



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC ES 26007
Examensarbete 30 hp
Februari 2026

Värmebalans av Käppalaverket och optimering av värmeflöden

Anna Tikhonova



UPPSALA
UNIVERSITET

Energy audit of the Käppala wastewater treatment plant and optimization of heat flows

Anna Tikhonova

Abstract

Käppala wastewater treatment plant cleans wastewater from 11 municipalities in Stockholm area. In conjunction with the purification process, sewage sludge is being eroded, upgraded to vehicle gas and sold to Sweden's local traffic. In addition to water treatment, the focus is on having as much energy-efficient utilization of resources as possible.

In this report, a technical survey of the plant has been carried out to identify the heat demand, losses and supply of heat. Calculation of heat demand has been made for the plant's largest heat-consuming processes, which include heating of sludge, heating of supply air in the mountain facility and heating of the office building.

A study of optimization opportunities has been made as a result of the energy audit. The results of the thermal mapping and optimization have been analysed, and several improvement proposals have been presented as well as a number of weaknesses in the operation control system have been identified.

The results and conclusions of this report are aimed at providing knowledge about the heating system in this wastewater treatment plant and gives suggestions on how to reduce the amount of heat loss through optimization and wise resource usage.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala/Visby

Handledare: Annabella Hultman Ämnesgranskare: Jacob Eriksson

Examinator: Carla Puglia

Populärvetenskaplig sammanfattning

Käppalaverket är ett kommunalförbund som renar avloppsvatten från 11 kommuner norr och öster om Stockholm. I nuläget renas ca 53,7 miljoner kubikmeter avloppsvatten från ca 683 000 anslutna personekvivalenter per år. Avloppsvattenrening är en process som består av mekanisk rening, förbehandling, biologisk och kemisk rening. Dessa processer är energikrävande och i samband med självaste reningen produceras en stor mängd avloppsslam som också måste omhändertas.

I samband med vattenreningen pågår ett ständigt arbete med att energieffektivisera reningsprocessen för att på så sätt optimera verksamheten och göra den mer miljövänlig och ekonomisk hållbar. För att åstadkomma detta krävs det kunskap om resursförbrukningen i verket och det är syftet med denna rapport. För att erhålla ett helhetsperspektiv har fokus främst legat på att ta fram en värmebalans för verket samt identifiera förluster och ta fram optimeringsförslag.

I dagsläget tillgodoses Käppalaverkets värmebehov genom tre olika delvis sammankopplade värmesystem: ett som värmer bergrummet där reningen av avloppsvattnet sker, ett som värmer slammet i rötammarna och ett som värmer de övriga byggnaderna ovanför markytan. I dessa system ingår ett flertal komponenter som förbränningspannor, värmepumpar, pumpar och värmeväxlare. Dessa uppvärmningssystem är sammankopplade via undercentraler där slutna cirkulationskretsar av rör levererar värme genom cirkulerande varmt vatten. De största värmebehövande processerna i verket är uppvärmning av slam i rötammarnanläggningen, uppvärmning av tilluften in i bergsanläggningen och uppvärmning av kontorsbyggnaden.

I samband med kartläggningen har förluster samt ytterligare värmekällor som ännu inte utnyttjas identifierats. Inom ramarna för examensarbetet har optimeringsförslag tagits fram för några utav dessa värmekällor. Resultatet av kartläggningen visar på ett värmebehov på 12,4 GWh, värmeförsel på 16,5 GWh och en värmeförlust på 25 % i verket för 2017. Värme i restgasen från gasreningsanläggningen, värme i renat avloppsvatten samt den facklade metangasen från slammets rötningsprocess är några värmekällor som idag inte tas tillvara på. Ytterligare optimeringspotential upptäcktes i verkstad/kontorsbyggnaden som helt saknar värmeåtervinning.

Optimeringsresultatet visar på att ca 600 MWh kan värmeåtervinnas i verket genom lättare installationer av värmebatterier och värmeväxlare. En stor värmepotential finns i det renade avloppsvattnet som kan tas tillvara på genom kostsamma investeringar i värmepumpssystem. Tekniken för att på ett miljövänligt sätt ta tillvara på värmeeffekten från värmekällor är känd sedan många år tillbaka. I frågan om all värme bör tas tillvara på är det ekonomiska incitament som styr huruvida investeringen är lönsam.

Den tekniska värmekartläggningen har genomförts genom studier av styrsystem samt beräkningar av värmeflöden. Det upptäcktes tidigt, under arbetets gång, att det saknades ett flertal mätare i de olika uppvärmningssystemen och på grund utav detta har några värden antagits. Detta gör också att värmebalansen endast kan ses som en grov uppskattning av verkets värmefördelning.

Förord

Det här examensarbetet är skrivet vid Institutionen för fysik och astronomi vid Uppsala Universitet som en avslutande del på civilingenjörsprogrammet i energisystem.

Arbetet omfattar 30 högskolepoäng och har pågått under perioden feb – jun 2018. Rapporten är skriven till personer med förkunskaper om avloppsrening och kännedom om funktioner hos värmepumpar och värmeväxlare.

Jag vill tacka alla som har hjälpt mig att genomföra det här examensarbetet. Ett stort tack till min handledare Annabella Hultman på Käppalaförbundet samt ett speciellt tack till processingenjören Michael Medoc, driftchefen Tommy Söderstam och underhållsingenjören Christian Mikkelsen som hjälpt mig och svarat på alla mina frågor samt bistått med diverse mätningar i verket.

Lidingö den 13 juni 2018

Anna Tikhonova

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	Bakgrund.....	4
1.1	Syfte.....	4
1.2	Metod.....	4
1.3	Avgränsningar.....	5
1.	Inledning.....	6
1.4	Teori & beräkningar.....	7
1.5	Energikartläggning.....	7
1.6	Värmekartläggning.....	7
1.7	Värmemarknaden.....	7
1.8	Effektberäkningar.....	7
1.9	Värmefaktorberäkningar.....	8
1.10	Värmebehovsberäkningar.....	8
2	Reningsprocessen.....	9
2.1	Vattenrening & resursutvinning.....	10
3	Värmekartläggning av Käppalaverket.....	11
3.1	Energiförbrukning.....	11
3.2	Uppvärmning av verket.....	11
3.3	Uppvärmning av byggnader över mark.....	11
3.4	Uppvärmningen av rötkammare.....	12
3.5	Uppvärmning av Bergsanläggningen.....	14
4	Gasuppträdning.....	16
5	Renat avloppsvatten som resurs.....	17
6	Framtida Käppalaverket.....	18
7	Förluster i verket.....	19
7.1	Andra förluster.....	19
8	Optimeringsutredning.....	20
8.1	Ventilationen i kontorsbyggnader.....	20
8.1.1	VVS systemets utformning.....	20
8.2	Vocsidizeranläggning.....	21
9	Resultat.....	23
9.1	Uppvärmning av byggnader över mark.....	23
9.2	Uppvärmning av rötkammare.....	23

9.3	Uppvärmning av berganläggningen	24
9.4	Schematisk översikt av Käppalaverkets värmebalans.....	24
9.5	Resurskartläggning	26
9.6	Outnyttjade resurser	27
10	Optimeringsresultat	28
10.1	Ventilationen i kontorsbyggnader.....	28
10.1.1	Beräkningar av värmeåtervinningen	28
10.2	Restgas från VOC	29
11	Diskussion	31
11.1	Uppvärmning av verket.....	31
11.2	Uppvärmning av byggnader över mark	31
11.3	Uppvärmningen av rötkammare.....	31
11.4	Uppvärmning av berganläggningen	32
11.5	Optimeringsförslag	33
11.5.1	Värmeåtervinning frånluft.....	33
11.5.2	Värmeåtervinning av restgas från vocsidizeranläggning	33
11.5.3	RAV som värmekälla	33
12	Slutsats	34
13	Referenser.....	35

1 BAKGRUND

Käppalaverket är ett kommunalförbund som renar avloppsvatten från 11 kommuner i Stockholms län. På förbundet arbetas med resursåtervinning i samband med reningsprocessen, t.ex. produktion av fordonsgas till SL bussar, användning av slam på åkermark och värmeåtervinning från renat avloppsvatten. Det pågår ett ständigt arbete med att optimera verksamheten och göra den mer miljövänlig och ekonomiskt hållbar. En viktig del i strävan att optimera Käppalaverket är att uppnå en så energieffektiv reningsprocess som möjligt och att därigenom nå minsta möjliga resursförbrukning. Detta innebär dels att ta tillvara på de resurser som når verket genom inkommande vatten i form av exempelvis organiskt material och värme, dels att utnyttja de produkter som bildas (slam, biogas) på bästa möjliga sätt.

1.1 SYFTE

Examensarbetet kommer att fokusera på kartläggning av Käppalaverkets värmebalans(energibalans) för att se om det finns potential för energioptimering. Inom examensarbetet ska värme- och kylbehov för verket kartläggas och analyseras och resultera i förslag på energieffektiviserande och ekonomiskt hållbara åtgärder.

För att uppnå syftet med denna studie, ska dessa frågeställningar besvaras:

- Hur ser värmebalansen ut för Käppalaverket?
- Var sker värmeförlusterna?
- Kan resursförlusterna komma verket tillgodo och i vilken omfattning?
- Finns det ekonomiska incitament för optimering av systemet?

Mål med projektet: ta fram en värmebalans och optimeringsförslag för Käppalaverket

Delmål:

- ta fram värmebalansen;
- identifiera problemområden (värmeförlusterna);
- ta fram optimeringsförslag;

1.2 METOD

En litteraturstudie har genomförts där tidigare rapporter och undersökningar har studerats för att skapa en grundläggande kunskap inom området. För att kunna kartlägga verket har det genomförts intervjuer med personalen på Käppalaverket och styrsystemet, driftinstruktioner och processritningar har studerats. Ett flödesschema har ställts upp och mätdata tagits fram. All mätdata på flöden, temperaturer, kompressorns elförbrukning, fläktarnas drifttider är hämtade från mätdata-verktyget aCurve som i sin tur loggar information från mätare som är utplacerade i verket. Mätdata har sammanställts och analyseras. Då mätdata saknats har värden antagits eller beräknats på bästa möjliga sätt. Optimeringsförslag har arbetats fram och energibesparingen beräknas. Slutligen har resultatet sammanställts och analyserats utifrån energibesparande och ekonomiskt hållbara synpunkter. Kommentarer och förslag till åtgärder kring värmebalansen har presenterats. Rapporten har utvecklats under arbetets gång.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

I denna rapport ligger fokus enbart på värmeflöden i Käppalareningsverket på Lidingö. Systemgränsen för den framtagna värmebalansen är endast verket och närliggande byggnader på området och tidsperioden är kalenderåret 2017. I övrigt ska hela verkets betydande värmekällor kartläggas och analyseras på en översiktlig nivå. Kartläggning av elförbrukningen har gjorts endast för poster som är relevanta för värmebalansen. Optimeringsområden har valts i samråd med beställaren.

1. INLEDNING

Käppalaverket beläget på Lidingö, öster om Stockholm, är ett kommunalt ägt avloppsreningsverk som renar avloppsvatten från 11 kommuner norr och öster om Stockholm. Käppalaförbundet bildades 1957 och elva år senare stod verket redo för att ta emot avloppsvatten från dåvarande nio medlemskommuner. I takt med Stockholmsregionens kraftiga expansion och växande befolkningsmängd har verket på senare år byggts ut och under 2017 renat 53,7 miljoner m³ avloppsvatten från 682 538 anslutna personekvivalenter. (Käppalaförbundet, 2018)

Idag är reningsverk klassat som miljöfarlig verksamhet enligt 9 kap. Miljöbalken och dess huvudsyfte är att rena vattnet i enlighet med de svenska miljömålen *Ingen övergödning*, *Levande sjöar och vattendrag* samt *Hav i balans*. I enlighet med miljömålen *Begränsad klimatpåverkan* och *Giffri miljö* ställs reningskrav mot krav på begränsad resursanvändning. Utöver kvalitet på renat avloppsvatten och reningskostnad är även resursförbrukning och utsläpp av växthusgaser viktiga parametrar att ta i beaktande. (Naturvårdsverket, Sveriges Miljömål, 2018)

Avloppsvattenrening är en energikrävande process som producerar förutom renat avloppsvatten restprodukter som måste omhändertas. Tidigare examensarbeten på Käppalaverket har fokuserat på elanvändningen och exergi-optimering med undantag från värmekartläggningen. Därför är, ur resursanvändarperspektiv, det intressant att kartlägga värmeflöden på verket för att erhålla ett helhetsperspektiv. Illustrationen nedan visar en bild av verket med alla tillhörande byggnader över jord och självaste reningsprocessen som är belägen i ett bergrum.

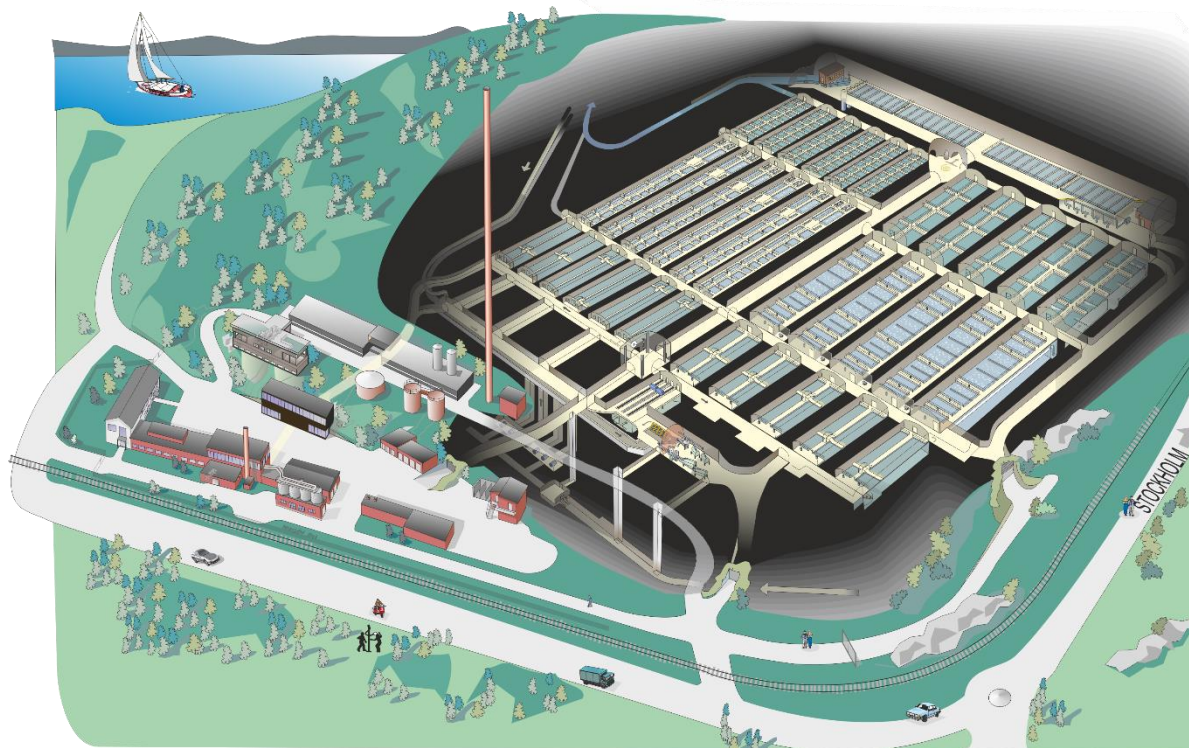


Illustration av Käppalaverket med tillhörande byggnader (av Mario Salutskij).

1.4 TEORI & BERÄKNINGAR

På uppdrag av Käppalaförbundet skall en värmekartläggning utföras för Käppalaverket. I denna ska värme- och resursflöden kartläggas. Vad en värmekartläggning är samt några viktiga ekvationer för energiberäkningar presenteras kortfattat i detta kapitel.

1.5 ENERGIKARTLÄGGNING

En energikartläggning visar på hur mycket energi som årligen tillförs och används för att driva företagets verksamheter med hänsyn taget till transporter och byggnader. Den ger svar på hur energin är fördelad samt kostnaderna för energin. Innehållet i en energikartläggning kan delvis bero på verksamheten men också lagen och om man söker ekonomiskt bidrag. Generellt sett innehåller kartläggningen tillförsel och användning av energin. I benämningen av energi ingår alla energiformer som brukas i verksamheten. Värme, fasta, flytande eller gasformiga bränslen, el-energi och andra energiformer ska kartläggas. (Energimyndigheten, 2018)

1.6 VÄRMEKARTLÄGGNING

En värmekartläggning kan ses som en del av en energikartläggning, och ger svar på hur mycket värme som årligen tillförs och används för att driva företagets verksamheter. I en värmebalans av ett slutet system, som ska hålla en given temperatur, skall den värmen som tillförs och dess gratisvärme täcka upp motsvarande mängd värmeförluster. Under beteckningen gratisvärme ingår internvärme från personer, värme från solinstrålningen och värmeutveckling från apparater. Transmissions-, ventilations- samt ofrivilliga ventilationsförluster representerar förlusterna i kartläggningen. Det är värme tillskottet från värmesystemet som ska hålla hela systemet i balans.

1.7 VÄRMEMARKNADEN

I samband med uppställningen av värmebalansen och möjligheterna utvinna värmeeffekt från värmekällor bör hänsyn tas till hur värmemarknaden ser ut och vilka incitament som styr den. En marknad som levererar värme till konsumenten är fjärrvärmemarknaden. Fjärrvärme är inte prisreglerat i Sverige då marknaden avreglerades 1996. I Stockholmsområdet är fjärrvärmemarknaden ett naturligt monopol, ägt av Stockholms Exergi och Stockholm Stad. Detta är naturligt för så kallade nätverksbranscher där produktion eller distribution av varan sker via ett fast nätverk. Företagen som kontrollerar nätverket har en stark marknadsandel som kan utnyttjas till att sätta höga priser för att uppnå största vinst samt hindra inträde av konkurrenter. Produktionsprocessen är indelad i två steg: produktion av hetvatten och distribution av hetvattnet i ett nätverk av rör. (Muren, 2011) Det är det första steget som är intressant för Käppalaverket ur värmeproduktionssynpunkt.

1.8 EFFEKTBERÄKNINGAR

Effektberäkningar har utförts där effektmätare saknats med hjälp av följande ekvation:

$$P = IU \cos \phi \sqrt{3} \quad (1)$$

den aktiva effekten P (W), U är spänningen över en komponent (V) och I är strömmen genom komponenten (A), $\cos \phi$ är olika för de olika motorerna, $\sqrt{3}$ när det rör sig om trefas. (Alvarez, 2006)

1.9 VÄRMEFAKTORBERÄKNINGAR

Ett sätt att mäta en värmepumps godhetsgrad är att beräkna dess värmefaktor. Värmefaktor är förhållandet mellan den producerade värmemängden Q_{Lev} , och det förbrukade arbetet, W_{EL} . (Alvarez, 2006). En värmepumps värmefaktor normalt ligger mellan COP 3–5.

$$COP = \frac{Q_{Lev}}{W_{EL}} \quad (2)$$

1.10 VÄRMEBEHOVSBERÄKNINGAR

Ett ämnes upptagna eller avgivna energi i samband med värmeöverföring kan beräknas via följande ekvation:

$$E_{in} = Q_{in} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3)$$

där E_{in} är den överförda värmemängden i Joule [J], Q_{in} är det inkommande flödet i m^3 , ρ står för ämnets specifika densitet i kg/m^3 , c_p för ämnets specifika värmekapacitet ($J/kg, K$) och ΔT är temperaturskillnaden, antal grader ett ämne ska värmas till den önskade temperaturen. (Alvarez, 2006)

2 RENINGSPROCESSEN

För att få tillstånd att släppa ut avloppsvatten i Saltsjön krävs att föroreningar som organiskt material (BOD_7), fosfor och kväve men även diverse skräp och sand rensas bort. Reningskravet för utgående vatten mäts i halter av utsläppt totalkväve, totalfosfor och BOD_7 . Gränsvärdet för utsläpp av kväve är 10mg/l, utsläpp av fosfor 0,3mg/l och BOD_7 är 8mg/l per liter renat avloppsvatten. (Naturvårdsverket, 2013) Skulle värden överskridas finns det en risk att Käppalaförbundet mister sitt tillstånd.

Käppalaverket processar avloppsvatten som kommer in till verket genom en ca 60 km långt tunnelsystem. Verket är beläget i en berggrund som består av ådrig gnejs. I tunnelsystemet finns tre pumpstationer belägna vid Antuna, Edsberg och reningsverket. Tunnel slutar i ett svallschakt under marken och åtta centrifugalpumpar lyfter avloppsvattnet 18m till reningsverket. (Käppalaförbundet, 2000)

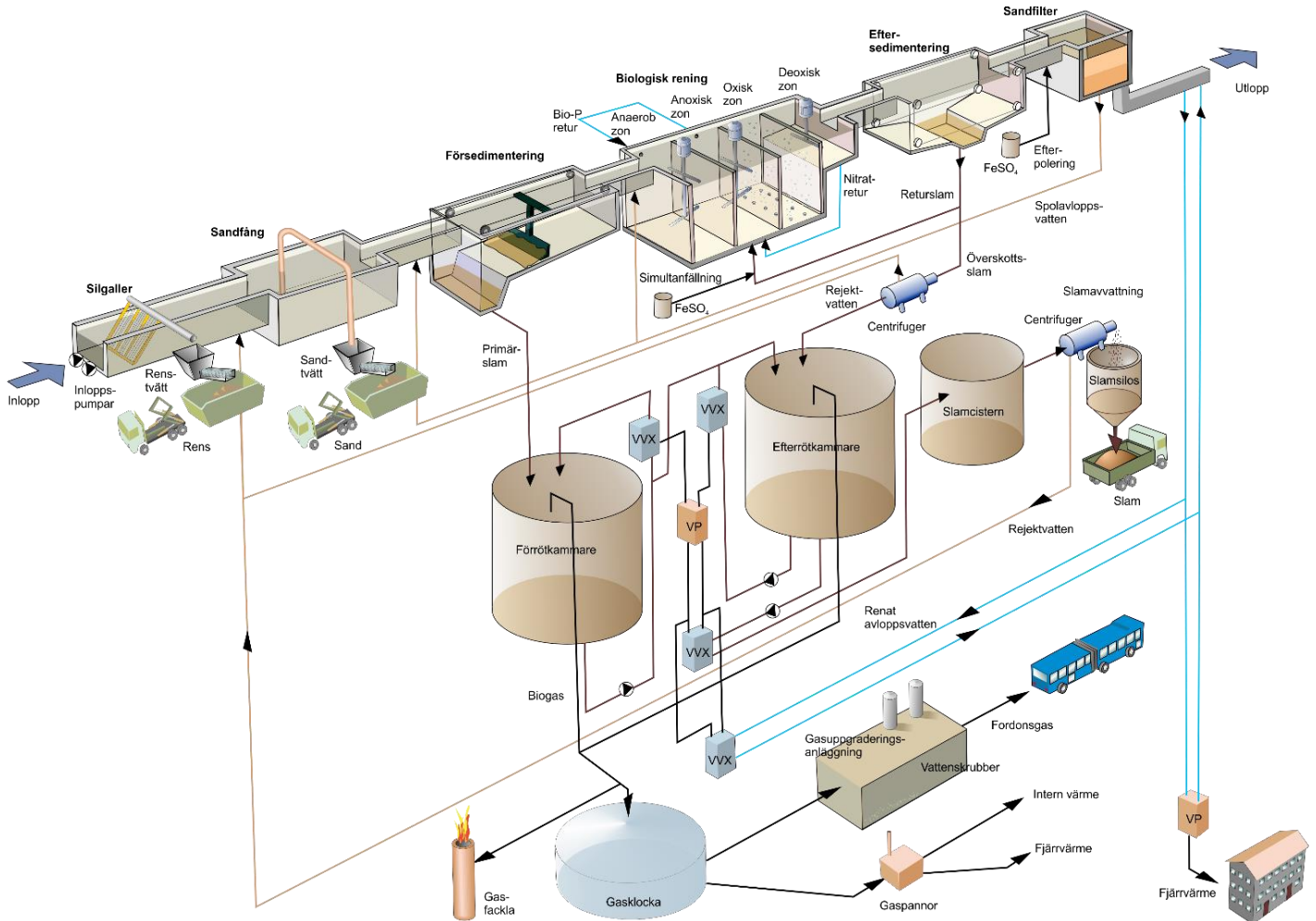
Första steget i reningsprocessen är grovrening som består av silgaller, förluftning och luftade sandfång. Genom de 10 silgallren avskiljs större skräp. Silgaller är dimensionerade för ett flöde av $10m^3/s$. Det avskilda rensat avvattnas och lagras i ventilerande containers för att därefter fraktas till avfallsupplag. Förluftningen luftas av en blåsmaskin för avdrivning av svavelväte. I de fyra luftade sandfången sjunker sandpartiklar till botten med hjälp av luftinblåsning av två blåsmaskiner. Den avskilda sanden transporteras, lik rensat, till avfallsupplag. Efter den mekaniska reningen följer den biologiska reningen som sker enligt aktivslammetoden i elva linjer, fördelade mellan den gamla delen och den nya delen av verket som belastas med ca 36 % respektive ca 64 % av inkommande flöde, med bio- och sedimenteringsbassänger. I försedimenteringen avskiljs störst andel lätt sedimenterande material ur avloppsvattnet. (Käppalaförbundet, 2000)

I aktivslam-steget sker reduktion av organiskt material, $BOD_7(>0,95\%)$, kväve (50%) och fosfor. Det slam som avskiljs i försedimenteringen skrapas till slamfickor med traversskrapor. Biobassängen är indelade i anaeroba-, anoxiska, anox-/oxiska och oxiska zoner. I de anoxiska zonerna utnyttjas nitrat som syrekälla, den denitrifieras till kvävgas vid nedbrytning av det organiska materialet i inkommande avloppsvatten. Under anaeroba förhållanden favoriseras bakterier som kan uppta lågmolekylärt organiskt material och den energin som bakterierna behöver tas från fosfor, som frigörs. I de syresatta zonerna bryter bakterierna ned det upptagna organiska materialet och växer under upptagningen. Från biobassängerna leds slammet till sedimenteringsbassängerna där huvuddelen av det aktiva slammet avskiljs och pumpas tillbaka till biobassängerna. Vid reningsprocessen ökar mängden slam i biobassängerna därför tas en mängd slam motsvarande denna tillväxt ut från reningsprocessen som överskottslam och mängden slam hålls konstant i biobassängerna. Överskottslammet pumpas till reningsverkets slambehandling. Från biobassängerna leds vattnet vidare till eftersedimenteringsbassänger där avskiljs huvuddelen av det aktiva slammet. Den mängd slam som motsvarar slamtillväxten i biobassängerna tas ut som överskottslam och resten återförs till biobassängerna som returslam. Överskottslammet pumpas till slambehandlingen där det förtjockas och rötas med primärslam. (Käppalaförbundet, 2000)

Filtreringen av vattnet genom sandfilter är sista steget för biologiskt behandlat vatten. Vattnet filtreras genom filterbädden, som består av sand och krossad leca, samt en sista polering för fosforreningen. Filtrat vatten leds till utlopp-pumpstation där fem propellerpumpar pumpar

ut vattnet via utloppstunnel och utloppsledning till Saltsjön. Det reade avloppsvattnet mynnar på 45 meters djup ca 130 meter från land. (Käppalaförbundet, 2000)

Figur 1 Processillustration Käppalaverket



2.1 VATTENRENING & RESURSENTVINNING

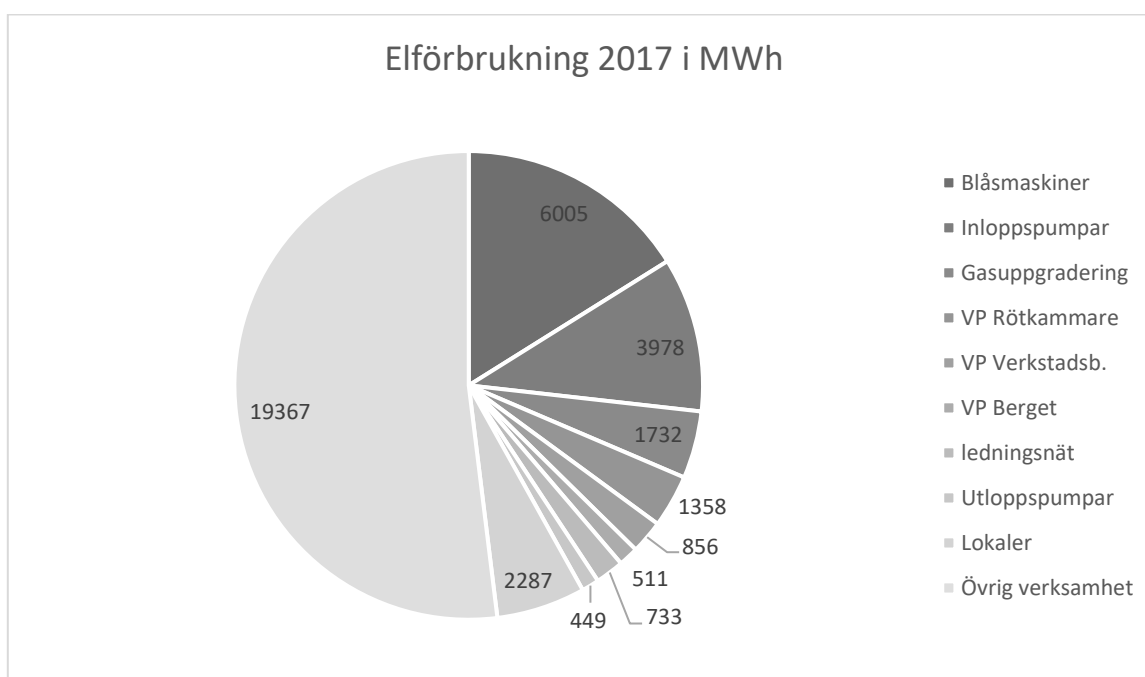
Ett reningsverks huvuduppgift är att rena avloppsvatten från föroreningar. Reningen av vattnet med organiskt innehåll gör att det bildas organiska föroreningar, rika på näringsämnen, som utvinns från reningsprocessen och kallas för slam. Slammet förtjockas och förs till röt-kammare där det rötas och slutligen produceras rötgas. Huvuddelen av rötgasen fortsätter vidare till gasklockan där den genomgår en uppgradering och uppgraderas till fordonsgas. Resterande rötgasen fortsätter vidare till pannorna och blir till värme. Det rötade slammet, förtjockas och sedan avvattnas i centrifuger och transporteras till jordbruk. (Käppalaförbundet, 2000) Under 2017 såldes ca 4,07 miljoner Nm³ fordonsgas till Storstockholms Lokaltrafik, SL, och ca 29 637 ton slam, med en genomsnittlig halt TS på 26 %, transporterades till jordbruk.

3 VÄRMEKARTLÄGGNING AV KÄPPALAVERKET

En kartläggning av uppvärmningen och värmeflöden har gjorts på uppdrag av Käppalaförbundet för kalenderåret 2017. En värmekartläggning går hand i hand med energiförbrukning, därför har energiförbrukningen i verket kartlagts för processer som är relevanta ur värmesynpunkt.

3.1 ENERGIFÖRBRUKNING

Under 2017 köpte Käppalaverket totalt 37276 MWh el där ledningsnätet stod för 4711 MWh el och resterande 32565 MWh gick åt försörjningen av verkets verksamheter. I Figur 2 nedan visar elförbrukningen i verket. Där elmätare saknats har effekten beräknats med hjälp av ekvation (1) baserat på amperemätare loggat i aCurve.



Figur 2. Årsförbrukning av elektricitet på verket fördelat på poster viktiga ur värmesynpunkt

3.2 UPPVÄRMNING AV VERKET

I dagsläget tillgodoses Käppalaverkets värmebehov genom tre olika delvis sammankopplade värmesystem: ett som värmer bergrummet där reningen av avloppsvattnet sker, ett som värmer slammet i röt-kammarna och ett som värmer de övriga byggnaderna ovanför markytan. Mer detaljer om hur systemen är sammankopplade finns beskrivet längre fram i rapporten.

3.3 UPPVÄRMNING AV BYGGNADER ÖVER MARK

Uppvärmningen av byggnader över markytan sker med hjälp av två värmepannor, som finns i verkstadsbyggnaden, med en effekt på 1500kW vardera som i normala fall matas med egenproducerat rötgas med en metanhalt på 65 %. Verkningsgraden för pannorna teoretisk ligger runt 80–85 % men för 2017 uppgick till 75 % vilket antas vara ett rimligt värde. När gasproduktionen är låg och värmebehovet är stort köps olja in för att eldas i pannorna istället. Dessa pannor stöttas med två värmepumpar, med en effekt på 800kW och 68kW. Dessa tar vara på energin från renat avloppsvatten. Mellan pannorna och värmepumparna finns också två

stycken, underdimensionerade, ackumulatortankar som inte fyller någon funktion i kretsen i dagsläget.

Uppvärmningskretsen tillgodoser värmebehovet i huvudcirkulationskrets som i sin tur har ett antal shuntgrupper anslutna. Dessa shuntgrupper är: gasklocka, gasuppgraderingsbyggnaden, slambehandlingsbyggnaden, slamavvattningsbyggnaden, rötkammaren, kemikaliebyggnaden, luktreningsanläggningen, verkstadsbyggnaden och kontorsbyggnaden. Värmen som kommer in till shuntgrupperna via undercentraler värmeväxlas mot slutna cirkulationskretsar som används främst till uppvärmning av värmebatterier som värmer tilluften i ventilationssystemet. Ingen värmeåtervinning förekommer i verkstadsbyggnaden, kontorsbyggnaden, personalbyggnaden och (VB, KO, PB, KB) utan frånluften med en medelårstemperatur på 22 °C avges via frånluftsfläktar till omgivningen.

Under 2017 köptes ingen olja utan de värme som producerades kom från 0,205 miljoner Nm³ egenproducerad rötgas från gasklockan som har ett energivärde på 1,33GWh. Värmepumparna levererade värmeeffekt på 2466 MWh och 175 MWh och har således årsmedelvärden COP på 2,88 och 2,41 beräknad enligt ekvation (2). Värmebehovet för systemet beräknats till 2473 MWh för 2017.

Käppalaförbundet har inte alltid varit en fordonsgasproducent. Fram till 2010 brändes rötgasen i pannor. Av den värmen som producerats har en del gått till egen uppvärmning och den största delen levererats som fjärrvärme till Fortum. Under 2017 har fjärrvärmeleveransen uppgått till 29 MWh och den förväntas att minska till noll under nästkommande år då produktion och försäljning av fordonsgas är i fokus.

3.4 UPPVÄRMNINGEN AV RÖTKAMMARE

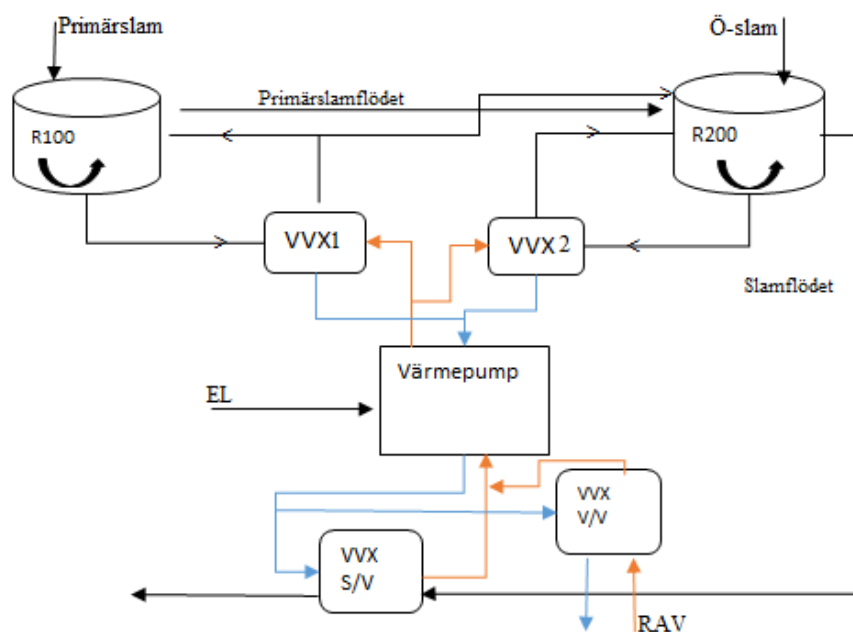
All slam som bildas under reningsprocessen förs till rötkammare där det rötas. Rötning av slammet görs i syfte att minska slamvolymen och stabilisera slammet genom nedbrytning av innehållet med hjälp av bakterier i en anaerobmiljö. För att nedbrytningen ska ske så effektivt som möjligt kräver den mesofila röttningsprocessen en temperatur på 35-37 °C. Detta innebär att temperaturen på det inkommande slammet måste vara densamma som i rötkammarna vilket gör att uppvärmning av avloppsslammet är ofrånkomligt. (VA-Forsk, 2005) Detta innebär också att rötkammarnas temperatur måste hållas på samma nivå för att gynna rötgasproduktionen. Idag är slammet uppehållstid i rötkammare ca 16 dagar och den sammanlagda rötkammarvolymen på 18 000 m³. Rötkammarna är delvis insprängda i bergrum som fungerar som värmeisolerande och antas behålla värmen som på grund av konduktion avges från rötkammarna.

Primärslammet, från försedimenteringen, går igenom en slamförtjockare innan det pumpas med hjälp av fyra primärslampumpar direkt till förrötkammaren, R100, där 70 % av gasproduktionen sker. Överskottsslammet, från eftersedimenteingsbassänger, går igenom slamförtjockare och centrifuger innan det pumpas till den efterrötkammaren, R200, där resterande 30 % av gasproduktionen sker. Efter R100 förs primärslammet vidare till R200, där primärslammet blandas med överskottsslammet, för att öka gasproduktionen innan slammet sedan kyls och förs till avvattning och vidaretransport till jordbruk.

Temperaturen på det inkommande slammet, primärslammet, följer avloppsvattnets temperatur och har en medelårstemperatur på 13,9 °C. Överskottsslammet, årsmedeltemperatur är 14,4 °C, vilket är något varmare än primärslammet vilket tros bero på grund av att den biologiska

aktiviteten i eftersedimenteringsbassängerna. Under 2017 uppgick primärslamflödet till 172 839 m³ och överskottsslamflödet till 102102 m³. Det teoretiska värmebehovet för slamuppvärmningen beräknas enligt ekvation 3 till 4,63 GWh för primärslammet och 2,68 GWh för överskottsslammet. Primärslammet värms 23,1 °C och Överskottsslammet 22,6 °C för att nå en temperatur på 37°C som krävs för rötningsprocessen. Råslam består till ca 95 % av vatten och slammets densitet kan som närmevärde sättas till 998 kg/m³ och den specifika värmekapaciteten 4180 J/kg °C (Kjellèm & Andersson, 2002). Med 682 538 anslutna personekvivalenter blir det specifika värmebehovet 10,69 kWh/person och år.

Uppvärmning av avloppsslammet och röt-kammarna sker med hjälp av en värmepump med stöd från två olika värmeväxlersystem. Det ena systemet tar värme från renat avloppsvatten, RAV, och det andra från det varma slamflödet som är på väg till centrifugering. Figur 3 nedan visar hur alla kretsar är sammankopplade. Värmepumpen avger värme till slammet från både R100 och R200 via värmeväxlare, det uppvärmda slammet blandas med det inkommande, kalla, slammet i röt-kammarna. En del av det uppvärmda slammet från R100 passerar vidare till R200 där slammet återigen blandas men med det inkommande överskottsslammet istället. Detta kan innebära att en mindre värmemängd än den teoretiskt beräknade då flöden blandas, omrörs och är i röt-kammare upp till 16 dagar. Det totala slamflödet från R100 som passerat värmeväxlare, VVX 1 är ~93 l/s vilket på ett år blir 5 820 000 m³ och ΔT från värmesidan är 2,3 °C, med hänsyn till verkningsgrad (~ 50 %) höjs slammets temperatur med ca 1,15 °C vilket ger en värmeförsörjning till R100 på 7756 MWh. Slamflödet från R200 som passerar värmeväxlare, VVX2 är ca 95 l/s och beräknas på ett år motsvara 6 000 000 m³ och temperaturhöjningen på slammet är ca 0,5°C. Verkningsgraden antas vara densamma som VVX1 och värmeförsörjning till R200 beräknas till 3476 MWh.



Figur 3. Flödesschema för uppvärmningen av röt-kammare. Svarta linjer visar slamflöden, blå och röda, kalla respektive varma vattenflöden. VVX står för värmeväxlare.

Värmepumpens elförbrukning beräknades till 1358 MWh under 2017 och i värme levererades det 3259 MWh. Den levererade värmen beräknades utifrån det cirkulerande vätskeflödet i

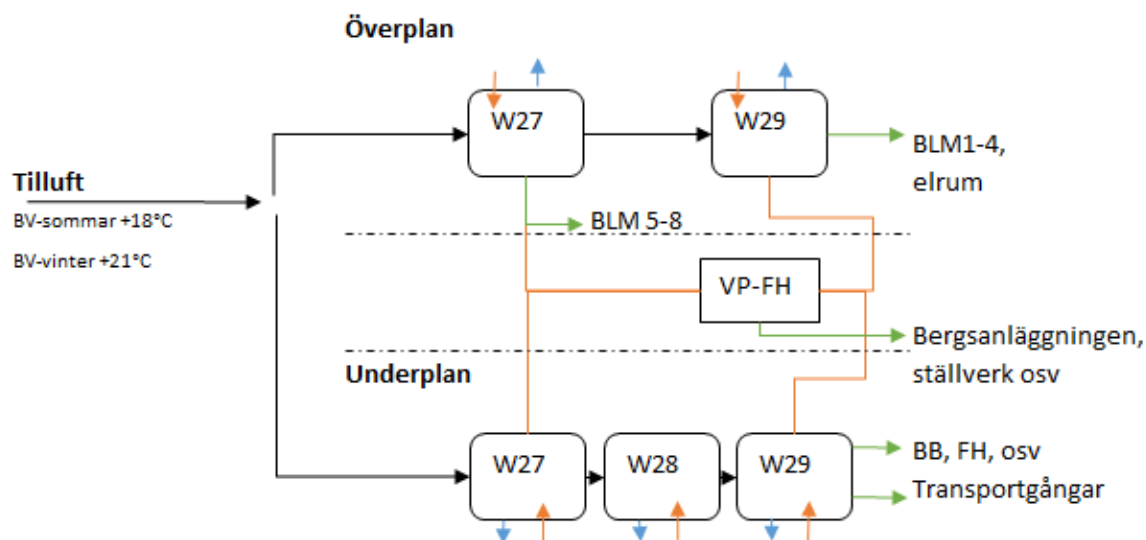
värmepumpskretsen på ca 40 l/s och dess temperaturskillnader. Värmepumpens årsmedelfaktor, SCOP, beräknas enligt ekvation (2) till 2,4.

Under 2017 havererade värmepumpen och var ur funktion ca 30 dagar under januari och februari månaderna. Värmebehovet under tiden tillgodoses med värmen från panncirkulationskretsen. Då det inte finns mätare som avläser den tillförda värmen har beräkningar gjorts via ekvation (3) på energin i det varma vattnet. Enligt beräkningar har pannvärmepumpskretsen avgett 419 MWh värme till slammuppvärmningen.

3.5 UPPVÄRMNING AV BERGSANLÄGGNINGEN

Reningsprocessen av avloppsvattnet är beläget i ett bergrum där uppvärmningen sker främst genom en värmepump men också genom den uppvärmda tilluften. För att upprätthålla en god arbetsmiljö för reningsprocessen krävs en rumstemperatur på +18 °C i bassängsalar. Tilluftstemperaturen sjunker ca 3–4 grader °C vid passage genom anläggningen, därför krävs en tilluftstemperatur på ca +21 °C. Börvärdet för tilluften är satt utefter säsongsvariationen, +21°C vintertid och +18°C sommartid. Det totala luftflödet in i berganläggningen uppgick till ca 294 952 m³/h för 2017, vilket motsvarar ett luftutbyte av berget i timmen. Detta flöde är framtaget med hänsyn till energisparläget som gör att fläktarna går på 39–50% mellan klockan 21:30-06:00 samt helgdagar. Vardagar mellan klockan 06:00-21:30 går fläktarna på 100 %. Medelårstemperaturen på den inkommande luften är ca 8 °C. Det teoretiska värmebehovet för tilluft beräknas till 11,101 GWh enligt ekvation (3). När tilluften har passerat genom anläggningen och blivit frånluft passerar den vidare till 150m långa skorstenen som man kan tydligt se i den första illustrerade bilden.

Tilluften som kommer in i berganläggningen via tunnel T300 delas i två flöden. Figur 4 nedan visar luftflöden och hur dessa fördelas. Ett luftflöde på 150 400 m³/h kommer in via över planet och tillgodoser blåsmaskiner, pumpsalar, sandfångar, sillhallar och elrum med luft. En del av tilluften förs ouppvämt till blåsmaskinerna 5–8 i den nya delen av verket. Tilluften kommer in i ett fläktrum där den förvärms genom två steg. Först förvärms luften via en värmeväxlare med värme från RAV, (W27) där värme från renat avloppsvatten växlas mot en sluten cirkulationskrets. Därefter värms den redan förvärmade tilluften ännu en gång genom värmeåtervinning från blåsmaskinerna innan den passerar vidare in i berganläggningen. Temperaturen ut från blåsmaskiner i drift är ca 110 °C, dessa kyls ner och den erhållna värmen från kylningen tas tillvara på genom att växlas mot en sluten cirkulationskrets (W29).



Figur 4. Flödesschema för uppvärmning av berganläggningen. Svarta linjer visar tilluften, de gröna visar luften in i anläggningen.

Ett tilluftsflöde på 260 000 m³/h som kommer in via under planet ventilerar stora delar av verket som filterhall, biobassänger och rörgaller samt fungerar som allmän ventilation. Förvärmningen här sker i tre steg. Det första och det sista steget är detsamma som för överplans förvärmning av tilluften. Det som skiljer är värmemängden som fås från värmeåtervinningen av frånluften, W28. Den varma frånluften, som kommer från bioblocket, avger värme till en sluten cirkulationskrets, innan den passerar vidare till skorstenen.

I filterhallen finns även en värmepump som är sammankopplad med kretsarna W27 och W29. Värmepumpen värmer upp berganläggningen och kyler bland annat ställverk. Då det saknas flödesmätare på den varma sidan antas en COP faktor 4, vilket är den vanligaste bland värmepumparna. (Alvarez, 2006) Elförbrukningen under 2017 beräknas till 511 MWh via ekvation (1) baserat på kompressorns elförbrukning under året.

En värmepump kan både fungera som en värme- och kylmaskin och användas utefter driftbehov. Det är utetemperaturen som styr värmebehovet. Således fungerar värmepumpen som en kylmaskin under sommarmånaderna och steg 1 i förvärmningskretsen kyler tilluften. Det vattenburna uppvärmningssystemet tillförs en 35 % glykollösning för att hindra att cirkulationsvätskan fryser under kalla vintertemperaturer.

4 GASUPPGRADERING

Det slam som bildas vid reningen av avloppsvattnet stabiliseras genom rötning i en biogasanläggning. Vid rötning erhålls biogas som innehåller ca 65 volymprocent metan och ca 35 volymprocent koldioxid samt en mindre mängd svavel. Den rötgas som bildas vid den anaeroba processen leds till gasklockan och vidare in till gasuppgradering. I gasuppgraderingen renas rötgas från koldioxid och uppgraderas till fordonsgas. När gasen lämnar absorptionskolonn (skrubber) där koldioxid, svavelväte samt en mindre mängd metan löses i vattnet med hjälp av gasfördelningsutrustning innehåller den, omräknat till torr gas, 1-3vol% koldioxid, 0,5-1vol% luft och resterande delen metangas. Den fuktiga gasen passerar vidare till coalesceringsfilter där den avskiljs från kondensvatten och eventuella fasta partiklar. Den torkade gasen leds därefter till utgående gasledning men en temperatur på ca 20 °C. (AB, Malmberg Water, 2010)

Under 2017 producerade Käppalaverket ca 4,07 miljoner Nm³ fordonsgas med ett energiinnehåll på 39,4 GWh. Vid stor gasproduktion, lågt värmebehov eller då gaspannorna är avstängda bränns överskottet av den producerade rötgasen i en gasfackla. Hur mycket gas facklas beror på produktionen av rötgas samt på möjligheten att lagra uppgraderad gas hos mottagaren. Då mottagarens tank är full och det inte finns tillräckligt stort värmebehov i den egna produktionen facklas gasen.

Tabell 1. Gasproduktion på Käppalaverket

Resurs	
Producerad fordonsgas	4,07 miljoner Nm ³ (39GWh)
Facklad rötgas	-
Rötgas till intern värmeproduktion	0,205 milj Nm ³ , 1,33 GWh

5 RENAT AVLOPPSVATTEN SOM RESURS

Avfallsvatten som kommer in till Käppalaverkets reningsprocess renas. Produkten som fås är renat avloppsvatten (RAV). Det renade avloppsvattnet innebär en ständig värmertilgång och detta i stora mängder. Ytterligare en faktor som talar för värmeutvinning ur RAV är att reningsverkets placering är säker på lång sikt. Medelårstemperaturen på RAV från reningen är 14°C. Värmepumpsteknik gör det möjligt att utnyttja värmeinnehållet i RAV, vilket är flerfaldigt mycket större än verkets totala värmebehov. Avgörande för en sådan investering är om det finns en lämplig mottagare för den producerade värmen. Leverans till fjärrvärmenät eller bebyggelse i närheten av reningsverket anses som lämpliga. (Kjellëm & Andersson, 2002)

Tillgången på värme i RAV bestäms av flödesmängden och temperaturen och beräknas med ekvation (3). Värmebehovet är som störst under vintermånaderna därför används flödes- och temperaturdata från januari och februari. Genomsnittsflöde för det inkommande avloppsvattnet under dessa månader är 1,705 m³/s och medeltemperaturen på 12°C. I tabellen nedan finns ett exempel på hur mycket värme som kan tas tillvara på från en grad av renat avloppsvattnet. Detta motsvarar inte den faktiska tillgången på energi som finns på Käppalaverket.

Tabell 2. Beräkningar av potentiella värmertilgången från RAV

Flöde av avloppsvatten (medelvärde jan/feb) Totalt för 2017	1,705 m ³ /s ~ 55 miljoner m ³
Avkylning av avloppsvatten t ex 12 till 11 °C	1 K (°C)
Värmeeffekt från 1,705 m ³ /s Total värmeeffekt RAV	1,985 kW 64 GWh
Tillgång på värme från värmepumpen Total tillgång	2,6 kW (COP 4, elförbrukning 0,66kW) 128 GWh (elförbrukning 32 GWh)

I nuläget använder Käppalaverket ungefär 4 miljoner m³ RAV för värmeproduktion och ca 17 300 m³ går till spolposter av det som går att utläsa från driftsystemet. I själva verket finns det inga exakta flödesmätare på det renade avloppsvattnet och hur mycket det är som används i verkets olika processer.

På Käppalaverket används RAV till värmepumpar i VB00, samt i VVX kretsar, förvärmning av tilluften i berganläggningen, bottenpolning av bassänger, kemikalieberedning, kylvatten och tätningsvatten till pumpar samt en del till Fortums egen värmepumpsanläggning. Då det inte förs många mätningar är det svårt att uppskatta hur stora flöden av RAV som faktiskt används. Detta beror främst på att det är väldigt stora flöden av vatten som renas och att det aldrig är brist på renat avloppsvatten.

6 FRAMTIDA KÄPPALAVERKET

I skrivande stund har Käppalaverket två rötkammare, R100 och R200, dock har byggnationen av en tredje rötkammare, R300, påbörjats och beräknas avslutas i slutet av 2018. De två nuvarande rötkammare har funnits sedan år 1969 och närmar sig deras maxkapacitet. Ytterligare en rötkammare kommer att säkerställa rötningsprocessen och på längre sikt bidra till en ökad mängd producerad rötgas då slammet uppehållstid kommer att kunna förlängas och mer gas att rötas ut. År 2025 kommer reningsprocessen i verket att ändras vilket kommer att bero på nya reningskrav. Den nya reningsprocessen kommer att innebära att mer primärslam kommer att tas ut vilket också kommer att bidra till en ökad produktion av fordonsgas. Med en ökad produktion av primärslam kommer värmebehovet för slamuppvärmningen att öka i verket.

7 FÖRLUSTER I VERKET

Till följd av värmekartläggningen har följande värmeförluster observerats i verket och tillhörande byggnaderna:

- Värmeåtervinningen av ventilationen saknas helt i verkstadsbyggnaden samt i gamla och nya kontorsbyggnaden
- Rötgas facklas
- Restgas från vocsidizeranläggning innehåller värmeenergi
- Det finns ytterligare potential i renat avloppsvatten
- Rejektvatten efter slambehandlingen innehåller värmeenergi

7.1 ANDRA FÖRLUSTER

Förutom de ovan nämna värmeresurser som bör tillvaratas finns det ett flertal andra källor till energiförluster och dessa bör således nämnas. Rörledningar via olika medier som vatten, slam och gas transporteras runt i olika delar av anläggningen bidrar till några av dessa. I trycksatta ledningssystem beror transportkapaciteten av tryckfallet längst ledningen. Dessa ger upphov till bland annat energiförluster associerade med friktion/skjuvspänningar vid rörväggar. Andra förluster som uppstår sker på grund av oregelbunden strömning vid rörkrökar, ventiler, dimensionsövergångar av rörledningar samt valet av material på rörledningen. En annan typ av förluster sker exempelvis vid pumpning i form av mekaniska förluster på grund av friktion i lager och packningar samt driften. (Alvarez, 2006)

Vid värmeöverföring sker värmetransport så länge som temperaturskillnaden består, endast i riktningen från den höga till den låga temperaturen. Värmeöverföring sker genom konduktion, konvektion och strålning och värmeförluster uppstår. (Alvarez, 2006)

8 OPTIMERINGSUTREDNING

Examensarbetet syftar främst till att ta reda på värmebalansen för Käppalaverket och utifrån den ta fram optimeringsförslag för förlusterna i verket som lättast kan åtgärdas. I samråd med Käppalaförbundet har de delarna valts till värmeåtervinning av ventilationen och restgasen från vocsidizeranläggning som helt saknas idag. Detta för att inga tidigare studier har tagit upp just dessa moment.

8.1 VENTILATIONEN I KONTORSBYGGNADER

Det finns i åtanke att bygga om kontorsbyggnader på Käppalaverket i samband med andra viktiga investeringar får ombyggnationen vänta. I samband med detta och det faktum att kontorsbyggnader (KO), personalbyggnader (PB), kontorsbyggnader (KB) och verkstadsbyggnaden (VB) saknar värmeåtervinning helt kan ett värmeåtervinningssystem ur energibesparings synpunkt vara en enkel och bra lösning.

8.1.1 VVS systemets utformning

Systemet som finns i byggnader som är av intresse för värmeåtervinning kallas FT-system. Den fläktstyrda tilluften kommer in genom spjäll och passerar vidare genom ett värme- och kylbatteri som reglerar temperaturen på tilluften. Därefter ventileras det tänkta utrymmet och frånluften passerar ut via en frånluftsfläkt. Värme- och kylbatteriers funktion är att värma respektive kyla luften. Batterier i sig är värmeväxlare som överför antingen värme eller kyla från ett system till ett annat. I värmebatteriets fall överförs värme från pannorna/värmepumpskretsen till ventilationens tilluftssystem och kylan till kylbatteriet kommer från en kylmaskin placerad på källarplan. Det förs inga mätningar över kylmaskinens elförbrukning eller drifttider.

Personalbyggnaden (PB00) och kontorsbyggnaden (KO00) är samma byggnad dock har VVS-systemet olika namn för tilluftsfläktarna är fördelad på de olika platserna, för enkelhetens skull döps byggnaden till GK som står för gamla kontoret. Nya kontorsbyggnaden (KB00) är en byggnad som sitter i anslutning till kontorsbyggnaden och har ett separat VVS-system och benäms NK. Verkstadsbyggnaden (VB00) är också ansluten till GK-byggnaden och har ett separat till- och frånluftssystem som förser lokaler med luft.

Personal- och kontorsbyggnaden har sammanlagt 4 tilluftsfläktar vilka är placerade på olika plan i byggnaden och visas i tabell 4. Kontorsbyggnaden har sju stycket frånluftsfläktar, placerade på takplan i GK. Endast tre av de fläktarna kan tas med i optimeringen då inte all luft kan värmeåtervinnas. Detta på grund av att luften måste omhändertas i och med att den kommer från miljöer som till exempel dragskåp i laboratorium och annan luftförorenande verksamhet.

Den nya kontorsbyggnaden har en till- och frånluftsfläkt som sitter på takplan, NK. Verkstadsbyggnaden har en tilluftsfläkt med ett års luftflöden på 48 700 000 m³, frånluften är fördelad på sju frånluftsfläktar som är utspridda på taket av verkstadsbyggnaden.

Tabell 3. Luftflöden och temperatur på till- och frånluften under 2017

Fläkt	Typ	Medeltemperatur °C	Flöde m ³ /s	Totalt luftflöde i m ³	Placering
KO00-K901	tilluft	Utomhustemp ~ 8	2,5	7 275 021	Källarplan GK
KO00-K903	tilluft	Utomhustemp ~ 8	0,8	11 965 036	Källarplan GK
KO00-K905	tilluft	Utomhustemp ~ 8	1,77	27 815 642	Källarplan GK
PB00-K901	tilluft	Utomhustemp ~ 8	2,3	40 884 000	Takplan GK
KB00-K901	tilluft	Utomhustemp ~ 8	1,1	48 948 646	Takplan NK
SUMMA	tilluft			136 888 345	
KO00-K902	frånluft	~22,3	2	28 292 449	Takplan GK
KO00-K904	frånluft	~21	0,1	3 132 620	Takplan GK
KO00-K906	frånluft	~22,3	0,95	15 628 177	Takplan GK
PB00-K902	frånluft	~22,6	2,3	9 226 111	Takplan GK
KB00-K902	frånluft	~22,2	1,2	41 030 723	Takplan NK
SUMMA	frånluft			97 310 080	
Fläktar utan mätare, dragskåp i LAB, förluster etc	frånluft	-		39 578 265	

Från- och tilluftsfläktars placering i kontorsbyggnaden visas i tabell 4. Då vissa av fläktar befinner sig på olika platser kan det utifrån plats-, kostnads- och verkningsgrad synpunkt vara icke optimalt att ha frånluftsåtervinning på alla frånluftsfläktar. I samband med optimeringen har möjligheterna för värmeåtervinning undersökts både på källarplan GK, takplan GK och takplan NK samt för verkstadsbyggnaden.

8.2 VOCSIDIZERANLÄGGNING

En restprodukt som bildas vid gasuppgraderingsprocessen är processluft som också kallas restgas. Processluften från gasuppgraderingen renas i en vocsidizeranläggning, en regenerativ termisk förbränningsvärmeväxlare. Anläggningen renar processluft från kolväten genom termisk oxidation (förbränning) vid hög temperatur. I förbränningen omvandlas föroreningarna i restgasen till koldioxid, vatten och övriga förbränningsprodukter.

Förbränningsväxlaren består av en bädd med värmetåligt keramiskt material, genom vilken den förorenade processluften leds. I bädden, som fungerar som värmeväxlarmedia, värms processluften till en så hög temperatur att kolväten och andra kemiska föreningar oxideras. Bädden värms initialt upp till driftstemperatur (900–1000 °C) med hjälp av elektriska värmeelement som är placerade i ett horisontellt snitt i bäddens centrum. När erforderlig drifttemperatur erhålls är förbränningsvärmeväxlare redo att ta emot och rena processluft. Processluften passerar tre stadier på sin väg genom den keramiska bädden. I inloppshalvan av bädden värms processluften av det uppvärmda bäddmediet till oxidationstemperatur (> 800C). (MEGTEC Systems AB, 2010)

När den ämnesspecifika oxidationstemperaturen uppnåtts sker en oxidation av föroreningar till koldioxid, vatten och oxidationsprodukter, under avgivande av värme. När processluften lämnar oxidationszonen, i utloppshalvan av bädden, överförs värme från processluften till bäddmediet och processluften kyls av. När processluften lämnar bädden är lufttemperaturen minst 30 – 80 högre än vid inloppet. (MEGTEC Systems AB, 2010)

Under 2017 hade restgasen en ΔT på 84 °C mellan in- och utflödet från vocsidizern, ett medelflöde in till vocsidizern, som antas vara densamma som flöde ut, då flödesmätare saknas, på ca 1608 m³/h (0,446 m³/s). Den varma restgasen som släpps ut genom skorstenen har således ett värmevärde och för 2017 har värmeenergin beräknats till 535 MWh enligt ekvation (3) för samtliga registrerade värden från flödes- och temperaturgivare i anläggningen per timme. Vid beräkningar har ρ antagits vara 1,8 kg/m³ och ämnets specifika värmekapacitet till 895 J/kgK för CO₂.

9 RESULTAT

I följande kapitel presenteras resultatet för denna studie. Verkets värmekartläggning, värmebalans och optimeringsförslag kommer att redovisas och analyseras.

9.1 UPPVÄRMNING AV BYGGNADER ÖVER MARK

I nedanstående tabell 5 finns värmebehov och värmeförsel för kretsen som värmer upp byggnader över mark för både år 2017 och 2016. Detta är främst för att man ska kunna jämföra värmebehovet med tidigare år. Av detta kan en minskning med fem procent av värmeförseln observeras.

I en värmebalans ska tillförd värmeenergi vara lika med förbrukad. Efter kartläggningen av värmeförbrukningen för 2017 antas 719 MWh vilket motsvarar ca 20 % av tillförd värmeenergi att vara förluster. Ytterligare en förlust bör tas med här och det är den från förbränningen av rötgasen, en verkningsgrad på ca 75 % ger en förlust på 333 MWh som avges till omgivningen. Sammanlagda förlusten är 1052 MWh vilket av den totala tillförda effekten motsvarar förluster på 26,5 %. Detta utan hänsyn till förluster i varje enskild byggnad.

Tabell 4. Resultatet av värmekartläggningen: uppvärmning av byggnader över mark

Tillförd värmeeffekt	MWh 2017	MWh 2016
2 pannor	995 (1328)	826
VP 800kW	2466	2800
VP 68kW	175	184
Totalt tillförd värmeeffekt	3636 (3969)	3810
Förbrukad värmeeffekt		
Verkstadsbyggnaden	1410	1360
Gasklockan	42,4	83,4
Kemikaliebyggnaden	57,8	9,73
LB & RK	120 + 66	156 + 81,8
SA 00 & SA20	656 + 121	660 + 190
Total förbrukning byggnader Ö.M	2473	2541
Värme till röttkammare	419	-?
Såld fjärrvärme	29	20
Förluster & andra värmekretsar	715(1052)	1249
Totalt förbrukad värmeeffekt & värmeförluster	3636(3969)	3810

9.2 UPPVÄRMNING AV RÖTKAMMARE

Resultatet av kartläggningen av värmebehov och tillförseln till röttkammare visas i tabell 6 nedan.

Tabell 5. Resultatet av värmekartläggningen: uppvärmning av röttkammare

Värmebehov röttkammare	MWh
Teoretiskt värmebehov primärslam	4626
Teoretiskt värmebehov Ö-slam	2678
Summa	7303
Värmeförsel röttkammare	

VVX1 värme till R100	7756
VVX2 värme till R200	3476
Totalt	11232
Förluster	3928 (35 %)
Värme från värmepumpen	3259
Tillförd värme från pannor	419
Värme från VVX RAV	223
Värme från VVX SLAM	2347

Uppvärmningen av avloppsslammet är en av de största värmeförbrukarna på Käppalaverket. Det teoretiska värmebehovet för primärslam och överskottslam är beräknad till 7,3 GWh vilket kan vara en överskattning. Detta slam värms upp via värmeväxlare med värme som kommer från värmepumpen som spetsas med värme från cirkulationskretsen där pannor och värmepumpar från verkstadsbyggnaden är inkopplade.

Värme som tillförs värmepumpen på den kalla sidan är sammanlagd 2570 MWh och på den värmda sidan är det en cirkulationskrets som avger värme till slamflödet via värmeväxlare 1 och värmeväxlare 2. Beräkningar gjorda på värmeväxelkretsarna och slamflöden till dessa ger en erhållen värmeeffekt på 11 232 MWh.

9.3 UPPVÄRMNING AV BERGANLÄGGNINGEN

Resultatet av kartläggningen av värmebehov och värmeförseln i berganläggningen visas i tabell 7. Ungefär 72 procent av värmebehovet tillförs från värmeåtervinningen i berganläggningen, resterande värmebehov tillgodoses via värmepumpens värmeförsel till anläggningen.

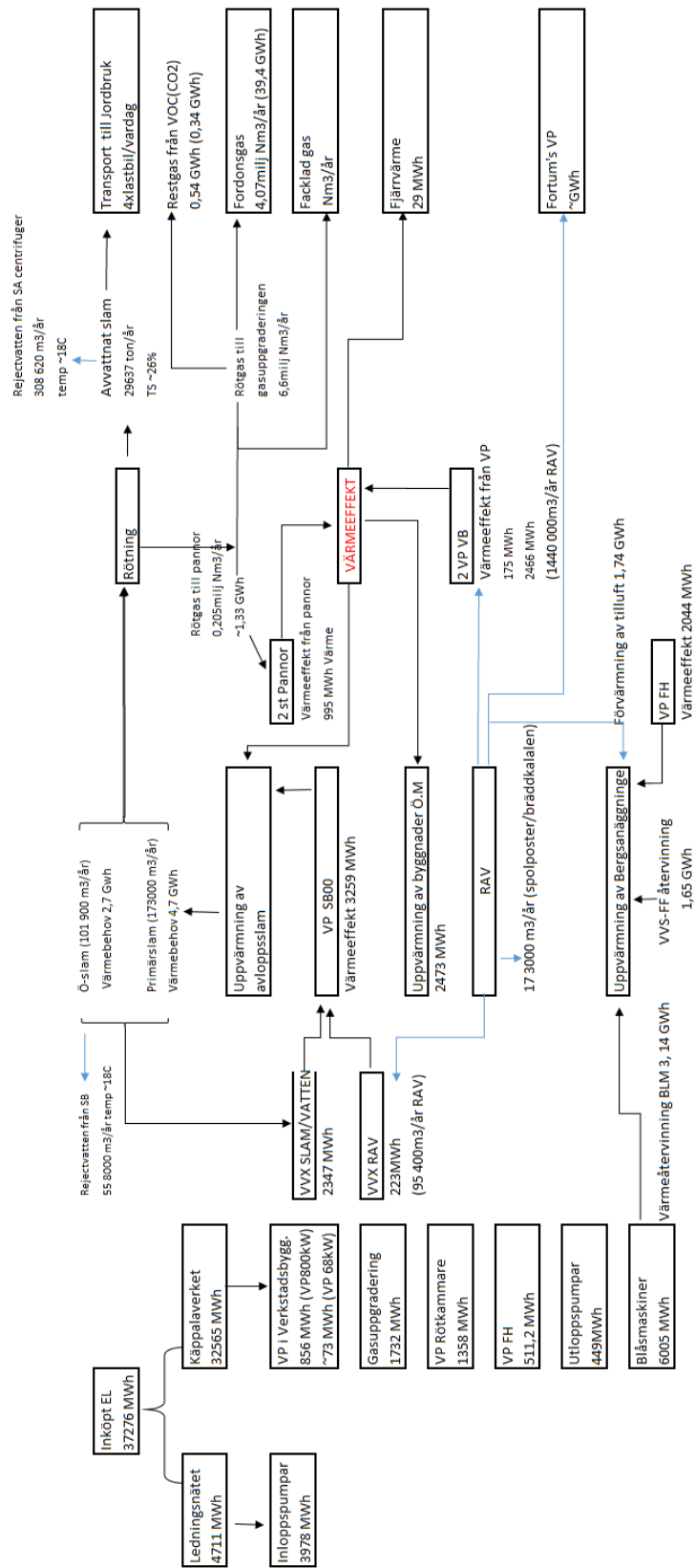
Tabell 6. Resultatet av värmekartläggningen: uppvärmning av berganläggningen

Värme som har avgetts tilluften och berganläggningen	MWh
Värme från RAV (W27(tot))	1863
Värmeåtervinning frånluft (W28)	3130
Värmeåtervinning blåsmaskiner W29 (tot)	1650
VP värmeförsel	511*4=2044
Tilluftens teoretiska värmebehov	9 231

9.4 SCHEMATISK ÖVERSIKT AV KÄPPALAVERKETS VÄRMEBALANS

En värmebalans har sammanställts i och med värmekartläggningen av Käppalaverket för kalenderåret 2017. I figur 5 har en schematisk beskrivning av värmeflöden i verket arbetats fram utifrån värmekartläggningen.

Värmebalans 20170101-20180101



Figur 5. Schematisk bild över värmeflöden på Källalaverket

Värmebalansen i figur 4 visar inte enbart värmeflöden utan också resurser som kommer in och ut från verket samt den värmen som ännu inte tas tillvara på. Detta är för att erhålla ett helhetsperspektiv. Till vänster i flödesschemat redovisas elförbrukningen i MWh, resterande flöden är värmeflöden i MWh om inget annat anges.

I tabell 10 presenteras resultatet av verkets totala värmebalans. Detta genom sammanfattning av tidigare kartlagda flöden. Ett system i balans är då den tillförda värmen är lika med värmebehovet och systemförluster. Uppvärmningen av verket är, som tidigare nämnt, uppdelad i tre olika men sammankopplade uppvärmningssystem med separata värmebehov, förluster och värmeproducerande aggregat.

Tabell 7. Värmebehov och värmeförsörjning för Käppalaverket i MWh för 2017

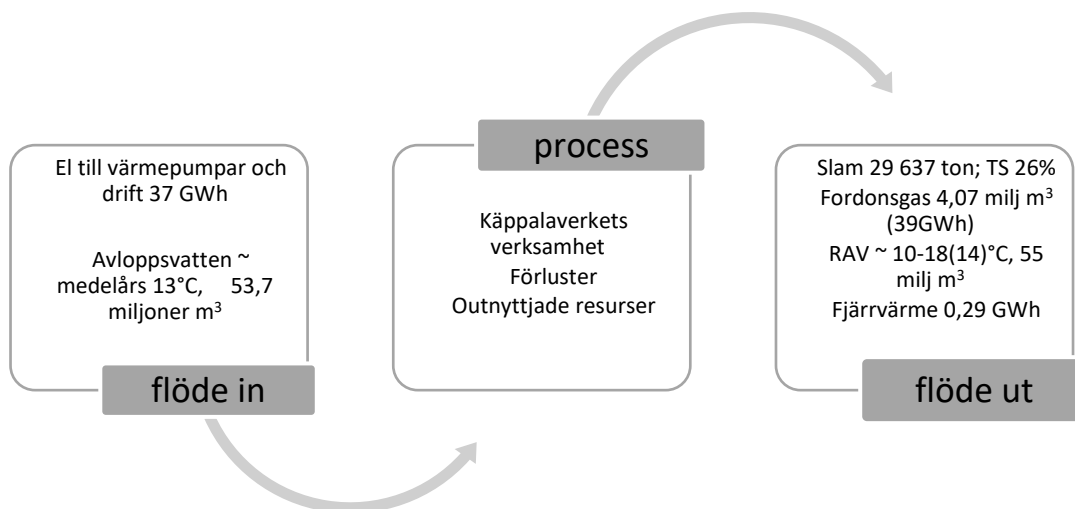
Värmebehov	MWh	Totalt	Värmeförsörjning	MWh	Totalt	Diff MWh	%
Byggnader Ö.M	2473	2502	2 pannor VB	995(-419)	3217	715	22
Fjärrvärme	29		Värmepumpar VB	2641			
Slammuppvärmningen RK	7303	7303	Värme från VVX	11232	11232	3928	35
Berganläggningen	9231	9231	Värmepump FH	2044	8687	- 544	-6
			Värme. åter bergsang	6643			
Totalt		19036	Totalt		23136	4100	18
Totalt utan värmeåtervinning		12393	Totalt utan värmeåtervinning		16493	4100	25

Som kan utläsas i tabellen ovan är Käppalaverkets totala värmebehov beräknat till 19 036 MWh. De största värmekrävande processerna är uppvärmning av slammet i röt-kammarna och tilluften i berggrummet. Det är också de två värmekretsar som har teoretiska beräkningar som grund. Den faktiska värmeeffekten som överfördes till de tre systemen beräknades till 23 136 MWh med värmeåtervinning inräknat. 18 % av den producerade värmeeffekten har beräknats vara till förluster. Om man bortser från värmeåtervinningen i berganläggningen, som uppstår på grund av process verksamheten, uppgår värmebehovet till 12,4 GWh och förluster i systemet då uppskattas vara 25 %.

9.5 RESURSKARTLÄGGNING

I samband med värmekartläggningen har flöden av andra energikällor sammanställts för att erhålla helhetsperspektiv. Då studien främst fokuserats på värme-flöden har kemikalietillsatser inte tagits hänsyn till i detta arbete. Käppalaverkets inkommande och utgående resurser finns presenterade i figur 6. Förbundet köper in elektricitet för att driva verket och sköta vattenreningen. Avloppsvattnet är en resurs i sig då stora flöden med organiskt material och en medelårstemperatur på 13 °C kommer in till verket för att omhändertas. Processen för reningen kräver inte bara elektricitet utan också värme. Värmeförsörjning sker genom värmepumpsdrift, som drivs av inköpt el, och värmen från det rena avloppsvattnet. Avloppsvattnet renas från de organiska produkterna som blir till slam. Slammet förtjockas, värms upp och rötas. Vid rötningen produceras metangas. Gasen uppgraderas till fordonsgas och säljs till SL. Det rötade slammet kyls ner och avvattnas i centrifuger. Den avvattnade slammet körs därefter ut till

jordbruk. Posten outnyttjade resurser hänvisas till värmen som ombildas som biprodukt från olika processer samt metangasen som facklas upp.



1.

Figur 6. Resursflöden in och ut ur verket

9.6 OUTNYTTJADE RESURSER

I värmebalansen kan det utläsas ett flertal värmekällor som idag inte tillvaratas där värme omvandlas på ett eller annat sätt till omgivningen. Dessa finns kartlagda i figur 6 och sammanfattas i tabellen nedan.

Tabell 8. Outnyttjade värmekällor

Process	Form	Mängd
Facklad gas	Rötgas	-
Restgas	CO ₂ -gas efter Vocsidizern	0,54 GWh
Värmeåtervinning VB, KB, KO, VB	Ventilation	871 MWh värmeförlust
Rejektvatten från Slambehandlingen	Rejektvatten	-
Vattenreningsprocessen	Renat avloppsvatten	mer än 128 GWh

10 OPTIMERINGSRESULTAT

Beräkning och resultatet av optimeringsutredningen visas i nedanstående kapitel.

10.1 VENTILATIONEN I KONTORSBYGGNADER

En platsinventering har genomförts i samband med optimeringsförsöket. Bäst lämpade fläktar för värmeåtervinningen är de som är placerade på takplan i gamla kontorsbyggnaden, GK, och tilluftsfläkten på samma plats, samt till- och frånluftsfläktarna i nya kontorsbyggnaden på takplan i nya kontorsbyggnaden, NK. Trots stora volymer av tilluft har verkstadsbyggnaden en icke optimal placering av frånluftsfläktar, dessa är belägna på byggnadens tak. Med hänsyn till platsbrist samt extra kostnader på att bygga en frånluftskanal där all frånluft från de sju fläktarna skulle samlas och växlas mot tilluften anses en värmeåtervinning vara ekonomiskt icke försvarbar. Hänsyn måste också tas till att byggnaderna inom en snar framtid kommer att byggas om och i samband med detta anses investeringen inte lönsam.

En teknisk lösning kan vara att installera värmeåtervinning med hjälp av ett värmebatteri. Batteriet kommer att plocka ut värmen från frånluften och värma en cirkulationskrets som i sin tur kommer att värma tilluften. Den genomsnittliga verkningsgraden för värmeöverföring ligger mellan 50–60%. (Warfvinge 2010) Ett sådant batteri tar inte mycket plats och passar på sådant sätt perfekt in på takplan GK och takplan NK.

10.1.1 Beräkningar av värmeåtervinningen

Temperaturverkningsgraden för värmeöverföringen är kvoten mellan temperaturförändringen som följer av att luften passerar värmeväxlaren och beräknas med ekvation (4). Verkningsgraden för värmebatteriet antas vara 60 % och temperaturen efter förvärmningen beräknas. I tabell 9 visas den beräknade temperaturen på avluften. Beräkningarna utgår från säsongmedeltemperaturen och årsmedeltemperaturen på uteluften, frånluftens temperatur är nästan konstant året om. (Soleimani-Mohseni, Bäckström, & Eklund, 2014)

$$\eta_T = \frac{T_{FL} - T_{avluft}}{T_{FL} - T_{ute}} \quad (4)$$

Tabell 9. Uppmätta årsmedelvärden för 2017 och den beräknade temperaturverkningsgraden

Frånluft °C	Avluft °C	Uteluft °C	Temperaturverkningsgraden
22	9,22	0,7(vinter)	0,6
22	12,7	6,5(vår)	0,6
22	18,7	16,5(sommar)	0,6
22	13,78	8,3(höst)	0,6
22	13,6	8(årsmedel)	0,6

Uppvärmningsbehovet för verkstadsbyggnaden uppgick till 1410 MWh under 2017. Verkstadsbyggnaden, gamla kontorsbyggnaden och nya kontorsbyggnaden har en gemensam värmeeffektmetare. Värmebehovet för tilluften beräknas enligt ekvation (3) och tilluften antas ha samma temperatur som uteluften. Det nuvarande värmebatteriet värmer upp luften till 18 °C således erhålls en ΔT på 10 °C. Frånluftens medelårstemperatur är ca 22 °C och en ΔT på 14 °C. Effektberäkningar via ekvation (3) visas i tabell 6.

Tabell 10. Effektbehov och tillgänglighet i kontorsbyggnaden

Fläkt tilluft	Effektbehov i MWh	Fläktar frånluft	Tillgänglig effekt i MWh
KO00-K901	24,3	KO00-K902	132,5
KO00-K903	40,0	KO00-K904	14,7
KO00-K905	93	KO00-K906	73
PB00-K901	136,7	PB00-K902	43
KB00-K901	163,7	KB00-K902	192
VB00	163	Förluster & osv	185 + 228
Summa	686	Summa	455,7

Resultatet i ovanstående tabell visar att 686 MWh värmeeffekt krävs för uppvärmning av tilluften. Detta motsvarar 49 % av den totala värmeeffekten levererade från gaspannorna och värmepumparna. Då värmeåtervinning saknas uppgår förlusterna till 869 MWh detta då tilluften får en högre temperatur när den passerar genom byggnaden och blir frånluft.

Förslag på fläktar som tack vare ett stort luftflöde och en stabil frånluftstemperatur har stor potential för införande av frånluftsåtervinning visas i nedanstående tabell 11.

Tabell 11. Förslag på fläktar för värmeåtervinning

Fläkt	Effektbehov i MWh	Placering	Växlas mot Fläkt	Tillgänglig effekt frånluft
PB00-K901	136,7	Takplan GK	KO00-K902	132,5
			KO00-K904	14,7
			KO00-K906	73
			PB00-K902	43
Summa	136,7	Mot	Summa	263,2
KB00-K901	163,7	Takplan NY	KB00-K902	192

Med en verkningsgrad på 60 % finns det 158 MWh som går ut på takplan GK och motsvarande 115 MWh på takplan NY. Värmeåtervinningen innebär att en total värmeeffekt på 273 MWh kan återföras till systemet. Sammantaget blir detta en besparing med 40 % av det totala uppvärmningsbehovet i verkstadsbyggnaden och en minskning med 11 % sett från uppvärmningsbehovet av byggnader över mark.

10.2 RESTGAS FRÅN VOC

Ett sätt att tillvarata den värmen som finns i ett medium är att överföra det till ett annat. Värmeinhållet i restgasen har beräknats enligt ekvation (3) för år 2016 och 2017 och finns presenterade i tabell 12.

Tabell 12. Värmevärde i restgas

ÅR	Medelflöde m ³ /s	Medeltemp ut ur VOC	Värmeeffekt	Värmeeffekt värmeväxlare
2017	0,45	84 °C	535 MWh	321 MWh
2016	0,37	71 °C	383 MWh (422 MWh)	230 MWh (253,2 MWh)

Under 2016 saknas det ett flertal flödesmätningar för restgasen för perioden 1/1–16 till 22/2–16 vilket kan bero på att mätaren var trasig då resterande värden finns angivna. En uppskattning beräknad på medelflöden ger en värmeeffekt på 422 MWh i stället för 383 MWh.

En teknisk lösning för att tillvarata på energin i restgasen är att värmeväxla den mot ett värmebehov som finns på anläggningen. Med en verkningsgrad på värmeväxlare på ca 60 % kan ca 321 MWh användas till förvärmningen.

11 DISKUSSION

I föreliggande rapport har värmesystemet på Käppalaverket studerats med avseende på användningen av främst värme men även andra biprodukter producerade från reningen av avloppsvatten. Detta för att få en helhetssyn av dels hur uppvärmningssystemen ser ut, dels för att kartlägga det totala värmebehovet i anläggningen. Dessutom inkluderar kartläggningen ett antal olika värmeförluster som inte inkluderats i tidigare studier. Då det föreligger en osäkerhet runt alla framtagna värden får denna balans ses som en grov uppskattning av värmefördelningen på Käppalaverket.

11.1 UPPVÄRMNING AV VERKET

Under 2017 var Käppalaverket självförsörjande gällande värmeproduktion från förbränningen av rötgasen i gaspannorna. Tidigare år fanns det antingen ett större värmebehov eller att mindre rötgas producerades. Den förbrända rötgasen tillsammans med den inköpta elen, utan vilken driften av värmepumpar, värmeväxlare, fläktar, pumpar och diverse utrustning för rening av avloppsvatten är omöjlig, tillgodosåg verkets energibehov.

Värmebalansen i detta arbete har beräknats och kartlagts för processerna på Käppalaverket och är inte en exakt beskrivning av den totala värmeförbrukningen utan är mer ett underlag för att överskådligt visa vart energin tar vägen och hur den produceras. Detta på grund av att det föreligger en osäkerhet kring alla framtagna värden i denna balans.

11.2 UPPVÄRMNING AV BYGGNADER ÖVER MARK

Den framtagna värmebalansen för värmesystemet som sköter uppvärmningen av byggnader över mark samt rötchammare innehåller ett flertal antaganden. Beräkningar av värmebehovet med hjälp av ekvation (3) har utförts för laboratorie- och rötchammarbyggnaden baserat på cirkulationsflödet samt temperaturskillnaden med värden från databasen aCurve. Värmebehovet för de andra byggnaderna kunde tas direkt från aCurve.

Förluster från uppvärmningskretsen beräknades till 1052 MWh. 333 MWh gick åt vid förbränningen av rötgasen i gaspannorna. Resterande 715 MWh antas vara värmeförluster i rörledningar och värmeöverföringen. Då det saknas effektmätare på ett flertal ställen både från värmekällan och där värmebehovet finns är det svårt att exakt kartlägga förlusterna. I samband med detta kan en del av värme till och med tillvaratas i andra kretsar, till exempel uppvärmningen av berganläggningen eller slamuppvärmningen. Värmen som överförs till rötchammaren för uppvärmning av rötslammet beräknas motsvara en månad av värmepumpsdrift och uppskattats till 419 MWh.

11.3 UPPVÄRMNINGEN AV RÖTKAMMARE

Värmebalansen för uppvärmningen av slammet i rötchammarna är det som varit svårast att sammanställa. Det teoretiska värmebehovet beräknades relativt enkelt med hjälp av ekvation (3). Flödesmätningar samt temperaturer på det inkommande slammet är det som ligger i grund till beräkningarna och dessa kommer från aCurve. Slammet behöver värmas så att dess temperatur höjs med 22–23 °C. Det teoretiskt beräknade värmebehovet behöver inte nödvändigtvis vara det som finns i den verkliga processen. Hänsyn måste tas till att det varma och kalla slammet blandas ständigt i rötchammaren och att slammet stannar i rötchammaren i ca

16 dagar, vilket påverkat värmebehovet. Att det inte finns temperaturmätare på slamflöden från R100 och R200 in till och från värmeväxlare gör det svårt att beräkna exakt hur mycket värme som faktiskt går åt till uppvärmningen. Av slamflödesmätare som går in i värmeväxlare beräknades en värmeeffekt på 11 232 MWh vilket är inte helt orimligt med ett värmebehov på 7303 MWh. Det som är anmärkningsvärt är att slamflödet in till värmeväxlare är flera gånger större än det totala primärslamflödet och överskottslamflödet in till R100 och R200. Att stora volymer av slam rötas i rötkammarna i 16 dagar kan vara en förklaring till detta med hänsyn till rötkammarvolymen på 18 000 m³. Om man förutsätter att beräkningarna stämmer erhålls en värmeförlust på 35 % av den totala värmeförlusten vilket är ett rimligt värde. Det finns flera källor till förluster i den kretsen. Det som vore intressant att undersöka är hur bra dessa rötkammare är isolerade av bergrummet och om det finns värme att tillvarata där. För att detta skall vara möjligt bör man sänka ner mätare och logga temperaturen under en längre tid för att erhålla trovärdiga resultat. Finns det värme att spara så finns det pengar att spara.

Värmepumpkretsen i rötkammaren beräknas förbruka 1358 MWh el beräknat på kompressors strömmätningar, en $\cos \phi$ på 0,8 och en spänning på 400V samt en $\sqrt{3}$ för trefas. På den varma sidan av värmepumpen som har värmeväxlare inkopplade mot slamflöden beräknas en värmeeffekt på 3259 MWh. Detta ger värmepumpen en COP-faktor på 2,4 vilket är inte det som anses optimalt. En COP-faktor bör ligga mellan 3–4 vilket den inte gör. Detta kan då bero på att flödesmätare in och från värmepumpen inte är kalibrerade och bör felanmälas. Samtidigt finns det en avvikelse i hur mycket värme som finns i värmepumpkretsen och hur mycket som fås från värmeväxlare till slamuppvärmningen. En verkningsgrad på 50 % antogs för värmeväxlarna och i och med större flöden slam passerar växlarna kan detta motivera avvikelsen. En annan motivering kan vara att flödesmätare visar fel. För mer korrekta beräkningar bör alla mätare i denna krets kontrolleras och kalibreras.

11.4 UPPVÄRMNING AV BERGANLÄGGNINGEN

Tilluftsflödet som värms upp värmer i sin tur berganläggningen i kombination med en värmepump. Även i detta värmesystem saknas ett flertal flödes- och temperaturmätare. Värmeåtervinningen från renat avloppsvatten, värmen ur frånluften och blåsmaskinerna har beräknats utifrån märkplåtar på installerade pumpar och dess drifttid och kan därför vara en överskattning. Värmebehovet för uppvärmningen av tilluft har beräknats utifrån de faktiska luftflöden som blivit processade av fläktar och anses därför vara ett rimligt värde. Tilluftuppvärmningen i berganläggningen är största värmeeffektförbrukaren i verket och i och med värmeåtervinningen är värmebehovet endast 28 %.

Värmepumpens effektförbrukning beräknades på samma sätt som för de övriga. En COP-faktor har inte kunnat räknas fram på grund av bristfälliga mätningar i kretsen. En COP 4 antogs utifrån en standard för värmepumpar.

Att kontrollera hur mycket värme som tilluften tar upp är svårare än för andra medier. Detta på grund av att det teoretiska värdet kan väldigt enkelt skilja från hur verkligheten ser ut. Med detta menas att det krävs ett slutet system för att förluster av luftflöden skall kunna fastställas och beräknas. I praktiken kan en port ha varit öppen under en tid och luften kan ha sipprat ut vilket innebär ett större värmebehov i teorin men ett mindre i verkligheten. Hur tät ett system är avgörande för dess förluster oavsett mediet som flödar i det.

11.5 OPTIMERINGSFÖRSLAG

11.5.1 Värmeåtervinning frånluft

I en mer omfattande värmekartläggning hade värmebehov i varje separat byggnad behövt beräknas för att kartlägga förluster i bland annat hur tilluften värms upp och om värmeåtervinning förekommer. Detta har gjorts i verkstadsbyggnaden som valdes till optimering objekt då det gick snabbt att se att det inte fanns någon värmeåtervinning av frånluft. 49 % av värmeförseln till verkstadsbyggnaden används till uppvärmningen av tilluften och frånluften med ett värmevärde på 871 MWh, beräknat för året 2017, släpps ut till omgivningen. Genom att installera värmebatteri för fläktar föreslagna i tabell 12 kan en besparing med 273 MWh göras. Detta skulle innebära 11 % minskning av värmebehovet för byggnader över mark.

11.5.2 Värmeåtervinning av restgas från vocsidizeranläggning

På Käppalaverket är en av de mest värmekrävande processerna uppvärmning av avloppsslam. Ett alternativ kunde vara att förvärma Ö-slammet innan den kommer in i rötkammaren och detta antingen före eller efter centrifugen. Tekniken i sig innebär att den varma restgasen från vocsidizeranläggningen värmväxlas mot en cirkulerande vätskekrets som i sig värmer slammet. En sådan lösning kommer att innebära att slamuppvärmningens värmebehov kommer att minska. En minskning av värmebehovet innebär en mindre produktion av värme och kan på så sätt sänka elkostnaderna.

Slamuppvärmningen är en process som pågår konstant och i samband med framtida ökade slamproduktion innebär ett större värmebehov. I samma takt som R300 driftsätts kommer större mängden fordonsgas att kunna produceras vilket kan innebära en ökad produktion av restgas. Hur stora procentuella ökningarna kommer att bli är svårt att förutspå. För att dimensionera och välja rätt typ av värmväxlare måste hänsyn tas till detta.

Om sådana investeringar ur ekonomisk synpunkt är försvarbara är svårt att säga. I vissa fall är det tyvärr billigare att släppa ut värmen till omgivningen än att investera i dyr utrustning för att ta tillvara på en mindre värmeeffekt.

11.5.3 RAV som värmekälla

Diskussionen om huruvida man borde ta tillvara på energin som finns i det renade avloppsvattnet i samband med vattenrening pågår kontinuerligt. Tekniken finns och energitillgången är stabil. Det som är problematiskt är dock lönsamheten i en sådan affär. Termisk energi inte är en högkvalitativ energiform som till exempel elektrisk energi. Detta innebär att behovet av värme varierar utefter säsongvariationen i Sverige och är endast ekonomiskt lönsamt under vinterhalvåret. För att en investering ska vara hållbar ur ekonomiskt perspektiv däremot är det viktigt med en kort återbetalningstid, elpriset samt att det finns en mottagare av värme i närheten som är intresserad av en sådan affär. Som tidigare nämnt råder det naturligt monopol på fjärrvärmemarknaden och som en mindre producent kan det vara svårt att hitta ekonomiska incitament för ett sådant samarbete. Detta är tyvärr nackdelen med dagens marknadsekonomi, att det som ser bra ut ur miljöperspektiv inte alltid är en lönsam investering i en icke styrd marknad.

12 SLUTSATS

En av målsättningarna med projektet var att fastställa Käppalaverkets värmebalans och identifiera tillgängliga värmeresurser som idag inte används för att på sikt nå minsta möjliga resursförbrukning i verket.

Kartläggningen av värmeflöden visade att uppvärmningen i verket sker genom tre system som är delvis sammankopplade och värmebehovet för 2017, bortsett från värmeåtervinningen i berganläggningen, beräknades till 12,4 GWh. Slamuppvärmningen, tilluftsuppvärmningen i berganläggningen och uppvärmningen av kontorsbyggnader är de största värmekrävande processerna i verket. Värmeförluster beräknades uppgå till 25 % av den tillförda värmen.

Kartläggningen av resursflöden i verket visade på ett flertal värmekällor som idag inte används. Restgas från vocsidizeranläggningen avges direkt till omgivningen, en del rötgas facklas i anläggningen på grund av dålig styrning, värmen i det renade avloppsvattnet nyttjas inte till dess fulla potential samt bland annat att verkstadsbyggnaden/kontorsbyggnaden saknar värmeåtervinning och varm frånluft avges direkt till omgivningen.

Optimeringsresultatet visar på att ca 600 MWh värmeeffekt kan sammanlagt återföras till verkets processer genom värmeåtervinning via värmebatterier och värmeväxlare. Tekniken finns, det som är avgörande ur investeringsperspektiv är själva kostnaden för investeringen.

Då det föreligger en osäkerhet runt alla framtagna värden får balansen ses som en grov uppskattning av värmefördelningen på Käppalaverket. För att ta fram noggrannare resultat bör kontroll och kalibrering göras av samtliga mätare och nya mätare installeras där de idag saknas i uppvärmningskretsarna.

13 REFERENSER

- AB, Malmberg Water. (2010). *Teknisk beskrivning, Käppala GR*.
- AFS 2009:2. (u.d.). *Arbetsplatsens utformning*. Arbetsmiljöverket.
- Alvarez, H. (2006). *Energi Teknik Del1 & Del2*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Energimyndigheten. (Maj 2018). Hämtat från <http://www.energimyndigheten.se/energieffektivisering/foretag-och-organisationer/energikartlaggning/>
- Kjellèm, B. J., & Andersson, A.-C. (2002). *Energihandbok för avloppsreningsverk*. Stockholm: Svenskt Vatten AB.
- Käppalaförbundet. (2000). *Käppalaverkets driftinstruktioner - Läsanvisning*. VAI VA-Project AB.
- Käppalaförbundet. (Mars 2018). Hämtat från <https://www.kappala.se/Om-Kappalaforbundet/Historia/>
- MEGTEC Systems AB. (2010). *Operatörsmanual, Socsidizer System EL*. Göteborg.
- Muren, A. (2011). *Exploatering eller reglering av naturliga monopol? Exemplet fjärrvärme*. Stockholm: Regeringskansliet Finansdepartementet . Hämtat från f
- Naturvårdsverket. (2013). *VILLKOR OCH KRAV FÖR UTSLÄPP FRÅN AVLOPPSRENINGSVERK – VÄGLEDDNING* . Svenskt vatten AB.
- Naturvårdsverket. (04 2018). *Sveriges Miljömål*. Hämtat från <https://www.miljomal.se/Miljomalen/>
- Soleimani-Mohseni, M., Bäckström, L., & Eklund, R. (2014). *EnBe Energiberäkningar*. Studentlitteratur .
- VA-Forsk. (2005). *Problem och lösningar vid processoptimering av rötkammardriften vid avloppsreningsverk*. Stockholm: Svenskt Vatten AB.
- Warfvinge, Catarina & Dahlblom, Mats (2010). *Projektering av installationer i byggnader*. Lund: Studentlitteratur AB