Totalt	100	365
Slam	90	330
Fett	2,8	680
Processpillvatten	6,9	688

Eftersom inga åtgärder gjorts för att optimera gasproduktionen är det troligt att metanutbytet på Främby skulle vara lågt i förhållande till litteraturvärden. En förklaring till det stora biogasutbytet på Främby kan vara att samrötningen av olika substrat förbättrar biogasutbytet (Carlsson & Uldal 2009). När metanutbytet från de ingående substraten utvärderas var för sig förbises eventuella effekter från samrötningen. Det höga metanutbytet för hela substratmixen gjorde att det beräknade metanutbytet för processpillvattnet blev högt. Karaktären hos processpillvattnet är inte känd men det är troligt att metanutbytet liknar det hos fett.

En möjlig felkälla som kan ha påverkat resultaten är antagandet om att densiteten är 1 ton/m³ för alla substrat, vilket har betydelse för massan TS och GF. Eftersom slammet avskiljs från vattenfasen med sedimentering borde densiteten för slammet vara något högre än för vattnet. Enligt Andreoli, von Sperling & Fernandes (2007) varierar densiteten hos slam mellan 1,001 ton/m³ för bioslam och 1,1 ton/m³ för avvattnat slam med en TS-halt på 40 %. Om densiteten hos slammet har underskattats innebär det att mängden TS och GF som tillförs röt-kamrarna i verkligheten är högre än vad beräkningarna visar. Ett större inflöde av GF innebär i sin tur att metanutbytet egentligen är lägre och att den organiska belastningen är högre. En densitet på 1 ton/m³ är däremot ett rimligt antagande för processpillvattnet som har låg TS-halt och liknar vatten till karaktären. En eventuellt felaktig densitet för fett har mindre betydelse för resultatet eftersom andelen fett är liten. Data från mätningar av slamflöden, gasflöden, TS- och GF-halter kan också innehålla felaktigheter. I beräkningen användes endast värden från 2017, vilket ger ökad känslighet för eventuellt felaktiga värden än om ett medelvärde av flera år hade använts.

5.3.1.3 Gasmotor

På dagens Främby förbränns biogasen i en gasmotor som producerar el och värme. Gasmotorn är en kolvmotor med en medeleffekt på 190 kW och en maxeffekt på 230 kW, enligt beräkningar baserade på driftdata. Elverkningsgraden är 31 % enligt driftdata från 2014 - 2017. Biogasen trycksätts av en boosterfläkt och renas i kolfilter innan förbränningen. Motorn har stora driftproblem, vilket har resulterat i att den stått stilla i perioder och att all producerad biogas då har facklats bort. Möjliga förklaringar till driftproblemen är att motorn är en ombyggd lastbilmotor som inte är gjord för kontinuerlig drift och att gasens kvalitet är för dålig. På Borlänges reningsverk finns en liknande gasmotor som har högre driftsäkerhet.

Gasmotorn producerade i genomsnitt 860 MWh el och 1 600 MWh värme per år 2014 - 2017, under antagandet att värmeverkningsgraden är 60 %. Detta är 46 % av reningsprocessens årliga elbehov och 110 % av röt-kamrarnas årliga värmebehov. Elen som produceras används dock inte på reningsverket utan säljs till elnätet. När gasmotorn är i drift överstiger värmeproduktionen behovet, vilket gör att värme måste kylas bort. Vid driftstopp används istället fjärrvärme för uppvärmning av röt-kamrarna.

Enligt driftstatistik stod gasmotorn helt stilla 40 % av dagarna under åren 2014 – 2017. För enbart år 2017 var siffran 53 %. Under år 2017 har mindre än hälften av den producerade biogasen använts i gasmotorn och resten har facklats bort, vilket tyder på att den gasmotor som finns idag är en dålig lösning. Driftdata för gasmotorn kan ses i Tabell A16 i Appendix.

5.3.2 Biogas på Framtidens Främby

5.3.2.1 Biogasproduktion

Röt-kammarvolymen som behövs vid 90 000 pe är beräknad till 3 500 m³, att jämföra med en volym på ca 4 000 m³ som anges i konsultrapporterna (Tyréns 2018a, 2018b). Röt-kammarvolymen är starkt beroende av de antaganden som har gjorts om slamförtjockning på Framtidens Främby. I beräkningen antogs samma TS-halt som idag på ca 7 % på slammet som förs in i röt-kamrarna, medan konsultrapporterna föreslår förtjockning till 3 - 5 % TS. En sämre förtjockning skulle kräva en större röt-kammarvolym.

Med den beräknade röt-kammarvolymen och en belastning på 70 000 pe blir uppehållstiden 18 dagar och den organiska belastningen blir 1,8 kg GF/m³,d vilket kan ses i Tabell 6. En lång uppehållstid och

en låg organisk belastning är ett förväntat resultat då optimerade värden på organisk belastning (2,3 kg GF/m³,d) och uppehållstid (15 dagar) inte ska uppnås förrän då belastningen ökat till 90 000 pe.

En jämförelse av uppehållstider och organiska belastningar visar att scenariot med 70 000 pe liknar den situation som råder på Främby idag, varför det är rimligt att utgå från dagens metanutbyte för respektive substrat vid beräkningen av framtidens metanproduktion.

Tabell 6. *Processparametrar för Främby's röt-kammare idag och i framtiden.*

	Idag (2017)	Framtid (70 000 pe)
Inflöde röt-kammare [m ³ /d]	120	200
Massflöde GF [ton/d]	4,0	6,5
Röt-kammarvolym [m ³]	2 300	3 500
Organisk belastning [kg GF/m ³ ,d]	1,7	1,8
Hydraulisk uppehållstid [d]	19	18

Substratmixen på Framtidens Främby har nästan samma sammansättning som dagens substratmix, vilket resulterar i ett liknande metanutbyte enligt Tabell 7. Mängden externslam minskar på grund av nedläggningen av fyra av de yttre verken, men den totala mängden slam ökar ändå till följd av en större belastning på Främby reningsverk. Mängden fett antogs vara oförändrad medan volymen processpillvatten fördubblas. En ökad volym processpillvatten gynnar metanproduktionen eftersom det beräknade metanutbytet från processpillvattnet är högt. Hur mycket processpillvatten som kommer tas emot och rötas på Främby i framtiden är dock osäkert. Ett möjligt scenario är att inget processpillvatten alls kommer tas emot och då blir biogasproduktionen 16 % lägre än om den mottagna volymen fördubblas enligt det antagande som har använts. Dessutom förändras processparametrarna för rötningen och förhållandena i röt-kamrarna.

Tabell 7 visar att det totala metanutbytet i framtiden beräknas bli ungefär lika stort som idag. Biogasproduktionen har beräknats till 3 900 Nm³ per dag vilket är en ökning med 62 % jämfört med idag. Data och beräkningar kan ses i Appendix. Tabell A12 och Tabell A13 innehåller data för slam och andra substrat. Tabell A16 visar data på dagens gasproduktion och Tabell A11 innehåller beräknade biogasutbyten.

Tabell 7. *Biogasproduktion på Främby idag och i framtiden.*

	Idag (2017)	Framtid (70 000 pe)
Metanutbyte [Nm ³ /ton GF]	365	367
Metanproduktion [Nm ³ /d]	1 400	2 400
Metanhalt [%]	60,5	61,1
Biogasproduktion [Nm ³ /d]	2 400	3 900
Energiinnehåll gas [MWh/år]	5 200	8 600

5.3.2.2 Användningsområden för biogasen

Nedan presenteras förutsättningarna för att använda biogasen på Framtidens Främby till att producera värme, kraftvärme eller fordonsgas. Beräkningarna utgår från gasens energiinnehåll på 8 600 MWh per år som har beräknats utifrån ett energiinnehåll på 10 kWh/Nm³ metangas (Svenskt Gastekniskt Center 2012). Beräkningar och data kan ses i Tabell A14 och Tabell A15 i Appendix.

Värme

Värmeproduktionen med gaspanna förväntas bli 7 300 MWh per år vilket är nästan tre gånger så mycket som rötkamrarnas värmebehov. Verkningsgraden antogs vara 85 % (Runevad 2018). Om all värme säljs som fjärrvärme kan intäkterna bli 1 100 000 kronor per år, baserat på ett fjärrvärmepris på 150 kr/MWh (Runevad 2018). Investeringskostnaden på 2 000 000 kr uppskattades baserat på en offert för en panna till dagens anläggning. Energianvändningen för pannan är också uppskattad. Resultaten för gaspannan finns redovisade i Tabell 8.

Tabell 8. Förutsättningar för värmeproduktion med gaspanna på Framtidens Främby.

Gaspanna	
Kapacitet [kW]	840
Värmeproduktion [MWh/år]	7 400
Värmens värde [kr/år]	1 100 000
Investeringskostnad [kr]	2 000 000
Självförsörjandegrad värme [%]	300
Energianvändning [MWh/år]	70

Fördelarna med en gaspanna är att den är driftsäker och har en låg investeringskostnad (Bioenergiportalen 2012e). Just driftsäkerhet är viktigt på Främby eftersom den gasmotor som används idag har haft stora driftproblem, förmodligen till följd av dålig kvalitet på biogasen. Värmeproduktionen med en gaspanna överstiger rötkamrarnas behov, så för att all värme ska kunna tas till vara måste gaspannan kopplas till fjärrvärmenätet. Andra delar av Främby reningsverk är kopplade till fjärrvärmenätet redan idag, men värmen som produceras av gasmotorn kan endast användas för att värma upp rötkamrarna.

Kraftvärme

Med en gasmotor för kraftvärme beräknas 2 600 MWh el och 3 000 MWh värme kunna produceras varje år på Framtidens Främby om elverkningsgraden och värmeverkningsgraden antas vara 30 % respektive 60 %, baserat på driftdata för dagens gasmotor och uppgifter i Svenskt Gastekniskt Center 2012. Elproduktionen täcker en tredjedel av elbehovet för reningsprocessen med MBR och hela elbehovet för reningsprocessen med aktivslamprocess som har beräknats i avsnitt 5.2.3. Elen som produceras skulle också kunna användas som hushållsel i drygt 500 villor om elanvändningen är 5 000 kWh per villa och år (Konsumenternas energimarknadsbyrå 2019). Värmeproduktionen är dubbelt så stor som värmebehovet för rötkamrarna.

Det totala värdet på elen och värmen har beräknats till 2 000 000 kr. Ett elpris på 350 kr/MWh uppskattades utifrån en prognos från Skellefteå Kraft som visar på ett sjunkande elpris fram till år 2023. Utöver detta förväntas ett tillskott på 100 kr/MWh från elcertifikat. Priset uppskattades utifrån historiska prisdata för elcertifikat (Energimyndigheten u.å.). Det valda priset är något lägre än medelpriset de senaste åren eftersom statistiken visar att priset på elcertifikat har sjunkit stadigt de senaste tio åren. Priset för värme antogs precis som för gaspannan vara 150 kr/MWh (Runevad 2018). Investeringskostnaden på 4 500 000 kr baserades på anläggningens kapacitet för el och uppgifter från Sundberg, Svensson & Johansson 2011. Energianvändningen för kraftvärme skalades upp från dagens gasmotor baserat på biogasflödet. Alla beräknade värden kan ses i Tabell 9.

Tabell 9. Förutsättningar för kraftvärmeproduktion med gasmotor på Framtidens Främby.

Gasmotor	
Kapacitet el [kW]	300
Elproduktion [MWh/år]	2 600
Värmeproduktion [MWh/år]	5 200
Elens värde [kr/år]	1 200 000
Värmens värde [kr/år]	780 000
Investeringskostnad [kr]	4 500 000
Självförsörjandegrad el AS [%]	110
Självförsörjandegrad el MBR [%]	33
Självförsörjandegrad värme [%]	210
Energianvändning [MWh/år]	98

Kraftvärmeproduktion passar bra på Framtidens Främby med avseende på anläggningens storlek och volymen producerad biogas (Bachmann 2015). Den totala verkningsgraden vid kraftvärmeproduktion är högre än vid enbart värmeproduktion och mer av biogasens energi kommer därför kunna tas till vara med kraftvärmeproduktion. Eftersom den befintliga gasmotorn på Främby reningsverk har haft stora driftproblem kan en mikroturbin vara ett alternativ, även om en turbin också är känslig för låg gaskvalitet (Greer 2012). Fördelen är att turbinen har lång livslängd och låga underhållskostnader (Brown et al. 2010; Greer 2012). Om en tillräckligt god gaskvalitet kan uppnås kan en mikroturbin därför vara ett alternativ som minskar arbetsbelastningen för personalen på Främby.

En stor osäkerhet i den ekonomiska beräkningen är priset på el eftersom det kan variera mycket och därför är svårt att förutspå. Det undersökta scenariot med en belastning 70 000 pe på Främby ligger längre fram i tiden än den använda elprisprognosen sträcker sig. Investeringskostnaden är också osäker eftersom de investeringskostnader som presenteras i Sundberg Svensson & Johansson 2011 uppvisar ett brett intervall.

Fordonsgas

På Framtidens Främby kan 880 000 Nm³ uppgraderad fordonsgas med en metanhalt på 97 % produceras. Densiteten på den uppgraderade gasen antogs vara 0,75 kg/Nm³ (E.ON Biofor Sverige AB u.å.). Ett pris på 9 kr/kg för fordonsgas antogs, vilket ger ett värde på gasen på 5 900 000 kr per år. Prisuppgiften kommer från Borlänge Energis kalkyl från år 2018. Fordonsgasen kan användas till att driva 1 100 personbilar om bränsleåtgången per bil är 0,7 l/mil och den genomsnittliga körsträckan är 1 200 mil per år (Naturvårdsverket 2018a, Trafikanalys 2018).

Investeringskostnaden på 8 900 000 kr beräknades med hjälp av nyckeltal från Bauer et al. 2012 för en uppgraderingsanläggning med membranteknik och är något lägre än den kostnad som finns angiven i Borlänge Energis underlag inför deras investering av en uppgraderingsanläggning, som dessutom har lägre kapacitet. Energianvändningen baserades på nyckeltal från Bauer et al. 2012. Tabell 10 visar resultaten som har beräknats för fordonsgasen.

Tabell 10. Förutsättningar för produktion av fordonsgas genom uppgradering på Framtidens Främby.

Fordonsgas	
Volym gas [Nm ³ /år]	880 000
Massa gas [kg/år]	660 000
Gasens värde [kr/år]	5 900 0000
Investeringskostnad [kr]	8 900 000
Energianvändning [MWh/år]	420

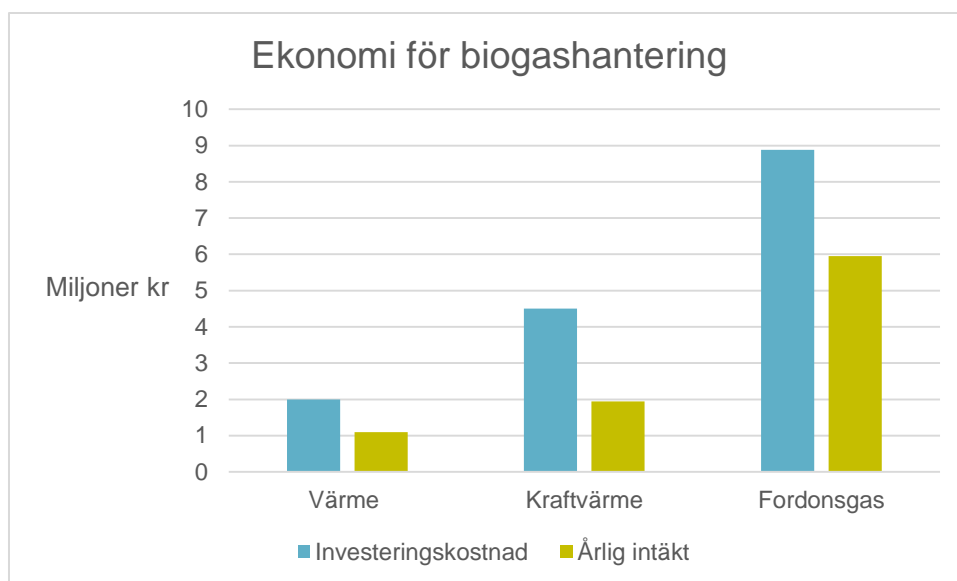
Biogasproduktionen på Framtidens Främby är i nederkant av vad som behövs för en investering i en uppgraderingsanläggning. De olika teknikerna har liknande investeringskostnad och energianvändning men membran och vattenskrubber verkar finnas i minst skala (Bauer et al 2012). Borlänge Energi har valt membranteknik för sin anläggning. Eftersom biogasproduktionen är liten och det finns tydliga storskalefördelar användes de högsta värdena från litteraturen vid beräkning av energiåtgång och investeringskostnader. En risk med att investera i en uppgraderingsanläggning är att det inte finns någon garanterad köpare av fordonsgasen.

Jämförelse av olika användningsområden

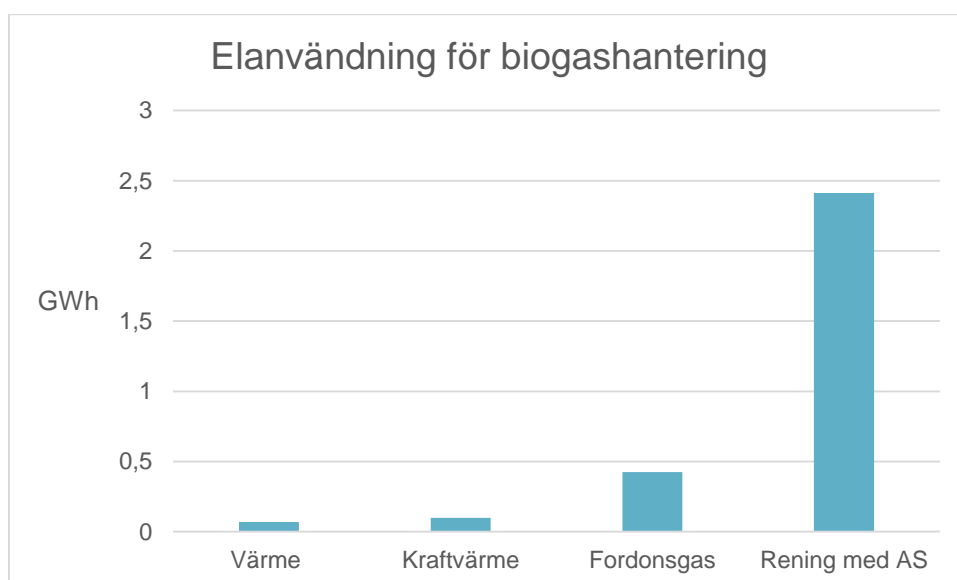
Energiberäkningarna är i många fall baserade på antaganden och osäkra uppskattningar vilket påverkar resultaten. Detta gäller exempelvis verkningsgrader som är avgörande för energiproduktionen men specifika för olika anläggningar och därför svåra att uppskatta. Vid beräkningarna antogs också konstant drift av anläggningarna. Vid verklig drift förekommer driftstopp vilket gör att energiproduktionen blir lägre. Dessutom antogs ett konstant gasflöde vilket innebär att gaspannan och gasmotorn kan köras på full effekt hela tiden samtidigt som all gas kan tas omhand, vilket inte alltid är fallet i verkligheten.

Många förenklingar gjordes också vid de ekonomiska beräkningarna. Endast investeringskostnaden för själva anläggningarna togs med, även om Borlänge Energis kalkyl visar att anläggningen bara utgör hälften av de totala investeringskostnaderna för en uppgraderingsanläggning. Hur lönsam investeringen är påverkas också av driftkostnader, vilka heller inte inkluderades i detta projekt.

På grund av många förenklingar utgör resultaten av de ekonomiska beräkningarna ingen komplett investeringskalkyl. Resultaten som presenteras i *Figur 16* visar dock tydligt att storleksordningen på både investeringskostnad och årliga intäkter skiljer mycket mellan de tre jämförda teknikerna. Både kostnader och intäkter är störst för uppgraderingsanläggningen och minst för gaspannan. Dessa resultat är väntade och tyder på att uppskattningarna av kostnader och priser som gjorts är rimliga. Förhållandet mellan investeringskostnad och årlig intäkt är störst för kraftvärmen och lägst för fordonsgasen, men dessa resultat är starkt beroende av de förenklingar som gjorts. Exempelvis tyder den stora elanvändningen för fordonsgasen i *Figur 17* på höga driftkostnader för en uppgraderingsanläggning, vilket skulle förändra resultatet. Elanvändning för värme- och kraftvärmeproduktion utgör däremot bara en liten del av den totala elanvändningen på reningsverket enligt *Figur 17*.



Figur 16. Investeringskostnader och årliga intäkter för olika användningsområden för biogasen som produceras på Framtidens Främby.



Figur 17. Årlig elanvändning för olika användningsområden för biogasen som produceras på Framtidens Främby. För jämförelse visas elanvändningen för reningsprocessen på Framtidens Främby med biologisk rening med aktivslamprocess (AS).

Produktion av kraftvärme är det användningsområde för biogasen som stämmer bäst överens med FEV:s vision om ett energieutralt Framtidens Främby, eftersom resultaten i avsnitt 5.1.1 visar att det största energibehovet utgörs av el. I scenariot med en gaspanna minskar möjligheterna för Främby att bli självförsörjande på el i framtiden.

Över hälften av biogasen som produceras på reningsverk i Sverige uppgraderas idag till fordonsgas, men förmodligen finns uppgraderingsanläggningar bara på de större reningsverken vilka står för en betydande del av biogasproduktionen. År 2017 fanns totalt 65 uppgraderingsanläggningar i Sverige vilket kan jämföras med antalet reningsverk med biogasproduktion som var 138 (Energimyndigheten 2018b). Biogasproduktionen på Främby är förhållandevis låg vilket gör att en uppgraderingsanläggning

på Främby skulle bli dyr eftersom investeringskostnaden minskar betydligt med anläggningens storlek (Bauer et al. 2012). Både vad gäller investeringskostnad och energianvändning är det fördelaktigt med en större uppgraderingsanläggning.

Sett till energisystemet i hela Sverige kan fordonsgasen göra mest klimatnytta eftersom den kan användas till att ersätta fossila bränslen i transportsektorn. Idag utgörs 67 % av energin i transportsektorn av fossila bränslen, att jämföra med 1 % för el och 8 % för fjärrvärme (Energimyndigheten 2018a). Dessutom har FEV interna mål om att en viss andel av deras fordon ska vara fossilfria. Falu kommun och FEV har dock satsat på elbilar istället för biogasdrivna fordon vilket innebär att det inte finns något distributionssystem för fordonsgas eller någon garanterad köpare i närområdet. Den uppgraderade gasen skulle kunna användas till att driva FEV:s och kommunens egna fordon, men då krävs investeringar i nya fordon och distributionssystem. En fördel med att använda gasen till att producera värme och el är att det redan finns fungerande system för distribution av energin och att det finns en befintlig marknad för försäljning av överskottsenergi.

Rekommendationen är att installera en ny gasmotor eller en mikroturbin på Framtidens Främby. För att undvika driftproblem likt de som finns idag krävs dock en högre renhet på biogasen. En möjlighet är att nya röt-kammare och en mer omsorgsfull drift av rötningsprocessen kan leda till bättre gaskvalitet. Annars krävs bättre förbehandling av biogasen innan förbränningen.

5.4 Förslag på vidare arbete

Idag är slammet den enda resurs som används för energiproduktion på Främby reningsverk men för att öka möjligheterna för Främby att bli en energineutral anläggning kan fler resurser utnyttjas för energiproduktion. Det kan exempelvis vara möjligt att utvinna värme ur det utgående vattnet med hjälp av värmepumpar. Om MBR införs på framtidens anläggning kommer elbehovet öka mycket och då kan solceller vara ett alternativ för elproduktion (Kjellén & Andersson 2002). Det är också möjligt att biogasproduktionen kan öka om rötningsprocessen optimeras.

Systemgränserna bör utökas så att kartläggningen även inkluderar energianvändning som sker utanför själva reningsverket såsom transporter till och från anläggningen och pumpning på ledningsnätet. Dessutom utgör energianvändningen bara en del av reningsverkets miljöpåverkan och därför finns det fler aspekter att beakta om målet är att reningsverket ska vara miljömässigt hållbart. Användning av andra resurser samt utsläpp till recipient och luft bör också undersökas. Speciellt energianvändningen i förhållande till vattnets renhet bör utvärderas vidare så att reningsprocessen kan optimeras med avseende på både reningsgrad och energianvändning i framtiden.

Slutligen bör en kartläggning av effektbehovet på Främby inkluderas i energikartläggningen för att undersöka möjligheterna till effektstyrning av reningsverkets processer, vilket kan innebära både ekonomiska fördelar för Främby och fördelar för hela elsystemet.

6 Slutsats

I detta projekt undersöktes möjligheterna för Främby reningsverk i Falun att i framtiden bli en energi-neutral anläggning som levererar minst lika mycket energi som den använder. Som utgångspunkt kartlades energianvändningen i reningsprocessen på dagens anläggning. Resultaten visade att drygt hälften av energin som används är el och resten är värme. Eftersom en viktig drivkraft för att minska energianvändningen är höga kostnader för el undersöktes möjligheter att effektivisera elanvändningen vidare.

Som förväntat användes en stor del av elen i det biologiska reningssteget, framför allt för luftning av biobassängerna. Jämfört med andra reningsverk var elanvändningen inte ovanligt stor, men de mekaniska luftare som används på Främby är förmodligen mindre energieffektiva än finblåsiga bottenluftare. Då biosteget idag inte fungerar optimalt processmässigt är utrymmet för effektiviseringsåtgärder begränsat och det bästa alternativet är förmodligen att byta till ett effektivare luftarsystem. En annan åtgärd som kan ge energivinster är att installera frekvensomformare på slampumparna i slutsedimenteringens nya del, vilka har hög energianvändning jämfört med andra pumpar. Annan utrustning med stor energianvändning är omrörare och kompressorer, varför energieffektiviseringsåtgärder bör inriktas på dessa.

Det nya reningsverket ska klara av att belastningen ökar från dagens 50 000 pe till 70 000 pe. Om samma reningstekniker som idag används men med effektivare luftningssystem kan energianvändningen komma att öka med 47 %. Om reningskraven skärps i framtiden och dagens biologiska rening på Främby byts ut mot MBR kan energianvändningen däremot tredubblas. En viktig förutsättning för att energianvändningen ska vara effektiv är att framtidens reningsverk utrustas med bra reglersystem samt mätning av både energianvändning och olika processparametrar som kan användas vid styrningen av processerna.

Idag är slammet den enda resurs på reningsverket som används för energiproduktion. Data visar att rötningsprocessen på dagens anläggning ger en bra biogasproduktion, förmodligen tack vare att slammet samrötas med energirikare substrat. Om biogasutbytet är lika stort på framtidens anläggning samtidigt som rötkastrarna byggs ut och mängden substrat ökar kan biogasproduktionen bli 3 900 Nm³ per dag. Gasmotorn som producerar el och värme av biogasen på dagens anläggning har driftproblem, troligtvis på grund av att gasens kvalitet är för låg. Ett alternativ som passar biogas av lägre kvalitet är att producera värme i en gaspanna. Värmeproduktionen skulle i framtiden kunna bli tre gånger så hög som värmebehovet. Biogasen skulle också kunna användas till att driva mer än 1 000 personbilar, även om biogasproduktionen på Främby kommer vara i minsta laget för en uppgraderingsanläggning. En uppgraderingsanläggning är det alternativ som medför den största investeringskostnaden och har den högsta energianvändningen, följt av gasmotor eller mikroturbin för kraftvärmeproduktion.

Om målet är att Främby i framtiden ska bli en energineutral anläggning är kraftvärmeproduktion det bästa alternativet för biogasen eftersom en självförsörjandegrad på 100 % för el och 200 % för värme då kan uppnås i det fall reningsverket använder samma reningsprocesser som idag. Om istället MBR-teknik används i det biologiska reningssteget blir självförsörjandegraden för el 30 %.

MBR-teknik är ofördelaktigt energimässigt samtidigt som det ger bättre renhet på vattnet, vilket minskar utsläppen till recipienten. Detta är ett exempel på att det finns fler aspekter av hållbarhet än just energi. Strävan mot ett energineutralt reningsverk bör inte ske på bekostnad av andra miljöaspekter såsom direkta utsläpp av växthusgaser i reningsverkets processer, kemikalieanvändning eller utsläpp till vattenmiljön. Om målet är att Främby reningsverk ska bli ett energineutralt reningsverk förbises också att Främby är en aktör i ett större energisystem. Ett energineutralt reningsverk kanske inte nödvändigtvis gynnar miljömål inom företaget, eller miljömål på nationell eller global nivå.

Referenslista

- Alvehag, K., Werther Öhling, L., Östman, K., Broström, E., Strömbäck, E., Klasman, B., Lahti, M. & Morén, G. (2016). *Åtgärder för ökad efterfrågeflexibilitet i det svenska elsystemet*. Eskilstuna: Energimarknadsinspektionen (Rapport Ei R2016:15). https://www.ei.se/Documents/Publikationer/rapporter_och_pm/Rapporter%202016/Ei_R2016_15.pdf
- Andreoli, C.V., von Sperling, M. & Fernandes, F. (2007). *Sludge treatment and disposal*. London: IWA Publishing. (Biological Wastewater Treatment Series, volym 6).
- Bachmann, N. (2015). *Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants*. (ISBN: 978-1-910154-22-9). IEA Bioenergy. http://task37.ieabioenergy.com/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/Wastewater_biogas_grey_web-1.pdf
- Balmér, P. (2018). *Resultatrapport för VASS Reningsverk 2016*. Stockholm: Svenskt Vatten AB (Svenskt Vatten Utveckling, rapport 2018-5). http://vav.griffel.net/filer/svu-rapport_2018-05.pdf
- Balmér, P. & Hellström, D. (2011). *Nyckeltal för reningsverk – verktyg för effektivare resursanvändning*. Stockholm: Svenskt Vatten AB (Svenskt Vatten Utveckling, rapport 2011-15 2:a rev). http://vav.griffel.net/filer/Rapport_2011-15.pdf
- Baresel, C., Westling, K., Samuelsson, O., Andersson, S., Royen, H., Andersson, S. & Dahlén, N. (2017). Membrane bioreactor processes to meet today's and future municipal sewage treatment requirements? *International Journal of Water and Wastewater Treatment*, 3(2). doi:10.16966/2381-5299.140
- Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T. & Tamm, D. (2012). *Biogas upgrading – review of commercial technologies*. Malmö: Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC Rapport 2012:270). <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC270.pdf>
- Bioenergiportalen (2010). *El med mikroturbin*. <http://www.bioenergiportalen.se/?p=1802&m=1215> [2018-11-23]
- Bioenergiportalen (2012a). *Användning av biogas*. http://www.bioenergiportalen.se/?p=1459&m=1462&page=gasens_anvandning [2018-11-07]
- Bioenergiportalen (2012b). *Biogas som drivmedel*. <http://www.bioenergiportalen.se/?p=1453&m=1643&page=fordonsgas> [2018-11-07]
- Bioenergiportalen (2012c). *Elproduktion av biogas*. <http://www.bioenergiportalen.se/?p=1461&m=1642&page=elproduktion> [2018-11-07]
- Bioenergiportalen (2012d). *Så framställs biogas*. <http://www.bioenergiportalen.se/?p=1457&m=1459&page=biogasprocessen> [2018-11-08]
- Bioenergiportalen (2012e). *Värmeproduktion av biogas*. <http://www.bioenergiportalen.se/?p=1460&m=1641&page=varmeproduktion> [2018-11-07]
- Bioenergiportalen (2014). *Biogas rötas på organiskt material*. <http://www.bioenergiportalen.se/?p=1454&m=1379&page=biogas> [2019-02-23]
- Biogas Syd (2010). *Uppgradering av biogas till fordonskvalitet* [faktablad]. <https://kfsk.se/biogassyd/publikationer/broschyrer/>
- Brown, N., Edström, M., Hansson, M. & Algerbo, P-A. (2010). *Utvärdering av gårdsbiogasanläggning med mikroturbin för kraftvärmeproduktion*. JTI- Institutet för jordbruks- och miljöteknik (JTI-rapport Kretslopp & Avfall 46). http://www.jti.se/uploads/jti/r-46%20nb,%20med_lag.pdf
- Carlsson, M. & Uldal, M. (2009). *Substrathandbok för biogasproduktion*. Malmö: Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC Rapport 200). <http://www.sgc.se/Publikationer/Rapporter/>
- Danielsson, H. (2013). *Energihushållning i VA-sektorn*. Falun: Länsstyrelsen i Dalarnas län (Rapporter från Länsstyrelsen i Dalarnas län, rapport 2013:04).

- <https://www.lansstyrelsen.se/download/18.4df86bcd164893b7cd92d3ac/1534488937390/2013-04%20Energihush%C3%A5llning%20i%20VA-sektorn.pdf>
- Davidsson, Å., Lövestedt, C., la Cour Jansen, J., Gruvberger, C. & Aspegren, H. (2008). Co-digestion of grease trap sludge and sewage sludge. *Waste Management*, 28(6), ss. 986-992. doi:10.1016/j.wasman.2007.03.024
- Digréus, A. (2017). Naturvårdsverket: Goda utsikter att rena läkemedelsrester ur avloppsvatten. *Sveriges Radio*, 8 maj. <https://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=83&artikel=6690639>
- E.ON Biofor Sverige AB (u.å.). *Våra produkter: biogas 50 och biogas 100* [faktablad]. <https://www.eon.se/content/dam/eon-se/swe-documents/swe-produktblad-fordonsgas.pdf>
- Energigas Sverige (2017). *Vad är biogas?* <https://www.energigas.se/fakta-om-gas/biogas/vad-aer-biogas/> [2018-11-08]
- Energimarknadsinspektionen (2017). *Efterfrågeflexibilitet – en outnyttjad resurs i kraftsystemet*. <https://www.ei.se/sv/nyhetsrum/nyhetsbrev/Energimarknadsinspektionens-Ei-nyhetsbrev/Ei-nyhetsbrev-2017/energimarknadsinspektionen-ei-nyhetsbrev-nr-1-2017/efterfrageflexibilitet-en-outnyttjad-resurs-i-kraftsystemet/> [2018-11-10]
- Energimyndigheten (2018a). *Energiindikatorer 2018 – uppföljning av Sveriges energipolitiska mål*. Eskilstuna: Statens energimyndighet (Rapport ER 2018:11). <https://epi6.energimyndigheten.se/PageFiles/54644/Energiindikatorer%202018.pdf>
- Energimyndigheten (2018b). *Produktion och användning av biogas och rötresten år 2017*. Eskilstuna: Statens Energimyndighet (Rapport ES 2018:01). <https://energimyndigheten.a-w2m.se/Home.mvc?ResourceId=5765>
- Energimyndigheten (u.å.). *Statistik elcertifikat – medelpris*. <https://cesar.energimyndigheten.se/WebPartPages/AveragePricePage.aspx> [2019-02-03]
- Falu Energi & Vatten (u.å.a) *Om oss*. <http://www.fev.se/om-oss/> [2019-01-17]
- Falu Energi & Vatten (u.å.b) *Reningsverk*. <http://www.fev.se/om-oss/anlaeggningar/reningsverk/> [2019-01-17]
- Fenu, A., Roels, J., Wambecq, T., De Gussem, K., Thoeye, C., De Gueldre, G. & Van De Steene, B. (2010). Energy audit of a full scale MBR-system. *Desalination*, 262(1), ss. 121-128. doi:10.1016/j.desal.2010.05.057
- Gabarrón, S., Ferrero, G., Dalmau, M., Comas, J. & Rodríguez-Roda, I. (2014). Assessment of energy-saving strategies and operational costs in full-scale membrane bioreactors. *Journal of Environmental Management*, 134, ss. 8-14. doi:10.1016/j.jenvman.2013.12.023
- Granmar, M. (2017). Så blev VA-verket en plusenergianläggning. *VVS-forum*, 22 juni. <https://www.vvsforum.se/nyheter/2017/juni/sa-blev-va-verket-en-plusenergianlaggning/>
- Greer, D. (2012). Microturbines fill biogas utilization niche. *BioCycle*, 53(8), ss. 54-56. <https://www.biocycle.net/2012/08/14/microturbines-fill-biogas-utilization-niche/>
- Hoyer, K., Hulteberg, C., Svensson, M., Jernberg, J. & Nørregård, Ø. (2016). *Biogas upgradering – technical review*. Energiforsk AB (Rapport 2016:275). http://vav.griffel.net/filer/C_Energiforsk2016-275.pdf
- Huber Technology (u.å.). *Introduktion grundläggande MBR-teknologi* [faktablad]. <https://www.hubersverige.se/mbroteknologi.pdf>
- IVL Svenska Miljöinstitutet (u.å.). *MembranBioreaktor (MBR): tekniken som ger en ökad kapacitet och bättre rening* [faktablad]. <http://sjostad.ivl.se/download/18.1369484715f59ce4bab311/1510055031325/MBR%20allm%C3%A4n.pdf>
- Jenkins, D. & Wanner, J. (2014). *Activated sludge: 100 years and counting*. London: IWA Publishing.
- Judd, S. & Judd, C. (2011). *The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment*. 2. uppl., Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann.
- Kjellén, B.J. & Andersson, A.-C. (2002). *Energihandbok för avloppsreningsverk*. Stockholm: Svenskt Vatten AB (VA-Forsk, rapport 2002-2). http://vav.griffel.net/filer/VA-Forsk_2002-2.pdf
- Konsumenternas energimarknadsbyrå (2019). *Normal elförbrukning och elkostnad för villa*. <https://www.energimarknadsbyran.se/el/dina-avtal-och-kostnader/elkostnader/elforbrukning/normal-elforbrukning-och-elkostnad-for-villa/> [2019-03-09]
- Krzeminski, P., Leverette, L., Malamis, S. & Katsou, E. (2017). Membrane bioreactors – a review on recent developments in energy reduction, fouling control, novel configurations, LCA and market prospects. *Journal of Membrane Science*, 527, ss. 207-227. doi:10.1016/j.memsci.2016.12.010
- Ladewig, B. & Al-Shaeli, M. N. Z. (2017). *Fundamentals of membrane bioreactors: materials, systems and membrane fouling*. Singapore: Springer Nature. doi: 10.1007/978-981-10-2014-8
- Larsen, E. (2009). Självförsörjande reningsverk. *Sveriges Radio*, 15 april. <https://sverigesradio.se/sida/artikel.aspx?programid=161&artikel=2768888>

- Le-Clech, P., Chen, V. & Fane, T. A. G. (2006). Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 284(1), ss. 17-53. doi:10.1016/j.memsci.2006.08.019
- Lingsten, A. (2014). *Sammanfattande rapport över "VA-verkens bidrag till Sveriges energieffektivisering"*. Stockholm: Svenskt Vatten AB (Svenskt Vatten Utveckling, rapport 2014-05). http://vav.griffel.net/filer/SVU-rapport_2014-05.pdf
- Lingsten, A. & Lundkvist, M. (2008). *Nulägesbeskrivning av VA-verkens energianvändning*. Stockholm: Svenskt Vatten AB (Svenskt Vatten Utveckling, rapport 2008-01). http://vav.griffel.net/filer/Rapport_2008-01.pdf
- Lingsten, A., Lundkvist, M. & Hellström, D. (2013). *VA-verkens energianvändning 2011*. Stockholm: Svenskt Vatten AB (Svenskt Vatten Utveckling, rapport 2013-17). http://vav.griffel.net/filer/SVU-rapport_2013-17.pdf
- Lingsten, A., Lundkvist, M., Hellström, D. & Balmér, P. (2011). *VA-verkens energianvändning 2008*. Stockholm: Svenskt Vatten AB (Svenskt Vatten Utveckling, rapport 2011-04). http://vav.griffel.net/filer/Rapport_2011-04.pdf
- Lundin, J. (2009). Här blir toabesöket till el. *Dalarnas Tidningar*, 15 april. <https://www.dt.se/artikel/falun/har-blir-toabesoket-till-el>
- Lustig, G. (2012). *Moving bed biofilm reactors (MBBR) i Sverige – dimensionering och funktion*. Masteruppsats, Institutionen för kemiteknik. Lund: Lunds tekniska högskola.
- Ma, W. & Bai, L. (2018). *Energy-saving principles and technologies for induction motors*. Hoboken: Wiley.
- Maktabifard, M., Zabrowska, E. & Makinia, J. (2018). Achieving energy neutrality in wastewater treatment plants through energy savings and enhancing renewable energy production. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 17(4), ss. 655-689. doi:10.1007/s11157-018-9478-x
- Nationalencyklopedin (u.å.a). *Energiprincipen*. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/energiprincipen> [2019-02-23]
- Nationalencyklopedin (u.å.b). *Reningsverk*. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/reningsverk> [2019-02-23].
- Naturvårdsverket (2009). *Sveriges åtagande i Baltic Sea Action Plan – förslag till nationell åtgärdsplan*. Stockholm: Naturvårdsverket (Rapport 5985). <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/978-91-620-5985-9.pdf>
- Naturvårdsverket (2012). *Biogas ur gödsel, avfall och restprodukter*. Stockholm: Naturvårdsverket (Naturvårdsverket, rapport 6518). <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-6518-8.pdf>
- Naturvårdsverket (2013). *Rening av avloppsvatten i Sverige 2010*. Stockholm: Naturvårdsverket. <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-8629-9.pdf?pid=5493>
- Naturvårdsverket (2018a). *Bränsleanvändning för bensin- och dieslbilar*. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Bransleanvandning-for-bensin--och-dieslbilar/> [2019-03-12]
- Naturvårdsverket (2018b). *Rening av avloppsvatten i Sverige 2016*. Stockholm: Naturvårdsverket. <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-8808-8.pdf?pid=22472>
- Naturvårdsverket (u.å.). *Koldioxidkvaliteter*. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-konsumtionsbaserade-utslapp-fran-exporterande-foretag/Koldioxidkvaliteter/> [2018-11-07]
- Neuman, L. (2013). *Handbok i energieffektivisering, del 3: elmotorer, elektricitet – lite grunder*. LRF Konsult. <https://www.lrf.se/foretagande/resurseffektivisering/spara-energi/handbok-om-energieffektivisering/>
- Nordling, C. & Österman, J. (2006). *Physics handbook for science and engineering*. 8. (rev.) uppl., Lund: Studentlitteratur.
- Olsson, G. (2008). *Effektivare reningsverk - några steg mot bättre energi- och resursutnyttjande*. Stockholm: Svenskt Vatten AB (Svenskt Vatten Utveckling, rapport 2008-19). <http://vav.griffel.net/filer/2008-19.pdf>
- Olsson, M. (2018). *Analys av föroreningar i avloppsvatten i Falun*. Masteruppsats, Institutionen för geovetenskaper. Uppsala: Uppsala universitet.
- Panepinto, D., Fiore, S., Zappone, M., Genon, G. & Meucci, L. (2016). Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. *Applied Energy*, 161, ss. 404-411. doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.027
- Rodriguez, L. (2011). *Methane potential of sewage sludge to increase biogas production*. Masteruppsats, Avdelningen för mark och vattenteknik. Stockholm: Kungliga tekniska högskolan. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A530198&dsid=-4747>
- SCB Statistikdatabasen (2019). *Elanvändningen i Sverige, GWh efter användningsområde och år*. http://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__EN__EN105/EIAnvSNI2007Ar/table/tableViewLayout1/?rxid=16c571d0-32c8-4ed1-bcfe-467370e8b527 [2019-01-17]
- Schnürer, A. & Jarvis, Å. (2009). *Mikrobiologisk handbok för biogasanläggningar*. Malmö: Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC Rapport 207). <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC207.pdf>
- SFS 2013:251. *Miljöprövningsförfordning*. Stockholm: Miljö- och energidepartementet.

- Statistiska centralbyrån (2018). *Utsläpp till vatten och slamproduktion 2016*. Statistiska centralbyrån (Statistiska meddelanden MI 22 SM 1801).
https://www.scb.se/contentassets/4d4d22ee07cf4baa9f47e5bab805c00c/mi0106_2016a01_sm_mi22sm1801.pdf
- Sundberg, C., Svensson, R. & Johansson, M. (2011). *Lönsamhet för småskalig biobränslebaserad kraftvärme – förutsättningar och framtidsutsikter*. Uppsala: Sveriges Lantbruksuniversitet (Rapport 033).
https://pub.epsilon.slu.se/8479/1/sundberg_c_etal_111212.pdf
- Svenskt Gastekniskt Center (2012). *Basdata om biogas*. Malmö: Svenskt Gastekniskt Center AB.
<http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/BasdataomBiogas2012.pdf>
- Svenskt Vatten (2007). *Avloppsteknik 2: reningsprocessen*. Stockholm: Svenskt Vatten AB.
- Svenskt Vatten (2013). *Avloppsteknik 3: slamhantering*. 3 uppl., Stockholm: Svenskt Vatten AB.
- Svenskt Vatten (2016). *Tillstånd, villkor och miljörapport*. <http://www.svensktvatten.se/vattentjanster/juridik/oversikt-reglering/miljokrav-enligt-miljobalken/tillstand-villkor-och-miljorapport/> [2019-02-23]
- Svensson, K. (2017). *Nya användningsområden för biogas*. <http://www.energimyndigheten.se/effekter-av-vara-satsningar/nya-anvandningsomraden-for-biogas/> [2018-11-07]
- Thumann, A. & Dunning, S. (2010). *Plant engineers and managers guide to energy conservation*. 10. uppl., Lilburn: Fairmont Press.
- Trafikanalys (2018). *Körsträckor 2017* [faktablad].
https://www.trafa.se/globalassets/statistik/vagtrafik/korstrackor/2018/korstrackor_2017_sept.pdf
- Wan, C., Zhou, Q., Fu, G. & Li, Y. (2011). Semi-continuous anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge and fat, oil and grease. *Waste Management*, 31(8), ss. 1752-1758. doi:10.1016/j.wasman.2011.03.025
- Wang, X., Chen, Y., Zhang, J., Li, X. & Ren, Y. (2013). Novel insights into the evaluation of submerged membrane bioreactors under different aeration intensities by carbon emission. *Desalination*, 325, ss. 25-29.
doi:10.1016/j.desal.2013.06.020
- Vatteninformationssystem Sverige (u.å.). *Runn*. <https://viss.lansstyrelsen.se/Waters.aspx?waterMSCD=WA65218711> [2019-04-08]
- Yalcinkaya, S. & Malina, J. F. (2015a). Anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge and un-dewatered grease trap waste for assessing direct feed of grease trap waste in municipal digesters. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 104, ss. 490-497. doi:10.1016/j.ibiod.2015.08.007
- Yalcinkaya, S. & Malina, J. F. (2015b). Model development and evaluation of methane potential from anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge and un-dewatered grease trap waste. *Waste Management*, 40, ss. 53-62.
doi:10.1016/j.wasman.2015.03.013

Opublicerat material

- Falu Energi & Vatten (2015). *Åtgärdsplan Främby*. Falun: Falu Energi & Vatten AB.
- Falu Energi & Vatten (2018a). *Främby avloppsreningsverk: miljörapport för 2017 – textdel*. Falun: Falu Energi & Vatten AB.
- Falu Energi & Vatten (2018b). *Teknisk beskrivning maskinell utrustning Främbyverket*. Falun: Falu Energi & Vatten AB.
- Hedén, M (2018). *Förstudie framtidens Främby (3F-projektet): en konceptstudie*. Falun: Falu Energi & Vatten AB.
- Runevad, Lars, produktionscontroller, Falu Energi & Vatten [muntlig källa].
- Tyréns (2018a). *Framtidens Främby ARV*. Gävle: Tyréns AB.
- Tyréns (2018b). *Nya Främby ARV*. Gävle: Tyréns AB.
- VA-Ingjörerna (2015). *Funktionsbeskrivning Främby reningsverk*.

Appendix

Tabell A1. *Energianvändning för reningsverkets maskiner. Tabellen innehåller även data som använts vid energiberäkningen samt en jämförelse mellan beräknad effekt och märkeffekt. Kolumnen "Rangordning" listar alla maskiner efter energianvändning där 1 anger den högsta energianvändningen. Kolumnen "Maskintyp" anger vilken kategori i Figur 12 varje maskin räknats till. I "kommentarer" anges om maskinens energianvändning tagits fram på annat sätt än genom strömmätning och beräkning.*

Information om maskinerna			Energiberäkning			Utvärdering			Kommentarer
Beteckning	Funktion	Märkeffekt	Beräknad effekt	Drifttid	Energi	Beräknad effekt /märkeffekt	Rangordning	Maskintyp	
		[kW]	[kW]	[h/år]	[kWh/år]	[%]			
Mekanisk rening					75405				
M231	Rensgaller 1	1,5	1,25	216	269	83%	111	Övrigt	
M232	Tvättpress 1	4	2,81	1806	5069	70%	63	Övrigt	
M258	Mottrycksskruv 1	1,1	0,89	153	136	81%	115	Övrigt	
M233	Rensgaller 2	1,5	1,94	255	495	129%	105	Övrigt	
M234	Tvättpress 2	4	5,34	910	4860	134%	65	Övrigt	
M259	Mottrycksskruv 2	1,1	1,21	302	366	110%	109	Övrigt	
M260	Samlingsskruv	0,75	0,87	487	425	116%	107	Övrig transport	
M280	Omrörare sandfång	1,5	1,40	8752	12265	93%	48	Omrörare	
M281	Omrörare sandfång	1,5	1,44	8752	12574	96%	46	Omrörare	
M282	Omrörare sandfång	1,5	1,43	8752	12486	95%	47	Omrörare	
M236	Sandskruv	1,5	1,75	4842	8464	117%	56	Övrig transport	
M237/M218	Mammutpump	3,5	3,03	5742	17426	87%	38	Övrig transport	
M294	Utmatningskruv sandtvätt	1,1	0,77	738	571	70%	104	Övrig transport	
Kemisk rening					18826				
M240	Doseringspump	0,25	0,15	6142	939	61%	97	Pump	
M241	Doseringspump	0,25	0,15	2725	417	61%	108	Pump	
M244	Primärslampump 1	2	1,90	1199	2274	95%	78	Pump	
M245	Slamskrapa 1	0,12	0,20	8702	1736	166%	84	Slamskrapa	
M247	Primärslampump 2	2,8	2,49	1277	3181	89%	73	Pump	
M248	Slamskrapa 2	0,12	0,21	8677	1839	177%	82	Slamskrapa	
M250	Primärslampump 3	2,8	2,49	1146	2856	89%	75	Pump	
M251	Slamskrapa 3	0,12	0,20	8735	1706	163%	85	Slamskrapa	
M253	Primärslampump 4	2	2,01	989	1991	101%	79	Pump	
M254	Slamskrapa 4	0,12	0,22	8735	1887	180%	80	Slamskrapa	
Biologisk rening - luftning					1016330				
M331	Luftare linje 1	7,5	6,29	6906	43466	84%	15	Luftare bio-reaktor	
M332	Omrörare linje 1	7,5	5,51	8760	48269	73%	11	Omrörare bio-reaktor	
M333	Luftare linje 1	4	4,10	7294	29871	102%	25	Luftare bio-reaktor	
M334	Omrörare linje 1	4	3,68	8676	31935	92%	24	Omrörare bio-reaktor	
M335	Luftare linje 1	7,5	5,87	6886	40388	78%	17	Luftare bio-reaktor	
M336	Omrörare linje 1	7,5	5,75	8760	50376	77%	10	Omrörare bio-reaktor	
M337	Luftare linje 1	4	4,24	4511	19131	106%	33	Luftare bio-reaktor	

M338	Omrörare linje 1	4	4,00	8760	35073	100%	21	Omrörare bio-reaktor	
M339	Luftare linje 2	7,5	6,18	7473	46182	82%	13	Luftare bio-reaktor	
M340	Omrörare linje 2	7,5	6,57	8749	57470	88%	7	Omrörare bio-reaktor	
M341	Luftare linje 2	4	3,68	7354	27069	92%	26	Luftare bio-reaktor	
M342	Omrörare linje 2	4	3,79	8648	32809	95%	23	Omrörare bio-reaktor	
M343	Luftare linje 2	7,5	6,06	6877	41673	81%	16	Luftare bioreaktor	
M344	Omrörare linje 2	7,5	5,80	8748	50707	77%	8	Omrörare bio-reaktor	
M345	Luftare linje 2	4	3,86	5739	22143	96%	29	Luftare bio-reaktor	
M346	Omrörare linje 2	4	4,06	8749	35546	102%	20	Omrörare bio-reaktor	
M351	Luftare linje 3	7,5	6,35	3991	25349	85%	27	Luftare bio-reaktor	
M352	Omrörare linje 3	7,5	8,75	8705	76212	117%	4	Omrörare bio-reaktor	
M353	Luftare linje 3	7,5	6,41	5420	34733	85%	22	Luftare bio-reaktor	
M354	Omrörare linje 3	7,5	6,81	8535	58120	91%	6	Omrörare bio-reaktor	
M355	Luftare linje 3	7,5	7,04	3238	22787	94%	28	Luftare bio-reaktor	
M356	Omrörare linje 3	7,5	8,93	8623	76974	119%	3	Omrörare bio-reaktor	
M357	Luftare linje 3	7,5	6,35	1088	6907	85%	57	Luftare bio-reaktor	
M358	Omrörare linje 3	7,5	10,24	8647	88567	137%	1	Omrörare bio-reaktor	
M347	Överskottslampump	3,5	2,75	2189	6011	78%	61	Pump	
M348	Överskottslampump	3,5	2,69	3182	8562	77%	55	Pump	
Biologisk rening – slut-sedimentering					203899				
M450	Returslampump 1	2,8	0,45	8400	3952	16%	67	Pump	Frekvensomformare
M418	Slamskrapa 1	0,12	0,14	8748	1200	114%	93	Slamskrapa	
M451	Returslampump 2	2,8	0,36	8408	3142	13%	74	Pump	Frekvensomformare
M419	Slamskrapa 2	0,12	0,17	8746	1454	139%	87	Slamskrapa	
M452	Returslampump 3	2,8	0,38	8362	3257	13%	71	Pump	Frekvensomformare
M420	Slamskrapa 3	0,12	0,21	8748	1854	177%	81	Slamskrapa	
M453	Returslampump 4	2,8	0,41	8317	3497	15%	69	Pump	Frekvensomformare
M421	Slamskrapa 4	0,12	0,15	8655	1259	121%	92	Slamskrapa	
M454	Returslampump 5	2,8	0,39	7920	3404	14%	70	Pump	Frekvensomformare
M422	Slamskrapa 5	0,12	0,23	7933	1813	190%	83	Slamskrapa	
M455	Returslampump 6	2,8	0,43	7824	3732	15%	68	Pump	Frekvensomformare
M423	Slamskrapa 6	0,12	0,17	7903	1314	139%	90	Slamskrapa	
M456	Returslampump 7a	2,8	1,98	8402	16607	71%	41	Pump	
M457	Returslampump 7b	2,8	2,00	8751	17530	72%	37	Pump	
M424	Slamskrapa 7	1,5	1,20	8408	10080	80%	51	Slamskrapa	
M458	Returslampump 8a	2,8	2,06	8750	17993	73%	34	Pump	
M459	Returslampump 8b	2,8	2,04	8320	16975	73%	39	Pump	

M425	Slamskrapa 8	1,5	1,23	8752	10731	82%	50	Slamskrapa	
M460	Returslaspump 9a	2,8	2,16	8191	17670	77%	35	Pump	
M461	Returslaspump 9b	2,8	2,06	8558	17597	73%	36	Pump	
M426	Slamskrapa 9	1,5	1,22	7908	9611	81%	53	Slamskrapa	
M462	Returslaspump 10a	2,8	2,13	7932	16858	76%	40	Pump	
M463	Returslaspump 10b	2,8	1,69	7837	13243	60%	44	Pump	
M427	Slamskrapa 10	1,5	1,16	7901	9128	77%	54	Slamskrapa	
Slam- förtjockning och slamlager					39230				
M531	Gravitations- förtjockare	0,55	0,72	8760	6273	130%	59	Omrörare	
M532	Slampump	4	0,30	3988	1196	8%	94	Pump	Effekt från frekvens- omformare
M533	Slampump	4	0,30	3850	1155	8%	95	Pump	Effekt från frekvens- omformare
M562	Mekanisk slamförtjockare	0,75	0,11	7652	885	15%	99	Slam- förtjockning	Frekvens- omformare
M566	Slampump	4	0,43	5995	2548	11%	76	Pump	Frekvens- omformare
M534	Omrörare polymertank	0,37	-	864	320	-	110	Omrörare	Märkeffekt
M535	Doserskriv polymer	0,18	-	14	3	-	120	Övrig transport	Märkeffekt
M536	Transportfläkt polymer	1,3	-	16	21	-	118	Övrig transport	Märkeffekt
M537	Polymerpump	0,3	0,09	7652	704	30%	102	Pump	Frekvens- omformare
M519	Omrörare externslamlager	1,5	1,36	8760	11879	90%	49	Omrörare	
M569	Externslaspump	4	0,71	1128	682	18%	103	Pump	Frekvens- omformare
M570	Externslaspump	4	0,72	915	738	18%	101	Pump	Frekvens- omformare
M873	Omrörare fettlager	1,5	1,45	8760	12674	96%	45	Omrörare	
M894	Fettpump	4	0,77	216	154	19%	114	Pump	Frekvens- omformare
Rötning					189088				
M574	Omrörare röt-kammare	2,5	1,82	8275	15101	73%	42	Omrörare	
M577	Omrörare röt-kammare	2,5	1,67	8275	13807	67%	43	Omrörare	
M586	Slamcirkulationspump	15	8,84	4075	38497	59%	19	Pump	Frekvens- omformare
M587	Slamcirkulationspump	15	10,18	4635	44336	68%	14	Pump	Frekvens- omformare
M520	Omrörare rötslamlager	13	8,83	8760	77348	68%	2	Omrörare	Frekvens- omformare
Slamavvattning					163880				
M656	Rötslaspump 1	7,5	0,85	1085	967	11%	96	Pump	Frekvens- omformare
M654	Polymerpump 1	1,5	0,20	1086	222	13%	112	Pump	Frekvens- omformare
M650+M658	Centrifug 1	45	17,0	1120	19951	38%	32	Slam- förtjockning	Frekvens- omformare
M657	Rötslaspump 2	5,5	0,81	1153	900	15%	98	Pump	Frekvens- omformare
M655	Polymerpump 2	1,5	0,19	1154	210	13%	113	Pump	Frekvens- omformare
M651+M659	Centrifug 2	45	18,5	1191	21376	41%	31	Slam- förtjockning	Frekvens- omformare
M681	Omrörare polymertank	0,55	-	852	468	-	106	Omrörare	Märkeffekt
M683	Doserskriv polymer	0,25	-	21	5	-	119	Övrig transport	Märkeffekt
M680	Transportfläkt polymer	1,1	-	63	69	-	116	Övrig transport	Märkeffekt

M670	Omrörare rejektvattentank	1,1	-	8760	9636	-	52	Omrörare	Märkeffekt
M668	Rejektvattenpump 1	7,5	5,29	1045	5528	71%	62	Pump	
M669	Rejektvattenpump 2	7,5	5,29	0	0	71%	121	Pump	
M660	Samlingsskruv	2,2	-	2269	4992	-	64	Övrig transport	Märkeffekt
M661	Torrslampump	22	-	2295	50496	-	9	Kompressor	Märkeffekt
M672	Torrslampump	22	-	2102	46239	-	12	Kompressor	Märkeffekt
M663	Utmatningsskruv 1 silo	18,5	18,08	78	1410	98%	88	Övrig transport	
M664	Utmatningsskruv 2 silo	18,5	18,08	78	1410	98%	88	Övrig transport	
Gasanläggning					37313				
M804	Boosterfläkt gasmotor	2,2	0,93	4465	4620	42%	66	Övrigt	Frekvens- omformare
M831	Processventilation fläkt	2	0,64	4465	3207	32%	72	Övrigt	Frekvens- omformare
M819	Kylvattenpump gasmotor	5,5	4,42	4465	22060	80%	30	Pump	Frekvens- omformare
M879	Cirkulationspump värmevatten gasmotor	1,1	0,14	8753	1259	13%	91	Pump	Frekvens- omformare
M595	Cirkulationspump värmevatten rötkammare	1,5	0,70	8753	6168	47%	60	Pump	Frekvens- omformare
Spolvatten och tryckluft					108176				
M665	Spolvattenpump 1	11,5	4,55	8742	39767	40%	18	Pump	Frekvens- omformare
M666	Spolvattenpump 2	7,5	-	201	1506	-	86	Pump	Märkeffekt
M685	Skruvkompressor	30	-	-	66016	-	5	Kompressor	Energi- mätare
M687	Tryckluftkompressor	18,5	-	2	37	-	117	Kompressor	Märkeffekt
-	Trycklufttork	1,7	-	500	850	-	100	Kompressor	Märkeffekt
Mätning och provtagning					9200				
-	Mätare och provtagare sammanlagt	0,779	-	8760	6824	-	58	Övrigt	Märk- effekter
M646	Omrörningspump	1,1	-	2160	2376	-	77	Övrigt	Märkeffekt
Värme					1517605				
EM1	Uppvärmning rötkammare	-	-	-	1517605	-	-	-	Energi- mätare
Totalt el					1861348				
Totalt energi					3378953				

Tabell A2. Drifftider för reningsverkets maskiner för åren 2014-2017 samt beräknat årsmedelvärde för de fyra åren. Tabellen innehåller även information om hur drifftider tagits fram där data saknas.

Information om maskinerna		Drifftider [h/år]					Källa	Kommentarer
Beteckning	Funktion	2014	2015	2016	2017	Års-medel		
Mekanisk rening								
M231	Rensgaller 1	43	43	393	383	216	Driftdata	
M232	Tvättpress 1	1184	2124	1994	1922	1806	Driftdata	
M258	Mottrycksskruv 1	110	138	154	209	153	Driftdata	
M233	Rensgaller 2	328	299	243	150	255	Driftdata	
M234	Tvättpress 2	888	1272	949	531	910	Driftdata	
M259	Mottrycksskruv 2	233	358	332	286	302	Driftdata	
M260	Samlingsskruv	504	-	475	481	487	Driftdata	Felaktiga eller saknade dygnsvärden 2014 och 2016 har ersatts med medelvärden baserade på dagar med korrekta värden. 2015 felaktig data för hela året.
M280	Omrörare sandfång	8759	8757	8755	8737	8752	Driftdata	
M281	Omrörare sandfång	8759	8757	8755	8737	8752	Driftdata	
M282	Omrörare sandfång	8759	8757	8755	8737	8752	Driftdata	
M236	Sandskruv	833	3475	5386	5664	4842	Driftdata	Årsvärdet för 2014 avviker stort från de andra åren och har därför inte tagits med i medelvärdet.
M237/M218	Mammutpump	1256	4818	6167	6242	5742	Driftdata	Samma som ovan.
M294	Utmatningsskruv sandtvätt	392	703	843	1015	738	Driftdata	
Kemisk rening								
M240	Doseringspump	7946	2131	5827	8664	6142	Driftdata	Årsvärdet för 2015 beräknat utifrån ett medelvärde på hur mycket de två pumparna går tillsammans de andra tre åren.
M241	Doseringspump	1569	6736	2590	6	2725	Driftdata	
M244	Primärslampump 1	1478	1201	994	1122	1199	Driftdata	
M245	Slamskrapa 1	8707	8722	8700	8680	8702	Driftdata	
M247	Primärslampump 2	1449	1224	1090	1343	1277	Driftdata	
M248	Slamskrapa 2	8747	8669	8579	8712	8677	Driftdata	
M250	Primärslampump 3	1373	1109	969	1134	1146	Driftdata	
M251	Slamskrapa 3	8751	8741	8711	8736	8735	Driftdata	
M253	Primärslampump 4	1022	953	910	1070	989	Driftdata	
M254	Slamskrapa 4	8752	8721	8730	8736	8735	Driftdata	
Biologisk rening - luftning								
M331	Luftare linje 1	6083	6810	6879	7850	6906	Driftdata	En linje avstängd delar av 2016 och 2017, drifftider för dessa dagar beräknades med medelvärden från dagarna i drift varje år.
M332	Omrörare linje 1	8759	8743	8776	8760	8760	Driftdata	Samma som ovan.
M333	Luftare linje 1	7332	7106	6882	7855	7294	Driftdata	Samma som ovan.
M334	Omrörare linje 1	8759	8407	8776	8760	8676	Driftdata	Samma som ovan.
M335	Luftare linje 1	8514	6275	4620	8135	6886	Driftdata	Samma som ovan.
M336	Omrörare linje 1	8759	8744	8776	8760	8760	Driftdata	Samma som ovan.
M337	Luftare linje 1	4487	4065	3989	5504	4511	Driftdata	Samma som ovan.
M338	Omrörare linje 1	8759	8744	8776	8760	8760	Driftdata	Samma som ovan.
M339	Luftare linje 2	7815	7234	7237	7605	7473	Driftdata	
M340	Omrörare linje 2	8759	8744	8754	8737	8749	Driftdata	
M341	Luftare linje 2	7513	6999	7211	7692	7354	Driftdata	
M342	Omrörare linje 2	8758	8406	8723	8703	8648	Driftdata	
M343	Luftare linje 2	7649	6460	6138	7261	6877	Driftdata	
M344	Omrörare linje 2	8759	8741	8754	8737	8748	Driftdata	
M345	Luftare linje 2	5676	5729	5827	5722	5739	Driftdata	
M346	Omrörare linje 2	8759	8744	8754	8737	8749	Driftdata	
M351	Luftare linje 3	1935	3528	4446	6055	3991	Driftdata	

M352	Omrörare linje 3	8739	8616	8754	8711	8705	Driftdata	
M353	Luftare linje 3	6532	4633	4419	6094	5420	Driftdata	
M354	Omrörare linje 3	8591	8365	8527	8658	8535	Driftdata	
M355	Luftare linje 3	6528	3298	1729	1395	3238	Driftdata	
M356	Omrörare linje 3	8757	8699	8366	8670	8623	Driftdata	
M357	Luftare linje 3	1759	670	998	923	1088	Driftdata	
M358	Omrörare linje 3	8759	8452	8640	8736	8647	Driftdata	
M347	Överskotts- slampump	2328	3344	1253	1831	2189	Driftdata	
M348	Överskotts- slampump	4433	3554	2738	2004	3182	Driftdata	
Biologisk rening – slutsedimentering								
M450	Returslampump 1	7411	8747	8754	8687	8400	Driftdata	
M418	Slamskrapa 1	8759	8739	8755	8737	8748	Driftdata	
M451	Returslampump 2	7411	8757	8754	8711	8408	Driftdata	
M419	Slamskrapa 2	8759	8736	8755	8732	8746	Driftdata	
M452	Returslampump 3	7391	8757	8588	8711	8362	Driftdata	
M420	Slamskrapa 3	8759	8739	8755	8737	8748	Driftdata	
M453	Returslampump 4	7658	8732	8229	8647	8317	Driftdata	
M421	Slamskrapa 4	8759	8755	8367	8737	8655	Driftdata	
M454	Returslampump 5	8683	8757	8710	5529	7920	Driftdata	
M422	Slamskrapa 5	8691	8756	8753	5530	7933	Driftdata	
M455	Returslampump 6	8572	8654	8707	5362	7824	Driftdata	
M423	Slamskrapa 6	8756	8736	8729	5389	7903	Driftdata	
M456	Returslampump 7a	7411	8755	8754	8687	8402	Driftdata	
M457	Returslampump 7b	8759	8755	8754	8737	8751	Driftdata	
M424	Slamskrapa 7	7411	8755	8754	8711	8408	Driftdata	
M458	Returslampump 8a	8759	8755	8755	8732	8750	Driftdata	
M459	Returslampump 8b	7391	8588	8588	8711	8320	Driftdata	
M425	Slamskrapa 8	8759	8755	8755	8737	8752	Driftdata	
M460	Returslampump 9a	7658	8230	8229	8647	8191	Driftdata	
M461	Returslampump 9b	8759	8367	8367	8737	8558	Driftdata	
M426	Slamskrapa 9	8683	8710	8710	5529	7908	Driftdata	
M462	Returslampump 10a	8691	8754	8753	5529	7932	Driftdata	
M463	Returslampump 10b	8572	8708	8707	5362	7837	Driftdata	
M427	Slamskrapa 10	8756	8729	8729	5389	7901	Driftdata	
Slamförtjockning och slamlager								
M531	Gravitations- förtjockare	8760	8760	8760	8760	8760	Skattning	Antas gå kontinuerligt.
M532	Slampump	3525	5265	3475	3686	3988	Driftdata	
M533	Slampump	3286	2656	4865	4593	3850	Driftdata	
M562	Mekanisk slamförtjockare	6822	7148	8347	8292	7652	Driftdata	
M566	Slampump	6708	5739	6049	5482	5995	Driftdata	
M534	Omrörare polymertank	-	-	864	-	864	Driftdata	Har endast hittat data för ett år.
M535	Doserskrub polymer	-	-	14	-	14	Driftdata	Har endast hittat data för ett år.
M536	Transportfläkt polymer	-	-	16	-	16	Driftdata	Har endast hittat data för ett år.
M537	Polymerpump	6822	7148	8347	8292	7652	Skattning	Antas gå samtidigt som den mekaniska förtjockaren.
M519	Omrörare externslamlager	8760	8760	8760	8760	8760	Skattning	Antas gå kontinuerligt.
M569	Externslampump	585	736	1189	2002	1128	Driftdata	
M570	Externslampump	549	847	1199	1064	915	Driftdata	
M873	Omrörare fettlager	8760	8760	8760	8760	8760	Skattning	Antas gå kontinuerligt.
M894	Fettpump	273	194	206	190	216	Driftdata	
Rötning								
M574	Omrörare rötkammare	8275	8275	8275	8275	8275	Driftdata/ skattning	Data endast tillgänglig för en period av 2017, medelvärden för dessa

									dagar användes för att beräkna drifttider för övrig tid.
M577	Omrörare röt-kammare	8275	8275	8275	8275	8275	Driftdata/skattning		Samma som ovan.
M586	Slam-cirkulationspump	4355	4355	4355	3234	4075	Driftdata/skattning		Data endast tillgänglig för en period av 2017, medelvärden för dessa dagar användes för att beräkna drifttider för övrig tid. För 2014-2016 antogs normal drift, dvs att båda pumparna går lika mycket.
M587	Slam-cirkulationspump	4355	4355	4355	5475	4635	Driftdata/skattning		Samma som ovan.
M520	Omrörare röt-slamlager	8760	8760	8760	8760	8760	Skattning		Antas gå kontinuerligt.
Slamavvattning									
M656	Röt-slampump 1	731	908	1358	1344	1085	Driftdata		
M654	Polymerpump 1	731	909	1359	1345	1086	Driftdata		
M658	Trumma centrifug 1	750	932	1418	1386	1122	Driftdata		
M650	Skruv centrifug 1	752	935	1418	1371	1119	Driftdata		
M650+M658	Centrifug 1	751	934	1418	1379	1120	Driftdata		Medel av trumma och skruv.
M657	Röt-slampump 2	1075	1293	937	1307	1153	Driftdata		
M655	Polymerpump 2	1076	1294	937	1307	1154	Driftdata		
M659	Trumma centrifug 1	1110	1336	978	1369	1198	Driftdata		
M651	Skruv centrifug 1	1106	1322	978	1329	1184	Driftdata		
M651+M659	Centrifug 2	1108	1329	978	1349	1191	Driftdata		Medel av trumma och skruv.
M681	Omrörare polymertank	236	252	864	839	852	Driftdata		2014 och 2015 ej med i medel.
M683	Doserskriv polymer	25	31	14	13	21	Driftdata		
M680	Transportfläkt polymer	68	47	67	68	63	Driftdata		
M670	Omrörare rejektvattentank	8760	8760	8760	8760	8760	Skattning		Antas gå kontinuerligt.
M668	Rejektvattenpump 1	1213	1015	990	962	1045	Driftdata		
M669	Rejektvattenpump 2	0	0	0	0	0	Driftdata		
M660	Samlingsskriv	1833	2246	2322	2676	2269	Driftdata		
M661	Torrslampump	1853	2247	2371	2710	2295	Driftdata		
M672	Torrslampump	1737	2157	2380	2133	2102	Driftdata		
M663	Utmatningsskriv 1 silo	78	78	78	78	78	Skattning		Utmatningsskrivarna antas tillsammans gå 3 h per vecka.
M664	Utmatningsskriv 2 silo	78	78	78	78	78	Skattning		Utmatningsskrivarna antas tillsammans gå 3 h per vecka.
Gasanläggning									
M804	Boosterfläkt gasmotor	4312	5490	4498	3559	4465	Driftdata/skattning		Antas gå samtidigt som gasmotorn. Driftdata endast tillgänglig för en period av 2017, medeleffekt hos gasmotorn för denna tid beräknades med hjälp av denna data och data på producerad el av motorn. Beräknad medeleffekt och motorns elproduktionsdata för övrig tid användes för att beräkna drifttider för övrig tid.
M831	Processventilation fläkt	4312	5490	4498	3559	4465	Skattning		Antas gå samtidigt som gasmotorn, dvs samma drifttid som boosterfläkten.
M819	Kylvattenpump gasmotor	4312	5490	4498	3559	4465	Skattning		Antas gå samtidigt som gasmotorn, dvs samma drifttid som boosterfläkten.
M879	Cirkulationspump värmevatten gasmotor	8760	8760	8760	8730	8753	Driftdata/skattning		Data på drifttider endast tillgänglig för en period av 2017, visade på kontinuerlig drift. För 2014-2016 antogs inga driftstopp.

M595	Cirkulationspump värmevatten rötkammare	8760	8760	8760	8730	8753	Driftdata/ skattning	Samma som ovan.
Spolvatten och tryckluft								
M665	Spolvattenpump 1	8745	8752	8747	8725	8742	Driftdata	
M666	Spolvattenpump 2	76	118	353	256	201	Driftdata	
M685	Skruvkompressor	-	-	-	-	-	Data saknas	
M687	Tryckluftkompressor	2	2	2	2	2	Skattning	Går endast när M685 har driftstopp pga service.
-	Trycklufttork	500	500	500	500	500	Skattning	
Mätning och provtagning								
M646	Omröringspump	2160	2160	2160	2160	2160	Skattning	Antas gå 3 månader per år.

Tabell A3. Data från avläsning av frekvensomformare samt beräknad energianvändning för maskiner med frekvensomformare.

Information om maskinerna		Avläsning					Beräkning	
Beteckning	Funktion	Avläsning 1	Datum	Avläsning 2	Datum	Energi	Antal dagar	Energi/ år
		[kWh]	åååå-mm-dd	[kWh]	åååå-mm-dd	[kWh]		[kWh/ år]
Biologisk rening – slutsedimentering								
M450	Returslampump 1	Nollställd	2015-01-22	7807	2017-01-12	7807	721	3952
M451	Returslampump 2	Nollställd	2015-01-22	6207	2017-01-12	6207	721	3142
M452	Returslampump 3	Nollställd	2015-01-22	6433	2017-01-12	6433	721	3257
M453	Returslampump 4	Nollställd	2015-01-22	1500	2017-01-12	1500	721	3497 ¹
M454	Returslampump 5	Nollställd	2015-01-22	6724	2017-01-12	6724	721	3404
M455	Returslampump 6	Nollställd	2015-01-22	7371	2017-01-12	7371	721	3732
Slamförtjockning och slamlager								
M562	Mekanisk slamförtjockare	Nollställd	2015-01-22	1750	2017-01-13	1750	722	885
M566	Slampump	Nollställd	2015-01-22	5040	2017-01-13	5040	722	2548
M537	Polymerpump	5720	2015-01-22	7112	2017-01-13	1392	722	704
M569	Externslampump	Nollställd	2015-01-22	1350	2017-01-13	1350	722	682
M570	Externslampump	Nollställd	2015-01-22	1460	2017-01-13	1460	722	738
M894	Fettpump	Nollställd	2015-01-22	304	2017-01-13	304	722	154
Rötning								
M586	Slamcirkulationspump	Nollställd	2015-01-22	76150	2017-01-13	76150	722	38497
M587	Slamcirkulationspump	Nollställd	2015-01-22	87700	2017-01-13	87700	722	44336
M520	Omrörare rötslamlager	Nollställd	2015-01-22	153000	2017-01-13	153000	722	77348
Slamavvattning								
M656	Rötslampump 1	27694	2015-01-22	29620,5	2017-01-18	1926,5	727	967
M654	Polymerpump 1	Nollställd	2015-01-22	442	2017-01-18	442	727	222
M658+M650	Centrifug 1	61728	2015-01-22	101466	2017-01-18	39738	727	19951
M657	Rötslampump 2	21170 ²	2013-01-02	24812,5	2017-01-18	3642,5	1477	900
M655	Polymerpump 2	Nollställd	2015-01-22	418	2017-01-18	418	727	210
M659+M651	Centrifug 2	47354	2015-01-22	89930	2017-01-18	42576	727	21376
Gasläggning								
M804	Boosterfläkt gasmotor	Nollställd	2015-01-22	9138	2017-01-13	9138	722	4620
M831	Processventilation fläkt	24305	2015-01-22	30649	2017-01-13	6344	722	3207
M819	Kylvattenpump gasmotor	Nollställd	2015-01-22	43637	2017-01-13	43637	722	22060
M879	Cirkulationspump värmevatten gasmotor	Nollställd	2015-01-22	2490	2017-01-13	2490	722	1259
M595	Cirkulationspump värmevatten röt-kammare	Nollställd	2015-01-22	12200	2017-01-13	12200	722	6168
Spolvatten och tryckluft								
M665	Spolvattenpump 1	564080	2015-01-22	643288	2017-01-18	79208	727	39767

1. Frekvensomformaren byttes ut under 2016 vilket innebär att avläsningen från 2017 inte gäller hela perioden. Årsenergianvändningen ersattes med ett medelvärden för energianvändningen hos de fem andra pumparna av samma typ.
2. Ingen avläsning gjordes 2015, istället användes tidigare avläsning.

Tabell A4. Beräknad effekt för maskiner vars ström uppmäts med strömtång. Tabellen redovisar resultat av ström- och spänningsmätningar, effektfaktorer och information om hur data tagits fram.

Information om maskinerna		Mätning				Effekt	Kommentarer
Beteckning	Funktion	Spänning (V)	Ström [A]	Mätdatum ååmmdd	Effektfaktor cos φ	Aktiv effekt [kW]	
Mekanisk rening							
M231	Rensgaller 1	393,3	2,44	2018-10-18	0,75	1,25	
M232	Tvättpress 1	393,3	5,15	2018-10-18	0,8	2,81	
M258	Mottrycksskruv 1	393,3	1,67	2018-10-18	0,78	0,89	Skattad effektfaktor.
M233	Rensgaller 2	393,3	3,8	2018-10-18	0,75	1,94	
M234	Tvättpress 2	393,3	9,8	2018-10-18	0,8	5,34	
M259	Mottrycksskruv 2	393,3	2,28	2018-10-18	0,78	1,21	Skattad effektfaktor.
M260	Samlingsskruv	393,3	1,78	2018-10-18	0,72	0,87	
M280	Omrörare sandfång	393,3	2,78	2018-10-18	0,74	1,40	Skattad effektfaktor, antar samma som omrörare externslamkamer.
M281	Omrörare sandfång	393,3	2,85	2018-10-18	0,74	1,44	Skattad effektfaktor, antar samma som omrörare externslamkamer.
M282	Omrörare sandfång	393,3	2,83	2018-10-18	0,74	1,43	Skattad effektfaktor, antar samma som omrörare externslamkamer.
M236	Sandskruv	393,3	3,29	2018-10-18	0,78	1,75	Skattad effektfaktor.
M237/M218	Mammutpump	393,3	6,02	2018-10-18	0,74	3,03	Skattad effektfaktor.
M294	Utmatningsskruv sandtvätt	393,3	1,42	2018-10-18	0,8	0,77	
Kemisk rening							
M240	Doseringspump	393,3	0,33	2018-10-18	0,68	0,15	
M241	Doseringspump	393,3	-	-	0,68	0,15	Antar samma effekt som andra doseringspumpen.
M244	Primärslampump 1	393,3	3,57	2018-10-18	0,78	1,90	Skattad effektfaktor, antar samma som slampumpar i gamla slutsed.
M245	Slamskrapa 1	393,3	0,48	2018-10-18	0,61	0,20	
M247	Primärslampump 2	393,3	4,69	2018-11-01	0,78	2,49	Skattad effektfaktor, antar samma som slampumpar i gamla slutsed.
M248	Slamskrapa 2	393,3	0,51	2018-10-18	0,61	0,21	
M250	Primärslampump 3	393,3	-	-	0,78	2,49	Antar samma effekt som primärslampump 2.
M251	Slamskrapa 3	393,3	0,47	2018-10-18	0,61	0,20	
M253	Primärslampump 4	393,3	3,79	2018-10-18	0,78	2,01	Skattad effektfaktor, antar samma som slampumpar i gamla slutsed.
M254	Slamskrapa 4	393,3	0,52	2018-10-18	0,61	0,22	
Biologisk rening - luftning							
M331	Luftare linje 1	393,3	11	2018-10-18	0,84	6,29	
M332	Omrörare linje 1	393,3	9,63	2018-10-18	0,84	5,51	
M333	Luftare linje 1	393,3	7,61	2018-10-18	0,79	4,10	
M334	Omrörare linje 1	393,3	6,84	2018-10-18	0,79	3,68	
M335	Luftare linje 1	393,3	10,25	2018-10-18	0,84	5,87	
M336	Omrörare linje 1	393,3	10,05	2018-10-18	0,84	5,75	
M337	Luftare linje 1	393,3	7,88	2018-10-18	0,79	4,24	
M338	Omrörare linje 1	393,3	7,44	2018-10-18	0,79	4,00	
M339	Luftare linje 2	393,3	10,8	2018-10-18	0,84	6,18	
M340	Omrörare linje 2	393,3	11,48	2018-10-18	0,84	6,57	
M341	Luftare linje 2	393,3	6,84	2018-10-18	0,79	3,68	
M342	Omrörare linje 2	393,3	7,05	2018-10-18	0,79	3,79	
M343	Luftare linje 2	393,3	10,59	2018-10-18	0,84	6,06	
M344	Omrörare linje 2	393,3	10,13	2018-10-18	0,84	5,80	
M345	Luftare linje 2	393,3	7,17	2018-10-18	0,79	3,86	
M346	Omrörare linje 2	393,3	7,55	2018-10-18	0,79	4,06	
M351	Luftare linje 3	393,3	11,1	2018-10-18	0,84	6,35	
M352	Omrörare linje 3	393,3	15,3	2018-10-18	0,84	8,75	
M353	Luftare linje 3	393,3	11,2	2018-10-18	0,84	6,41	
M354	Omrörare linje 3	393,3	11,9	2018-10-18	0,84	6,81	

M355	Luftare linje 3	393,3	12,3	2018-10-18	0,84	7,04	
M356	Omrörare linje 3	393,3	15,6	2018-10-18	0,84	8,93	
M357	Luftare linje 3	393,3	11,1	2018-10-18	0,84	6,35	
M358	Omrörare linje 3	393,3	17,9	2018-10-18	0,84	10,24	
M347	Överskotts- slampump	393,3	4,43	2018-10-18	0,91	2,75	
M348	Överskotts- slampump	393,3	4,34	2018-10-18	0,91	2,69	
Biologisk rening - slutsedimentering							
M418	Slamskrapa 1	393,3	0,33	2018-10-18	0,61	0,14	
M419	Slamskrapa 2	393,3	0,4	2018-10-18	0,61	0,17	
M420	Slamskrapa 3	393,3	0,51	2018-10-18	0,61	0,21	
M421	Slamskrapa 4	393,3	0,35	2018-10-18	0,61	0,15	
M422	Slamskrapa 5	393,3	0,55	2018-10-18	0,61	0,23	
M423	Slamskrapa 6	393,3	0,4	2018-10-18	0,61	0,17	
M456	Returslampump 7a	393,3	3,72	2018-10-18	0,78	1,98	Skattad effektfaktor, antar samma som slampumpar i gamla slutsed.
M457	Returslampump 7b	393,3	3,77	2018-10-18	0,78	2,00	Skattad effektfaktor, antar samma som slampumpar i gamla slutsed.
M424	Slamskrapa 7	393,3	2,2	2018-10-18	0,8	1,20	
M458	Returslampump 8a	393,3	3,87	2018-10-18	0,78	2,06	Skattad effektfaktor, antar samma som slampumpar i gamla slutsed.
M459	Returslampump 8b	393,3	3,84	2018-10-18	0,78	2,04	Skattad effektfaktor, antar samma som slampumpar i gamla slutsed.
M425	Slamskrapa 8	393,3	2,25	2018-10-18	0,8	1,23	
M460	Returslampump 9a	393,3	4,06	2018-10-18	0,78	2,16	Skattad effektfaktor, antar samma som slampumpar i gamla slutsed.
M461	Returslampump 9b	393,3	3,87	2018-10-18	0,78	2,06	Skattad effektfaktor, antar samma som slampumpar i gamla slutsed.
M426	Slamskrapa 9	393,3	2,23	2018-10-18	0,8	1,22	
M462	Returslampump 10a	393,3	4	2018-10-18	0,78	2,13	Skattad effektfaktor, antar samma som slampumpar i gamla slutsed.
M463	Returslampump 10b	393,3	3,18	2018-10-18	0,78	1,69	Skattad effektfaktor, antar samma som slampumpar i gamla slutsed.
M427	Slamskrapa 10	393,3	2,12	2018-10-18	0,8	1,16	
Slamförtjockning och slamlager							
M531	Gravitations- förtjockare	393,3	1,46	2018-10-18	0,72	0,72	
M532	Slampump	-	-	2018-10-18	0,8	0,30	Effekt avläst från frekvensomformare.
M533	Slampump	-	-	-	0,8	0,30	Antar samma effekt som slampump M532.
M519	Omrörare externslamlager	393,3	2,69	2018-10-18	0,74	1,36	
M873	Omrörare fettlager	393,3	2,87	2018-10-18	0,74	1,45	Skattad effektfaktor, antar samma som omrörare externslamlager.
Rötning							
M574	Omrörare rötkammare	393,3	3,62	2018-10-18	0,74	1,82	Skattad effektfaktor, antar samma som omrörare externslamlager.
M577	Omrörare rötkammare	393,3	3,31	2018-10-18	0,74	1,67	Skattad effektfaktor, antar samma som omrörare externslamlager.
Slamavvattning							
M668	Rejektump 1	393,3	9,03	2018-11-01	0,86	5,29	
M669	Rejektump 2	393,3	-	-	-	5,29	Antar samma effekt som rejeqvattenpump 1.
M663	Utmatningsskriv 1 silo	393,3	31,6	2018-11-01	0,84	18,08	
M664	Utmatningsskriv 2 silo	393,3	-	-	-	18,08	Antas samma effekt som andra utmatningsskriven.

Tabell A5. Data från energimätare för åren 2014-2017 och beräknat årsmedelvärde.

Information		Energi [kWh/år]				Årsmedel
Beteckning	Funktion	2014	2015	2016	2017	
Spolvatten och tryckluft						
M685	Tryckluftkompressor	69828	62703	66151	65380	66016
Värme						
EM1	Uppvärmning rötchammare	1616209	1570426	1508098	1375687	1517605

Tabell A6. Beräknade nyckeltal för den specifika energianvändningen hos olika maskiner och processer.

Nyckeltal energianvändning						
Komponent		Energi	Nämnare	Nyckeltal		
Omrörning	Medium	[kWh/år]	Bassängvolym [m3]	[kWh/m3]		
Sandfång	Vatten	37324	120	311		
Gravitationsförtjockare	Slam TS 2%	6273	340	18		
Externslamlager	TS 1,6 %	11879	150	79		
Fettlager	Fett TS 5 %	12674	60	211		
Rötkammare	TS 4,4	28908	2300	13		
Rötslamlager	Röttslam TS 2,8 %	77348	560	138		
Pumpning & transport	Medium	[kWh/år]	Flöde [m3/år]	Nyckeltal [kWh/100 m3]	Typ av pump	
Pumpar försed	Primärslam	10303	170922	6,03	Dränkpump	
Överskottslampumpar	Bioslam	14573	153089	9,52	Centrifugalpump	
Pumpar slutsed gamla	Bioslam	20984	510295	4,11	Dränkpump	
Pumpar slutsed nya	Bioslam	134473	1020590	13,2	Dränkpump	
Pumpar efter gravförtjockning	Slam TS 3,3 %	2351	51229	4,59	Excenterskruvpump	
Slampumpning till rötkammare	Slam TS 7,1 %	2548	24025	10,6	Excenterskruvpump	
Externslampumpar	Substrat TS 1,6 %	1421	17752	8,00	Excenterskruvpump	
Fettpump	Fett TS 5 %	154	1412	10,9	Excenterskruvpump	
Cirkulationspumpar rötkammare	Slam TS 4,4 %	82833	2001047	4,14		
Rötslampumpar	Röttslam TS 2,8 %	1867	38600	4,84	Excenterskruvpump	
Samlingsskruv	Torrslam	4992	4056	123		
TS-pumpar	Torrslam TS 26,1 %	96734	4056	2385	Kanonkompressor	
Rejektvattenpump	Rejektvatten	5528	34544	16,0		
Utmatning silo	Torrslam TS 26,1 %	2821	4056	69,5		
Slamskrapor	Medium	[kWh/år]	Flöde [m3/år]	Nyckeltal [kWh/100 m3]	Bassängvolym [m3]	Nyckeltal [kWh/m3]
Slamskrapor försed	Primärslam	7168	170922	4,2	1080	6,64
Slamskrapor slutsed gamla	Bioslam	8892	510295	1,7	1800	4,94
Slamskrapor slutsed nya	Bioslam	39550	1020590	3,9	3000	13,18
Övrigt	Nämnare	[kWh/år]	Flöde [m3/år]	Nyckeltal [kWh/100 m3]		
Rensuppfång (Rensgaller, tvättpressar, skruvar)	Inkommande vatten	11194	5753962	0,19		
Samlingsskruv	Inkommande vatten	425	5753962	0,01		
Sandtransport (sandskruv, mammutpump, utmatningsskruv)	Inkommande vatten	26461	5753962	0,46		
Kemdosering	Inflöde biosteg	1355	5890756	0,02		
Biorening luftning + omrörning	Inkommande vatten	1001757	5753962	17,4		
Mekanisk förtjockare	Slamflöde	885	51229	1,73		
Mekanisk förtjockare	Slamflöde innan grav förtj	885	324011	0,27		
Polymerdosering mek förtj	Slamflöde	1047	51229	2,04		
Polymerdosering mek förtj	Slamflöde innan grav. förtjockare	1047	324011	0,32		
Centrifuger	Röttslamflöde	41327	38600	107		
Polymerdosering centrifuger	Röttslamflöde	974	38600	2,52		

Omrörare rejektvattentank	Rejektvattenflöde	9636	34544	27,9		
Cirkulation värmevatten RK	Inflöde RK	6168	43189	14,3		
Gasmotoranläggning	Gas till gasmotor	31146	448648	6,94		
Värme rötchammare	Inflöde RK	1517605	43189	3514		
Processövergripande	Nämnare	[kWh/år]	Antal pe	Nyckeltal [kWh/pe]		
Spolvatten	Antal pe	41273	47456	0,87		
Tryckluft	Antal pe	66903	47456	1,41		
Mätning och provtagning	Antal pe	9200	47456	0,19		

Tabell A7. Beräknad energianvändning i framtiden för olika processer. Nyckeltal och flöden som använts i beräkningarna är också redovisade. Energianvändning för gashantering är inte inkluderad.

Process	Nyckeltal	Enhet	Framtid		Kommentarer
			Volym [m3/år]	Energi [kWh/år]	
Mekanisk rening				79059	
Renshantering (renssilar, tvättpressar, skruvar, lauderrännor)	0,20	kWh/100 m3 inkommande vatten	8000000	16155	Samlingsskrub ersatt av lauderrännor, antas ej påverka energianvändningen.
Bottenluftare med kompressorer sandfång	120,9	kWh/m3 bassängvolym	216	26114	Nyckeltal från luftning Borlänges biosteg.
Sandtransport (sandskrub, mammutpump, utmatningsskrub)	0,46	kWh/100 m3 inkommande vatten	8000000	36790	
Förluftning				126345	
Bottenluftare med kompressor	120,9	kWh/m3 bassängvolym	1000	120900	Nyckeltal från luftning Borlänges biosteg.
Slampumpning inkl. cirkulation	6,03	kWh/100 m3	90325	5445	Nyckeltal från dagens pumpar försed. Dubblar flödet för att inkludera cirkulation.
Kemdosering				11885	
Doseringspumpar	0,02	kWh/100 m3 inflöde biosteg	8190191	1885	
Omrörare flockningsbassäng	-	-	-	10000	Skattad energianvändning, omrörare på drygt 1 kW som går kontinuerligt, baserat på dagens omrörare sandfång, externslamlager och fettlager.
Försedimentering				25770	
Slamskrapor	4,19	kWh/100 m3 slamflöde ut från försed	252119	10573	
Slampumpar	6,03	kWh/100 m3 slamflöde ut från försed	252119	15197	
Biologisk rening - aktivslamprocess				1125048	
Kompressorsdrivna bottenluftare	12,00	kWh/100 m3 behandlat vatten	8190191	982823	Uppskattning som ligger mellan dagens energianvändning och energianvändningen i luftningen på Borlänges reningsverk.
Överskottsslampumpar	9,52	kWh/100 m3 pumpat slam	180651	17197	
Slamskrapor mellansedimentering	2,81	kWh/100 m3 slamflöde ut från sedimenteringen	1806507	50743	Nyckeltal medel av slamskrapor gamla och nya slutsed idag.
Slampumpar mellansedimentering	4,11	kWh/100 m3 slamflöde ut från sedimenteringen	1806507	74286	Nyckeltal från dagens gamla slutsed där frekvensomformare finns på pumparna.
Biologisk rening - MBR				6552153	
MBR - troligt	0,80	kWh/m3	8190191	6552153	Nyckeltal från litteratur.
MBR - best case	0,40	kWh/m3	8190191	3276076	Nyckeltal från litteratur.
Efterfällning				11885	
Doseringspumpar	0,02	kWh/100 m3 vattenflöde vid doseringspunkt	8190191	1885	Nyckeltal från dagens kemdosering innan biosteg. Använder inflöde biosteg.
Omrörare flockningsbassäng	-	-	-	10000	Skattad energianvändning, omrörare på drygt 1 kW som går kontinuerligt, baserat på dagens omrörare sandfång, externslamlager och fettlager.
Slutsedimentering				33605	
Slamskrapor	9,06	kWh/m3 bassängvolym	3600	32622	Nyckeltal medel av slamskrapor gamla och nya slutsed idag, använder bassängvolym istället för slamflöde.
Slampumpar	4,11	kWh/100 m3 slamflöde ut från sedimenteringen	23897	983	Använder nyckeltal från dagens gamla slutsed där frekvensomformare finns på pumparna.

Slamförtjockning och slamlager				124530	
Blandslamlager med omrörare	79	kWh/m3 lagervolym	300	23758	Nyckeltal från dagens omrörning externslamlager.
Slampumpar innan förtjockning	4,59	kWh/100 m3 pumpat slamflöde till förtjockning	477932	21936	Nyckeltal från dagens pumpar efter gravitationsförtjockare.
Gravitationsförtjockare med grindomrörare	18	kWh/m3 volym hos grav. förtjockaren	495	9133	Tar med båda förtjockarna för att uppnå samma TS-halt som idag.
Mekanisk slamförtjockare inkl polymerdosering	0,60	kWh/100 m3 slamflöde till grav.förtjockaren	477932	2849	Använder flöde innan grav förtjockare
Slampumpar efter förtjockning	10,6	kWh/100 m3 pumpat förtjockat slamflöde	35438	3758	Nyckeltal från dagens pumpar efter mekanisk förtjockare.
Förtjockat slamlager med omrörare	100	kWh/m3 lagervolym	200	20000	Skattat nyckeltal, antas vara lite högre än lagret med oförtjockat slam.
Slampumpar till röt-kammare	10,6	kWh/100 m3 pumpat slamflöde	35438	3758	
Externslamlager med omrörare	79	kWh/m3 lagervolym	300	23758	
Externslampumpar	8,00	kWh/100 m3 pumpat flöde	34396	2752	
Fettlager med omrörare	-	-	-	12674	Antar oförändrad mängd fett.
Fettpump	-	-	-	154	Antar oförändrad mängd fett.
Rötning				378822	
Omrörare röt-kammare	13	kWh/m3 röt-kammarevolym	3491	43883	
Slamcirkulationspumpar	4,14	kWh/100 m3 cirkulerat slamflöde	3300994	136644	Bortser från att varje röt-kammare ska ha egen cirkulationspump i framtiden.
Röt-slamlager med omrörare	138	kWh/m3 lagervolym	1000	138121	
Cirkulationspump röt-slamlager	-	-	-	50000	Skattad energianvändning, pump som går kontinuerligt med effekt på drygt 5 kW.
Cirkulationspump värmevatten röt-kammare	14	kWh/100 m3 inflöde till röt-kammaren	71247	10174	
Slamavvattning				311209	
Röt-slampumpar	4,84	kWh/100 m3 pumpat röt-slamlöde	88572	4285	
Skruvpressar	21	kWh/100 m3 röt-slamlöde till avvattning	88572	18966	Använder ca 20% av energin hos centrifuger enligt konsultrapporterna.
Polymerdosering	2,52	kWh/100 m3 röt-slamlöde till avvattning	88572	2235	
Omrörare rejektivattentank	27,9	kWh/100 m3 rejektivattenflöde	78829	21990	
Rejektivattenpumpning	16,0	kWh/100 m3 pumpat rejektivattenflöde	78829	12616	
Torrslamtransport	2508	kWh/100 m3 transporterat torrslamlöde	9734	244342	
Utmatningsskruvar silo	69,5	kWh/100 m3 utmatat torrslamlöde	9734	6775	
SBR-reaktor				11095	
Bottenluftning med kompressor	-	-	-	10000	Skattning, ca en tredjedel av luftning sandfång.
Kemtilfsats	-	-	-	1000	Skattad energianvändning, dagens kemdosering och polymerdosering drar ungefär 1000 kWh/år.
Överskottslampumpning	9,52	kWh/100 m3 slamflöde	1000	95	Nyckeltal dagens överskottslampumpar biosteg.
Spolvatten och tryckluft			pe framtid	159565	
Spolvattenpumpar	0,87	kWh/pe	70000	60880	
Kompressor	1,41	kWh/pe	70000	98685	
Mätning och provtagning			pe framtid	13571	
Mätare och provtagare	0,19	kWh/pe	70000	13571	
Värme			m3 framtid	2503492	
Uppvärmning röt-kammare	3514	kWh/100 m3 inkommande flöde till röt-kammaren	71247	2503492	

Tabell A8. Data från flödesmätare, TS- och GF-halter och beräknade flöden för åren 2014-2017 samt årsmedelvärden för de fyra åren.

Beskrivning		Värden					Kommentarer
		2014	2015	2016	2017	Årsmedel	
Organiskt material							
	BOD ₇ [ton/år]	1253	1331	1089	1177	1213	
	Teoretiskt pe	49041	52094	42622	46067	47456	Beräknat med 70 g BOD ₇ /pe/dag.
Flöden från flödesmätare [m³/år]							
F201	Inkommande avloppsvatten	5836057	6408870	5841145	4929777	5753962	Omledning vid reparation kan ge små fel.
F284	Inkommande brunns slam	11906	14000	12600	12200	12677	
F213	Inflöde till biosteg	5840674	6044454	5950871	5727026	5890756	Okalibrerad mätare, kan innebära osäkerhet.
F276	Slamflöde ut från försed	192720	166440	149328	175200	170922	
F301	Överskottsslamflöde	163507	166842	153238	128767	153089	
F501	Slamflöde till mekanisk förtjockare	50442	55431	52975	46067	51229	
F537	Flöde till rötkammare från externslamlager	11400	21410	16014	22185	17752	
F896	Flöde till rötkammare från fettlager	1256	1494	1546	1352	1412	Fett blandat med vatten.
F886	Mottaget fett	-	-	-	1015	1015	
F590	Cirkulerat slam rötkammare	1996417	2011088	2001484	1995199	2001047	
-	Rötslamflöde till centrifuger	35276	38574	38806	41744	38600	
	Mottaget externslam	-	-	-	6726	6726	
-	Mottaget processpillvatten	13203	15827	14784	15801	15471	2014 ej med i medel.
TS- & GF-halter [%]							
	TS-halt slam innan gravitationsförtjockare	0,50%	0,62%	0,54%	0,45%	0,53%	Beräknat under antagandet att all TS består genom gravitationsförtjockaren.
	TS-halt slam innan mekanisk förtjockare	3,5%	3,7%	3,1%	3,0%	3,3%	
	GF-halt slam innan mekanisk förtjockare	78,4%	79,3%	77,8%	78,6%	78,5%	
	TS-halt slam innan rötkammare	7,1%	7,0%	7,4%	7,0%	7,1%	
	GF-halt slam innan rötkammare	79,2%	80,0%	81,0%	80,0%	80,1%	
	TS-halt externslam och processpillvatten	1,8%	1,8%	1,9%	1,6%	1,8%	
	GF-halt externslam och processpillvatten	69,8%	70,4%	68,6%	69,3%	69,5%	
	TS-halt rötslam efter rötkammare	3,0%	2,8%	2,8%	2,4%	2,8%	
	GF-halt rötslam efter rötkammare	63,5%	65,0%	64,7%	65,3%	64,6%	
	TS-halt rötslam efter avvattningscentrifuger	26,4%	25,8%	25,4%	26,7%	26,1%	
	Andel primärslam	54,1%	49,9%	49,4%	57,6%	52,8%	
Beräknade flöden [m³/år]							
	Slamflöde till gravitationsförtjockare	356227	333282	302566	303967	324011	Summa överskottsslamflöde och slamflöde ut från försed.
	Slamflöde ut från slutsed (returslam)	1635070	1668420	1532380	1287670	1530885	Antar att 10 % av returslamflödet tas ut som överskottsslam.
	Slamflöde ut från slutsed - gamla delen	545023	556140	510793	429223	510295	Antar att 1/3 av slammet hamnar i gamla slutsed då en av luftningslinjerna går dit.
	Slamflöde ut från slutsed - nya delen	1090047	1112280	1021587	858447	1020590	Antar att 2/3 av slammet hamnar i gamla slutsed då två av luftningslinjerna går dit.
	Slamflöde till rötkammare	24866	29299	22192	19743	24025	Antar att all TS består genom mekaniska förtjockaren.
	Totalt inflöde rötkammare	37522	52203	39752	43280	43189	Summa inflöden från lager och mekanisk förtjockare.
	Torrslamflöde	4009	4186	4278	3752	4056	Antar att all TS består genom centrifugen.
	Rejektvattenflöde	31267	34388	34528	37992	34544	Antar att all TS består genom centrifugen och att rejekt består av endast vatten.

Tabell A9. Volymmer på dagens reningsverk respektive dimensionering för Framtidens Främby.

Volymmer [m ³]			
	Idag	Ombyggnad	Nybyggnad
Sandfång	120	216	
Förluftning	-	1000	
Försed	1080	2685	2800
Luftning	3600		-
Mellansed	-	1829	3402
Slutsed	4800	1829	3600
Slutsed - gamla delen	1800	-	-
Slutsed - nya delen	3000	-	-
Blandslamlager	-	150	300
Gravitationsförtjockare	340	-	495
Förtjockat slamlager	-	200	
Externslamlager	150	300	408
Fettlager	60	60	
Rötkammare	2300	3436	
Rötslamlager	560	1000	

Tabell A10. Beräknade och uppskattade flödesändringar i framtiden samt information om hur värdena tagits fram.

Årsvärden flöden				
Beskrivning	Idag	Framtid	Ökning	Kommentarer
Antal pe	47456	70000	48%	
Inkommande [m3]	5753962	8000000	39%	Skattat utifrån konsultrapport.
BOD ₇ [kg]	1212500	1788500	48%	Antar ökning genom pe.
Inflöde biosteg [m3]	5890756	8190191	39%	Antar samma förhållande inflöde/biosteg som idag.
Slamflöde ut från förluftning [m3]	-	45163	-	Antar att 20% av bioslammet tas ut här. Totalt bioslam ökning enligt pe.
Slamflöde ut från försed [m3]	170922	252119	48%	Antar ökning enligt pe.
Returslamflöde (slutsed/mellansed) [m3]	1530885	1806507	18%	Antar att överskott är 10% av returslamflöde.
Överskottsslamflöde [m3]	153089	180651	18%	Antar att 80 % av bioslammet tas ut här. Totalt bioslam ökning enligt pe.
Slamflöde ut från extra slutsed [m3]	-	23897	-	Antar att detta är extra slam jämfört med idag. Antar 5% av slammet som går till RK.
Flöde till första förtjockaren [m3]	324011	477932	48%	Antar ökning enligt pe.
Flöde till mekanisk förtjockare [m3]	51229	-	-	
Förtjockat slamflöde till RK [m3]	24025	35438	48%	Antar att TS-halter före och efter förtjockning är samma som idag.
Rejektvattenflöde från förtjockning [m3]	-	442494	-	Slammets volymminskning, bortser från vatten som tillsätts vid mekaniska förtjockaren.
Externslamflöde/spill till RK [m3]	17752	34396	94%	Se beräkningar biogasdel.
Fett till RK [m3]	1412	1412	0%	Oförändrat.
Totalt inflöde RK [m3]	43189	71247	65%	
Slamcirkulation röt-kammare [m3]	2001047	3300994	65%	Antar att mängden cirkulerat slam är proportionell mot inflödet till RK.
Rötslamflöde [m3]	38600	88572	129%	Antar att utflödet är proportionellt mot inflödet. Plus från SBR och slutsed.
Torrslamflöde [m3]	4056	9743	140%	Antar rötslam samma TS-halt som idag och avvattnat slam TS-halt 25%.
Rejektvattenflöde från avvattning [m3]	34544	78829	128%	
Slamflöde från SBR-reaktor [m3]	-	1000	-	Skattning. Extra slam jämfört med idag.
Rejektvattenflöde från SBR-reaktor [m3]	-	520323	-	Flöde från förtjockning och avvattning, minus volym slamuttag. Bortser från rejektvatten från slamlager.
Biogasflöde [Nm3]	868419	1414092	62%	Se beräkningar biogasdel.

Tabell A11. *Processparametrar och biogasutbyte för rötningsprocessen på Främby reningsverk idag och i framtiden.*

	Idag (2017)	70000 pe	90000 pe
Processparametrar			
Organisk belastning [kg GF/m ³ /d]	1,7	1,8	2,3
Volym RK [m ³]	2300	3491	3491
Upphållstid [d]	19	18	16
Biogasproduktion			
Biogasproduktion [Nm ³ /d]	2390	3874	4727
GF-flöde [kg/d]	3965	6453	8030
Biogasutbyte [Nm ³ /ton GF]	603	600	589
Metanhalt [%]	60,5%	61,1%	61,1%
Metanproduktion [Nm ³ /d]	1446	2365	2886
Metanutbyte [Nm ³ /ton GF]	365	367	359
Metanutbyte slam			
GF-föde slam [kg/d]	3578	5791	7368
Andel GF från slam [%]	90%	90%	92%
Metanutbyte slam [Nm ³ /ton GF]	330	330	330
Metan från slam [m ³ /d]	1181	1911	2432
Metanutbyte fett			
GF-flöde fett [kg/d]	111	111	111
Andel GF från fett [%]	2,8%	1,7%	1,4%
Metanutbyte fett [Nm ³ /ton GF]	680	680	680
Metan från fett [Nm ³ /d]	76	76	76
Metanutbyte processpillvatten			
GF-flöde processpillvatten [kg/d]	275	551	551
Andel GF från processpillvatten [%]	6,9%	8,5%	6,9%
Metanutbyte processpillvatten [Nm ³ /ton GF]	688	688	688
Metan från processpillvatten [Nm ³ /d]	189	379	379

Tabell A12. Flöden till och från rötammaren på dagens anläggning från statistik samt beräknade framtida flöden.

	Idag (2017)	Framtid	År 2040
Processlam Främby			
Antal pe	46067	70000	90000
Flöde [m3/d]	54	97	125
TS-halt [% av total massa]	7,0%	7,1%	7,1%
GF-halt [% av massa TS]	80%	80%	80%
TS-flöde [kg/d]	3786	6918	8894
GF-flöde [kg/d]	3029	5538	7120
Fett			
Flöde [m3/d]	3,7	3,9	3,9
Mottaget [m3/d]	2,8	2,8	2,8
TS-halt [% av total massa]	5,0%	5,0%	5%
GF-halt [% av massa TS]	80%	80%	80%
TS-flöde [kg/d]	139	139	139
GF-flöde [kg/d]	111	111	111
Externslam + processpillvatten			
Flöde [m3/d]	60,8	94,2	94,2
TS-halt [% av total massa]	1,6%	-	-
GF-halt [% av massa TS]	69%	-	-
Externslam			
Flöde [m3/d]	18,4	9,5	9,5
TS-halt [% av total massa]	4,0%	3,6%	3,6%
GF-halt [% av massa TS]	74%	75%	74%
TS-flöde [kg/d]	746	337	337
GF-flöde [kg/d]	549	253	249
Processpillvatten			
Flöde [m3/d]	42,4	84,8	84,8
TS-halt [% av total massa]	1,0%	1,0%	1,0%
GF-halt [% av massa TS]	65%	65%	65%
TS-flöde [kg/d]	424	848	848
GF-flöde [kg/d]	275	551	551
Totalt			
Flöde [m3/d]	119	195	223
TS-halt [% av total massa]	4,3%	4,2%	4,6%
GF-halt [% av massa TS]	78%	78%	79%
TS-flöde [kg/d]	5095	8242	10218
GF-flöde [kg/d]	3965	6453	8030
Röttslam			
Flöde [m3/d]	114	-	-
TS-halt [% av total massa]	2,4%	-	-
GF-halt [% av massa TS]	65%	-	-
TS-flöde [kg/d]	2745	-	-
GF-flöde [kg/d]	1792	-	-
Nedbrytningsgrad			
Nedbrutet GF [kg/d]	2172	-	-
Nedbrytningsgrad [%]	55%	-	-

Tabell A13. Data från 2017 på volym och TS-halt för externslam från FEV:s yttre reningsverk.

Externslam från yttre verken 2017						
Reningsverk	Volym slam	TS-halt	GF-halt	Massa TS	Massa GF	Kommentarer
	[m3]	[%]	[%]	[ton]	[ton]	
Boda/Svärdsjö	1438	5,2%	77%	75	58	
Enviken	710	3,1%	71%	22	16	
Grycksbo	1209	7,0%	72%	85	61	Ska anslutas till Främby.
Linghed	515	2,7%	75%	14	10	
Bjursås	1504	2,1%	75%	32	24	Ska anslutas till Främby.
Sågmyra	705	1,3%	67%	9	6	
Vika kyrkby	416	6,5%	72%	27	20	Ska anslutas till Främby.
Vika strand	105	4,0%	74%	4	3	Ska anslutas till Främby. TS- och GF-halt medelvärde av verk där data finns.
Bergsgården	37	4,0%	74%	1	1	Ska anslutas till Främby. TS- och GF-halt medelvärde av verk där data finns.
Aspeboda	87	4,0%	74%	4	3	TS- och GF-halt medelvärde av verk där data finns.
Totalt 2017	6726	4,0%	74%	272	200	
Totalt i framtiden	3455	3,6%	75%	123	92	

Tabell A14. Beräknad energiproduktion med biogas på Framtidens Främby för olika användningsområden för biogasen.

Energiproduktion		Källor
Biogas		
Biogasproduktion [Nm ³ /år]	1414092	
Metanhalt [%]	61,1%	Medelvärde Främbys producerade biogas 2014-2017.
Metanproduktion [Nm ³ /år]	863303	
Energiinnehåll metan [kWh/Nm ³]	10	Svenskt Gastekniskt Center 2012.
Energiinnehåll biogasen [kWh/år]	8633029	
Värmeproduktion		
Verkningsgrad värme [%]	85%	Runevad 2018.
Producerad värme [kWh/år]	7338075	
Kapacitet [kW]	838	
Värmebehov Framtidens Främby [kWh/år]	2503492	Beräknat.
Självförsörjandegrad värme [%]	293%	
Kraftvärmeproduktion		
Verkningsgrad el [%]	30%	Enligt data från dagens gasmotor.
Verkningsgrad värme [%]	60%	Svenskt Gastekniskt Center 2012.
Producerad el [kWh/år]	2589909	
Kapacitet el [kW]	296	
Producerad värme [kWh/år]	5179818	
Elbehov Framtidens Främby MBR [kWh/år]	7839491	Beräknat, Framtidens Främby med MBR i biosteget.
Självförsörjandegrad el med MBR [%]	33%	
Elbehov Framtidens Främby AS [kWh/år]	2412386	Beräknat, Framtidens Främby med aktivslamprocess i biosteget.
Självförsörjandegrad el med AS [%]	107%	
Värmebehov Framtidens Främby [kWh/år]	2503492	Beräknat.
Självförsörjandegrad värme [%]	207%	
Elförbrukning villa [kWh]	5000	Konsumenternas energimarknadsbyrå 2019.
Antal villor som kan försörjas med el	518	
Uppgraderad gas		
Metanslip [%]	1%	Bauer et al. 2012.
Metan efter uppgradering [Nm ³ /år]	854670	
Metanhalt efter uppgradering [%]	97%	Antagande baserat på Svenskt Gatekniskt Center 2012.
Volym gas 97 % metan [Nm ³ /år]	881103	
Motsvarande bensin per gasvolym [l/Nm ³ fordonsgas]	1,1	Svenskt Gastekniskt Center 2012.
Motsvarande mängd bensin [l/år]	969213	
Gensomsnittlig bränsleåtgång bensinbil [l/mil]	0,70	Antagande baserat på Naturvårdsverket (2018a).
Genomsnittlig körsträcka personbil [mil]	1211	Trafikanalys 2018.
Antal personbilar som kan köras på biogasen	1143	

Tabell A15. Ekonomi och energianvändning för olika användningsområden för biogasen.

Användningsområden		Källor
Värmeproduktion		
Pris värme [kr/MWh]	150	Muntlig källa Runevad 2018.
Värmens värde [kr/år]	1100711	
Investeringskostnad [kr]	2000000	Uppskattning utifrån muntlig källa Runevad 2019.
"Återbetalningstid" [år]	1,8	
Energianvändning [kWh/år]	70000	Uppskattning utifrån muntlig källa Runevad 2019.
Kraftvärmeproduktion		
Pris el [kr/MWh]	350	Uppskattat utifrån prisprognos från Skellefteå Kraft.
Pris elcertifikat [kr/MWh]	100	Uppskattat utifrån Energimyndigheten u.å.
Elens värde [kr/år]	1165459	
Pris värme [kr/MWh]	150	Muntlig källa Runevad 2018.
Värmens värde [kr/år]	776973	
Nyckeltal investeringskostnad [kr/kW]	15000	Uppskattning utifrån Sundberg, Svensson & Johansson 2011.
Investeringskostnad för 300 kW el [kr]	4500000	
"Återbetalningstid" [år]	2,3	
Nyckeltal energianvändning [kWh/100 Nm ³]	6,9	Enligt data från dagens gasmotor.
Energianvändning [kWh/år]	98168	
Uppgradering till fordonsgas		
Densitet biogas 97% metan [kg/Nm ³]	0,75	E.ON Biofor Sverige AB u.å.
Massa biogas [kg/år]	660827	
Pris gas [kr/kg]	9	Från Borlänge Energis kalkyl.
Gasens värde [kr/år]	5947445	
Nyckeltal investeringskostnad [kr/Nm ³ rågas/h]	55000	Uppskattning utifrån Bauer et al. 2012.
Investeringskostnad [kr]	8878429	
"Återbetalningstid" [år]	1,5	
Nyckeltal energianvändning [kWh/Nm ³ rågas]	0,3	Bauer et al. 2012.
Energianvändning [kWh/år]	424227	

Tabell A16. Data på producerad gas och gasmotordrift för åren 2014-2017 samt beräknade årsmedelvärden för perioden.

	2014	2015	2016	2017	Årsmedel	Kommentarer
Gasproduktion						
Gasflöde fackla [Nm3/år]	430269	304709	432897	511209	419771	Flödesmätare F550.
Gasflöde gasmotor [Nm3/år]	433736	563554	450662	346640	448648	Värden från flödesmätare F806 korrigerade, multiplicerade med faktor 0,9424 framtagen med data från 2018.
Total gasproduktion [Nm3/år]	864005	868263	883559	857849	868419	Summa flöde fackla och gasmotor.
Metanhalt [%]	62,4%	60,9%	60,4%	60,5%	61,1%	Från driftdata.
Antal dagar med korrekt data	365	365	360	359	362	Data saknas vissa dagar.
Medelproduktion gas [Nm3/d]	2367	2379	2454	2390	2397	Beräknat.
Teoretiskt energiinnehåll gas [kWh/år]	5391390	5287723	5336698	5189987	5301450	Beräknat med 10 kWh/Nm3 metan (Svenskt Gastekniskt Center 2012).
Gasmotor						
Teoretiskt energiinnehåll gas [kWh/år]	2706512	3432045	2722000	2097173	2739433	Beräknat med 10 kWh/Nm3 metan (Svenskt Gastekniskt Center 2012).
Producerad el [kWh/år]	832333	1059768	868312	686940	861838	Från energimätare.
Elverkningsgrad [%]	30,8%	30,9%	31,9%	32,8%	31,6%	Beräknat från energiinnehåll och producerad el.
Producerad värme [kWh/år]	1623907	2059227	1633200	1258304	1643660	Antar värmeverkningsgrad 60 % (Svenskt Gastekniskt Center 2012).
Drifttid gasmotor [h/år]	4313	5491	4499	3559	4465	Beräknat med elproduktion och medeleffekt 193 kW (från data 2018).
Antal dagar motorn stått helt stilla	131	106	157	195	147	Från driftdata.
Värmebehov						
Värmebehov röt-kammare [kWh/år]	1616209	1570426	1508098	1375687	1517605	Från energimätare EM1.
Självförsörjandegrad värme [%]	100%	131%	108%	91%	108%	Beräknat.