

Examensarbete i VA-teknik 7,5 högskolepoäng

**Energibalans
för rötkammaranläggningen
vid centrala reningsverket
i Kristianstad
för olika driftsalternativ**

Andreas Sjöberg
Kristianstad 2008

Högskolan Kristianstad
291 88 Kristianstad

Kristianstad University
SE - 291 88

Författare, program/Author, programme

Andreas Sjöberg, VA och kretsloppsteknikerprogrammet

Handledare/Instructor

Peter Dahlblom, Universitetslektor, Högskolan Kristianstad
Markus Larsson, Projektingenjör C4-teknik

Examinator/Examiner

Lennart Mårtensson, docent, Högskolan Kristianstad

Svensk titel

Energibalans för rötkammaranläggningen vid centrala reningsverket i Kristianstad för olika driftalternativ

English title

Energy balance for different alternatives for the sludge digestion at the central wastewater treatment plant in Kristianstad

Språk/Language

Svenska/Swedish

Abstract

The aim of this report is to make a comparison of energy balance and economy at different running conditions for the digesters at the wastewater treatment plant at the city of Kristianstad. The energy balance includes heating of the sludge, energy losses through convection and the energy content of the produced methane gas. A comparison is made between the alternatives mesophilic and thermophilic digestion, and between the present design of digesters and design with additional insulation. The results show that the best alternative from an energy point of view would be to insulate the digesters and keep the present mesophilic digestion. If the production of gas should increase by more than 14 % at the change from mesophilic to thermophilic digestion, the alternative with thermophilic digestion and additional insulation would become the most economic alternative.

Godkänd av / Approved by:

Examinator / Examiner

Lennart Mårtensson, docent, Högskolan Kristianstad

Datum / Date

Erkännande

Jag vill tacka min externa handledare Markus Larsson, för stöd och synpunkter kring denna rapport. Jag vill även tacka Göran Johansson, arbetsledare på centrala reningsverket i Kristianstad för hans hjälp med att ta fram viktigt material som har varit till stor hjälp i detta arbete. Jag vill också tacka all övrig personal på centrala reningsverket, för det stöd jag fått. Jag vill avsluta med att tacka min interna handledare Peter Dahlblom, för all hjälp med matematiska uträkningar och för de tips och synpunkter jag fått av honom.

Sammanfattning

Det Svenska miljömålet om återföring av växtnäring till produktiv mark, har gjort att ett initiativ till certifieringsregler för återföring av avloppsslam tagits fram. Som en viktig del i dessa certifieringsregler krävs det att slammet måste vara hygieniserat. På centrala reningsverket i Kristianstad vill man använda sig av termofil rötning som hygieniseringsmetod. Termofil rötning innebär en höjning av temperaturen i rötkamrarna med ca 19 °C.

Denna rapport syftar till att göra en jämförelse av energiutbyte och ekonomi vid olika driftsbetingelser för rötkammaranläggningen.

I rapporten ingår energibalans som inkluderar uppvärmning av slammet, värmeförluster från rötkammarans väggar, samt energiinnehållet i den producerade rötgasen. En jämförelse görs mellan alternativen mesofil och termofil rötning, samt mellan nuvarande uppvärmning och tilläggsisolering av rötkamrarna. Termofil rötning innebär ett ökat energibehov beroende på uppvärmning och värmeförluster, eftersom en högre temperatur erfordras än vid mesofil rötning. Resultaten visar att rent energimässigt skulle det bästa alternativet vara isolera rötkamrarna och behålla mesofil rötning. Resultatet baseras på att gasproduktionen förblir den samma vid termofil rötning. Om gasproduktionen skulle öka med mer än 14 % vid termofil rötning, blir alternativet med termofil rötning och tilläggsisolering det mest lönsamma alternativet från energisynpunkt.

Innehållsförteckning

INLEDNING	6
BAKGRUND	7
PROCESSBESKRIVNING	7
<i>Avloppsvattenrening</i>	7
<i>Slambehandling</i>	9
RÖTKAMMARANLÄGGNINGEN	10
<i>Röttningsprocessen</i>	11
HYGIENISERINGSKRAV	12
MATERIAL OCH METOD	13
VÄRMEBEHOV FÖR UPPVÄRMNING AV SLAMMET	13
<i>Specifik värmekapacitet c_p</i>	13
<i>Nuvarande värmebehov för uppvärmning av slammet</i>	13
<i>Värmebehov för uppvärmning av slam till termofil rötning</i>	14
VÄRMEFÖRLUSTER I RÖTKAMRARNAS	15
<i>Rötkammarens mantelarea</i>	15
<i>Värmegenomgångskoefficienten</i>	17
<i>Nuvarande värmeförluster</i>	17
<i>Isolering av rötkamrarna</i>	18
GASPRODUKTION	19
RESULTAT	20
DISKUSSION	21
<i>Slutsats</i>	22
REFERENSER	23
BILAGA 1	24
BILAGA 2	27
BILAGA 3	28

Inledning

För att uppfylla miljömålet om återföring av växtnäring att ”senast år 2015 ska minst 60 procent av fosforföreningarna i avlopp återföras till produktiv mark, varav minst hälften bör återföras till åkermark” [1] har Svenskt vatten i nära samråd med berörda aktörer, tagit initiativ till att införa ett certifieringssystem för återföring av växtnäring från avloppsslam [2].

Det finns idag regler för spridning av avloppsslam på åkermark. Bland annat får man inte sprida avloppsslam på åkrar ämnade för odling av potatis, rotfrukt, och grönsaker som är i direkt kontakt med jorden [3].

För de grödor som inte berörs av förbudet, har många livsmedelsaktörer ändå varit utbrett tveksamma till användningen av avloppsslam på dessa åkrar. Därför har man nu tagit initiativ till ett certifieringssystem som ska kunna garantera att slammet uppfyller uppställda krav. Som en del i certifieringen av avloppsslam ingår det att slammet måste vara hygieniserat. Det vill säga att slammet måste vara fritt från sjukdomsalstrande bakterier så som salmonella, och parasitägg [2].

För att få en hygienisering av avloppsslammet kan man använda sig av termofil rötning. På centrala reningsverket i Kristianstad (CRV) överväger man att gå över från nuvarande mesofil till termofil rötning av slam.

Eftersom en övergång från mesofil till termofil rötning innebär en höjning av temperaturen inne i rötkamrarna med ca 19 °C, kommer energiåtgången för uppvärmning att bli högre, medan gasproduktionen teoretiskt också bör bli högre.

Denna rapport syftar till att ge en bild av energiförbrukningen/kostnaderna vid olika driftsbetingelser för rötkammaranläggningen.

Bakgrund

Processbeskrivning

Avloppsvattenrening

På centrala reningsverket renar man avloppsvatten från stora delar av Kristianstads kommun. Verket är dimensionerat för ca 205 000 pe, och den nuvarande belastningen uppgår till ca 130 000 pe, varav industrin svarar för ca 65 000 pe (2007).

Avloppsvattnet från de olika delarna i kommunen rinner med självfall den sista biten till reningsverket, där det sammanstrålar från 3 stycken kulvertar innan de når en stor pumpgrop. Härifrån lyfts vattnet upp av en stor skruv, så kallad Archimedesskruv. När vattnet har lyfts upp från pumpgropen rinner det till två parallella rens-galler, som har till uppgift att rensa bort större föroreningar. Renset pressas sedan ihop och samlas upp i en container för vidare transport till förbränning.

Efter rensavskiljningen leds avloppsvattnet till två parallella luftade sandfång, där den sand som kommer in från bl.a. gatorna sedimenterar och leds vidare till en sandtvätt. Den tvättade sanden samlas upp i en container för att sedan användas som utfyllnadsmaterial/anläggningsjord. I sandfånget slås även fett sönder av den luft som blåses in från botten av bassängen.

Från förluftningen leds vattnet till sex parallella försedimenteringsbassänger där resterande avsättbara föroreningar sedimenterar. Slammet från försedimenteringen pumpas till en gravitationsförtjockare för vidare behandling.

Efter försedimenteringen delas avloppsvattnet upp i två parallella biolinjer, BB och E för att genomgå biologisk rening. Att det är två olika linjer är ett resultat av utbyggnad och avloppsvattnet renas på samma sätt i båda linjerna.

Den biologiska reningen på reningsverket är en aktivslamanläggning med kvävereduktion. Biolinje E består av tre luftade aktivslamlinjer med vardera tre efterföljande mellansedimenteringsbassänger. Varje aktivslamlinje är egentligen tre stycken bassänger, där den första bassängen är en anoxisk zon, det vill säga att där finns inget fritt syre. De två efterföljande bassängerna är aeroba zoner, där luft blåses in från botten av bassängen. Vattnet från försedimenteringen kommer först in i den anoxiska bassängen. Det rinner sedan vidare till de två aeroba bassängerna, där syreälskande bakterier jobbar med att bryta ner organiskt material.

Här sker också en nedbrytning av växttillgängligt kväve till nitratjoner. För att uppnå tillfredställande nedbrytningshastighet och bakteriekoncentration i aktivslambassängerna, måste man återföra slam från mellansedimenteringen till början av aktivslambassängen. Det är detta som kallas för returslam. Kvävereduktionen sker genom att de nitratjoner som bildades i den aeroba zonen återförs genom returslammet till den anoxiska zonen. Här finns inget fritt syre tillgängligt så bakterierna måste använda det syre som är bundet i nitratjonen. Då bildas kvävgas som avgår till atmosfären. Detta kallas denitrifikation [4]. En mindre mängd så kallat överskottsslam tas kontinuerligt ut från mellansedimenteringen. Detta överskottsslam pumpas till ett buffertmagasin innan det pumpas vidare till förtjockaren.

Biolinje BB består av två stycken aktivslamlinjer med efterföljande 4 respektive 6 mellansedimenteringsbassänger. Funktionen är den samma som i biolinje E med den skillnaden att biolinje BB har högre kapacitet än biolinje E.

Det biologiskt renade vattnet från de båda biolinjerna sammanstrålar i en inblandningskanal innan det når till den kemiska reningen. I den kemiska reningen avlägsnas den största delen av fosfor i avloppsvattnet. I slutet av inblandningskanalen doseras en fällningskemikalie (järnklorid) till vattnet. Den kemiska reningen består av fyra parallella fällningslinjer med efterföljande sedimenteringsbassänger (eftersedimentering). Varje fällningslinje består av tre flockningsbassänger med omrörare. När fällningskemikalien doseras till vattnet måste den snabbt blandas ut i vattnet. Detta sker med hjälp av omrörare. I den första bassängen sker omrörningen snabbt för att fördela fällningskemikalien. Det börjar redan nu bildas små flockar med hjälp av fällningskemikalien.

Bildandet av flockar går till enligt följande: nästan alla partiklar i vattnet är negativt laddade medan järnklorid är positivt laddad. De små partiklarna i vattnet binds då till järnkloriden och det bildas flockar som lättare sedimenterar [5].

I den andra omrörningsbassängen är varvtalet på omröraren lägre än i den första för att inte slå sönder de bildade flockarna. Detsamma gäller för den tredje omröraren där hastigheten på omröraren är ännu lägre.

Vattnet leds från flockningsbassängerna till sedimenteringsbassängerna. I sedimenteringsbassängerna finns lamellplåtar. Dessa har till uppgift att påskynda sedimenteringen. Utan lamellplåtar hade sedimenteringsbassängerna behövt vara mycket större för att flockarna skulle hinna sedimentera och inte följa med utgående vatten. Kemslammet från eftersedimenteringen pumpas tillbaka till försedimenteringen, där den järnklorid som finns kvar i slammet hjälper till att fälla ut flockar.

Avloppsvattnet har nu genomgått både biologisk och kemisk rening. Innan det kan släppas ut till recipienten måste det först genomgå en sista polering. Detta sker i en filteranläggning som består av tolv stycken sandfilter. Små partiklar som följt med vattnet fastnar i sanden när vattnet långsamt filtreras genom sanden. Sandfiltren spolras med jämna mellanrum för att inte sättas igen av föroreningar. Spolvattnet från sandfiltren pumpas tillbaka till kemsteget [6]. Vattnet är nu tillräckligt renat för att släppas ut i recipienten som är Hammarsjön. Detta sker via ett dike som börjar inne på reningsverket.

Slambehandling

När slammet från försedimenteringen, biolinjerna samt ibland även externslam pumpas till förtjockaren har det en låg torrsustans(TS)-halt. I förtjockaren sedimenterar slamfraktionen och vattenfraktionen rinner över ett skibord som är en ränna med små V-formade överfall som löper runt om förtjockaren vid ytan.

Det förtjockade slammet tas ut längst ner i förtjockaren och har nu en TS-halt som brukar ligga kring 2-2,5 %.

Två pumpar som är belägna i källaren på byggnad D, suger ut slammet från förtjockarna och pumpar samtidigt upp slammet till en avvattare. Innan pumparna tillsätts polymer, Man tillsätter polymeren innan pumparna för att den ska hinna blanda ut sig ordentligt innan slammet når avvattaren.

I trumavvattaren roterar en stor trumma som är beklädd med en mycket finmaskig duk. Slammet pumpas in i trummans centrum och meningen är att vattnet ska passera igenom duken, men slammet ska stanna kvar. Polymeren som tillsätts innan avvattaren hjälper till att binda slammet så att inte allt för mycket slam passerar genom duken. När slammet passerat genom hela trumman faller det med självfall ner i ett rör som är kopplat till en pump. Denna pump pumpar sedan vidare slammet till rötammaren.

Det rejektvatten som avskiljs i trumavvattaren leds till försedimenteringen.

Efter trumavvattaren håller slammet en TS-halt på ca 6 % innan det pumpas vidare till rötammarenläggningen.

I rötammarna rötas slammet vid ca 36°C, och man får en så kallad stabilisering av slammet. Med stabilisering menas att det mesta organiska materialet bryts ner och efter stabiliseringen är det återstående organiska materialet i sådan form att ytterligare biologisk aktivitet sker väldigt långsamt. Ett stabiliserat slam luktar till skillnad från ickestabiliserat slam väldigt lite [7].

Det rötade slammet tappas ut från rötammarna till en avgasningsbassäng. I avgasningsbassängen luftas det rötade slammet för att bli av med eventuell gas, som annars kan bildas i rören på slammets väg till slutavvattning.

Det rötade slammet pumpas från avgasningsbassängen till ett slamlager i väntan på avvattning.

Från slamlagret pumpas slammet till en centrifug som är av typen dekantercentrifug. Dekantercentrifugen har en cylindrisk trumma med en konisk ända och roterar med ett högt varvtal. En skruvtransportör roterar i samma riktning som trumman, fast med en något lägre hastighet. När slammet pumpas in i centrum av trumman trycks det ut mot trummans vägg, medan vattnet som har en något lägre vikt än torrsustansen i slammet samlas nära centrum av trumman och leds ut som rejektvatten. Det avvattnade slammet matas ut med hjälp av skruvtransportören till den smalare änden av trumman och slungas ut genom hål i trumman. Man doserar också polymer till slammet innan det når centrifugen för att få en bättre avvattning. Rejektvattnet från centrifugen leds med kemslammet till försedimenteringen.

Det avvattnade slammet som slungas ut från centrifugen har en TS-halt på mellan 18 – 20 %. Under centrifugen finns en skruvtransportör som transporterar slammet upp till en slamsilo där slammet lagras tills en lastbil kommer och hämtar slammet med jämna mellanrum. Slammet transporteras för närvarande till Ystad, där det används som jordförbättring till bland annat vägbyggen.

Rötkammaranläggningen

På centrala reningsverket finns tre rötkammare som drivs i serie. Rötkammare 1 och 2 rymmer 2500m³ och rötkammare 3 rymmer 1000m³.

Det avvattnade så kallade råslammet från råslamsförtjockaren, pumpas först igenom en värmeväxlare som är av typ tubvärmeväxlare. Här värms slammet upp till ca 36 C° innan det når rötkammare 1.

Vattentemperaturen till värmeväxlaren är ca 80 C° in, och 64 C° ut.

I rötkammare 1 rötas slammet vid 35 – 37 C° mesofil rötning. Omrörning sker med en toppmonterad mekanisk propelleromrörare.

En mekanisk ytomrörare finns också, men är för tillfället bortplockad för reparation vilket har gjort att problemen med skumning i rötkammaren har ökat.

För att hålla temperaturen i rötkammaren på önskvärd temperatur, cirkulerar man slammet genom en andra tubvärmeväxlare som är av samma typ som för inkommande råslam.

Från rötkammare 1 pumpas man slam till rötkammare 2. I rötkammare 2 sker omrörning med så kallad gasomrörning. En gaskompressor blåser in gas i rör som mynnar ut i botten på rötkammaren. Driftintervallet för gaskompressorn är 10min drift och 100min stillastånd, vilket motsvarar ca 2,4 h/d.

Röttningsprocessen är i övrigt den samma som i rötkammare 1.

Slammet från rötkammare 2 pumpas till rötkammare 3 där ingen omrörning sker. Denna rötkammare är den sista och har egentligen ingen annan funktion än att ytterligare ta tillvara på den gas som finns kvar i slammet.

Från rötkammare 3 pumpas man ut slammet till en avgasningsbassäng. Detta sker i intervaller efter en nivågivare i rötkammaren.

Den sammanlagda uppehållstiden i rötkastrarna ligger på ca 32 dygn och TS-halten i slammet efter rötkastrarna ligger på ca 2,3 %.

Uppvärmningen av slammet sker med hjälp av värmeväxlare. En stor del av den gas som produceras används för att värma upp slammet samt att hålla en önskvärd temperatur på detta. Uppvärmningen av det vatten som cirkulerar i värmeväxlarna åstadkoms av 3 gaspannor, som finns i källaren på den byggnad där kontrollrummet finns.

De 3 gaspannorna håller en ungefärlig drifttemperatur på ca 140 °C. Cirkulationsvattnet håller en temperatur av ca 80°C när det lämnar pannan på sin väg mot värmeväxlarna. Panna 1 och 2 är rena gaspannor, medan panna 3 även kan eldas med olja.

Gaspannorna förser inte enbart rötkastrarna med värme, utan de ingår i ett fjärrvärmesystem som värmer upp de flesta byggnader på reningsverket.

Rötningsprocessen

Rötning är en anaerob process, det vill säga att processen måste vara helt fri från syre, annars fungerar den inte. Den process man idag använder sig av på centrala reningsverket är mesofil rötning, vilket betyder att man håller temperaturen i rötkammaren runt 36 C°.

Vid denna temperatur trivs de mesofila bakterierna som bäst. Det gäller att hålla en så stabil temperatur som möjligt för att optimera levnadsförhållandena för bakterierna. Skulle det bli för varmt så kan bakterierna dö och då kan det ta lång tid innan man får igång processen igen.

Den anaeroba nedbrytningen sker i 4 steg:

Det första steget är att en nedbrytning av sammansatta organiska ämnen bryts ner till enklare vattenlösliga föreningar med hjälp av enzymer, så kallad enzymatisk nedbrytning.

I det andra steget som kallas syrabildning, bryts glykos mm ner till enklare fettsyror och alkoholer med hjälp av syrabildande bakterier. De enklare fettsyrorna och alkoholerna bryts i det tredje steget ner av ättiksyra och vätgasproducerande bakterier. Det bildas även koldioxid i detta steg. I det fjärde steget bryts ättiksyran ner till metangas och koldioxid. Vätgas och koldioxid bryts ner till metangas och vatten [7].

Denna process sker kontinuerligt i rötkammaren och följer inte ett visst steg vid en viss tidpunkt utan alla steg sker samtidigt.

Det viktigaste att tänka på är att hålla en jämn temperatur, en god omrörning och att pH-värdet ligger på en neutral nivå. Mesofil rötning är en stabilisering av slammet, med stabilisering menas att man till viss del avdödar patogena bakterier och virus, samt att man blir av med den värsta lukten från slammet. Vissa bakterier så som salmonella avdödas dock inte, likaså parasitägg avdödas inte med mesofil rötning.

Uppehållstiden för slammet vid mesofil rötning är ganska lång, minst 20 dygn, på centrala reningsverket ca 32 dygn.

Den termofila rötningsprocessen skiljer sig inte så mycket ifrån den mesofila, men det finns vissa skillnader i både process och drift.

Vid termofil rötning har man höjt temperaturen i rötkammaren till ca 55 C°, vilket ungefär är den temperatur där de termofila bakterierna trivs som bäst. Det finns en mängd fördelar samt nackdelar med termofil rötning.

I teorin får man en högre nedbrytning av organiskt material, vilket resulterar i en högre gasproduktion.

Kortare uppehållstid gör att man kan belasta rötkammaren med mer slam. Problemen med skumbildning minskar eftersom långtrådiga filamentbildande bakterier till viss del avdödas vid termofil rötning. En sänkt viskositet ger bättre förutsättningar för god omrörning. Vid termofil rötning får man en hygienisering av slammet eftersom salmonellabakterier och parasitägg avdödas vid termofil rötning.

Termofil rötning kräver en högre temperatur, vilket medför högre energiåtgång och ökade kostnader. Det kan bli problem med att värmeväxlarna inte riktigt räcker till för att värma upp slammet till 55 C°.

Hygieniseringskrav

Enligt de preliminära reglerna för certifiering av slam som Svenskt vatten ligger bakom, krävs det en hygienisering av slammet. Slammet ska vara behandlat med en accepterad metod, och förklarad salmonellafritt innan det kan levereras till jordbruket. En rad metoder kan användas för detta, bland annat termofil rötning, långtidslagring, kalkning och pastörisering.

Före användning på jordbruk ska allt slam kontrolleras för salmonella oavsett vilken hygieniseringsmetod man använder. Som krav för hygienisering vid termofil rötning ställs att slammet måste ha en uppehållstid inne i rötammaren på minst 2 timmar. Under denna tid får inget slam vare sig tas in eller ut ur rötammaren [2].

Detta betyder att satsvis in och utpumpning av slam krävs för rötammarna.

Termofil rötning av slammet anses vara den mest troliga metoden för hygienisering av slam på centrala reningsverket.

Material och metod

Värmebehov för uppvärmning av slammet

Man kan med en enkel ekvation räkna ut det ungefärliga värmebehovet för uppvärmning av slam. Värmebehovet för uppvärmning av inkommande slam kan beräknas enligt följande ekvation: [8].

$$E_{in} = Q_{in} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Där E_{in} = tillförd värme (kWh/d)

Q_{in} = inkommande slamflöde (m^3/d)

ρ = slammets densitet (kg/m^3)

c_p = specifik värmekapacitet (kWh/kg, °C)

ΔT = temperaturskillnaden mellan råslammets temperatur och önskad röt-kammartemperatur

Specifik värmekapacitet c_p

Eller "entalpitet" beskriver hur många kJ/kg,K det går åt för att värma upp slammet. Där kJ står för kilojoule, och K för kelvin som motsvarar 1 °C. Eftersom avloppsslam till ca 95% består av vatten kan man sätta c_p till 0,00116 kWh/kg,K [9].

Nuvarande värmebehov för uppvärmning av slammet

Det inkommande slamflödet som medeltal för ett år (2007) är 58232 m^3 (se Tabell 1). Slammets densitet kan som ett närmevärde sättas till 998 kg/m^3 på grund av dess stora innehåll av vatten [9].

Temperaturskillnaden mellan råslammets temperatur och önskad röt-kammartemperatur " ΔT " är för anläggningen i Kristianstad svår att få ett riktigt värde på. Eftersom det inte finns någon temperaturgivare som registrerar temperaturen för det slam som går in i röt-kammaren. Önskad röt-kammartemperatur är det dock lättare att ange även om denna också skiftar, men 36 °C är en bra temperatur vid mesofil rötning och kan anses vara det börvärde som röt-kammartemperaturen ligger på vid anläggningen i Kristianstad.

För att få en uppfattning om slammets temperatur efter avvattning i trumavvattaren, på dess väg till röt-kammaren, kan man titta på inkommande vattentemperatur. (se Tabell 1.) Inkommande avloppsvatten till reningsverket håller en ganska hög temperatur, beroende på hushållens användning av vattnet. Ett årsmedelvärde på 16,1 °C är betydligt högre än årsmedeltemperaturen för uteluften. Dock får man anta att vattnet, och för den del även slammet, under stora delar av året kyls av i efterföljande reningssteg.

Hur mycket vattnet/slammet kyls av är svårt att uppskatta. Men om årsmedeltemperaturen för uteluft ligger på 9,1 °C och uppehållstiden för vattnet/slammet i anläggningen är flera dygn, kan ett antagande om att värmeförlusterna i vattnet/slammet är 3 °C vara berättigat. Temperaturen på inkommande råslam till röt-kammaranläggningen antas vara 13 °C i årsmedelvärde. ΔT antas då vara $(36 - 13) = 23$ °C.

$$E_{in} = 58232 \cdot 998 \cdot 0,00116 \cdot 23$$

Det nuvarande värmebehovet för uppvärmning av slammet in till röt-kammaren är enligt ovanstående ekvation 1 550 523 kWh/år. Avrundat till tusental: ca 1 551 000 kWh/år.

Det ska dock anmärkas att det i denna ekvation ej tas hänsyn till att man värmer upp inkommande röt-slam med utgående röt-slam i en värmeväxlare. Uppvärmningsbehovet av inkommande röt-slam blir då väsentligt lägre.

Tabell 1.

2007				
Månad	Ink råslam till röt-kammare m³	Dygns medel temperatur i medeltal/månad C°	Flöde till gaspannor m³	Ink vattentemperatur medeltal/månad C°
Januari	4 703,5	3,9	55 835,4	13,2
Februari	4 619,9	0,9	54 438,2	12,6
Mars	5 343,2	5,5	53 577,4	13,0
April	6 232,7	8,3	47 330,8	15,3
Maj	4 338,7	12,5	33 709,2	17,4
Juni	5 152,8	16,9	29 238,5	19,3
Juli	4 774,7	16,2	28 492,4	17,8
Augusti	4 242,9	17,0	26 464,3	19,4
September	4 414,1	12,8	27 087,9	19,1
Oktober	5 531,0	7,8	43 428,7	16,5*
November	4 589,6	3,9	46 734,7	15,0*
December	4 288,8	3,1	54 546,2	14,8
Summa	58 232		500 884	
Medeltemp		9,1		16,1

* Uppskattat värde.

Värmebehov för uppvärmning av slam till termofil rötning

Vid termofil rötning rötar man slammet vid ca 55 °C, vilket höjer ΔT till $(55 - 13) = 42$ °C. Inkommande slamflöde, densitet och specifik värmekapacitet förblir desamma som för nuvarande mesofil rötning.

$$E_{in} = 58232 \cdot 998 \cdot 0,00116 \cdot 42$$

Värmebehovet för uppvärmning av slammet till 55 °C. Är enligt ovanstående ekvation 2 831 389 kWh/år. Avrundat till tusental: ca 2 831 000 kWh/å

Värmeförluster i rötkamrarna

En rökammarens värmeförluster är i hög grad beroende av dess isolering. De två rötkamrarna på CRV är byggda i början av 70-talet då priset på olja och gas var lågt. Någon efterfrågan på biogas var det inte tal om och gasen som producerades i anläggningen täckte behovet till uppvärmning av råslam och övriga byggnader. Detta kan vara en anledning till att rötkamrarna aldrig isolerades.

För att ta reda på vilka värmeförluster man har i rötkamrarna kan man använda följande ekvation: [8].

$$E_k = 24h/d \cdot A \cdot U \cdot (T_k - T_0)$$

Där

E_k = tillförd värme (Wh/d)

A = rökammarytan (m^2)

U = värmegenomgångskonstanten ($W/m^2, ^\circ C$)

T_k = rökammartemperatur ($^\circ C$)

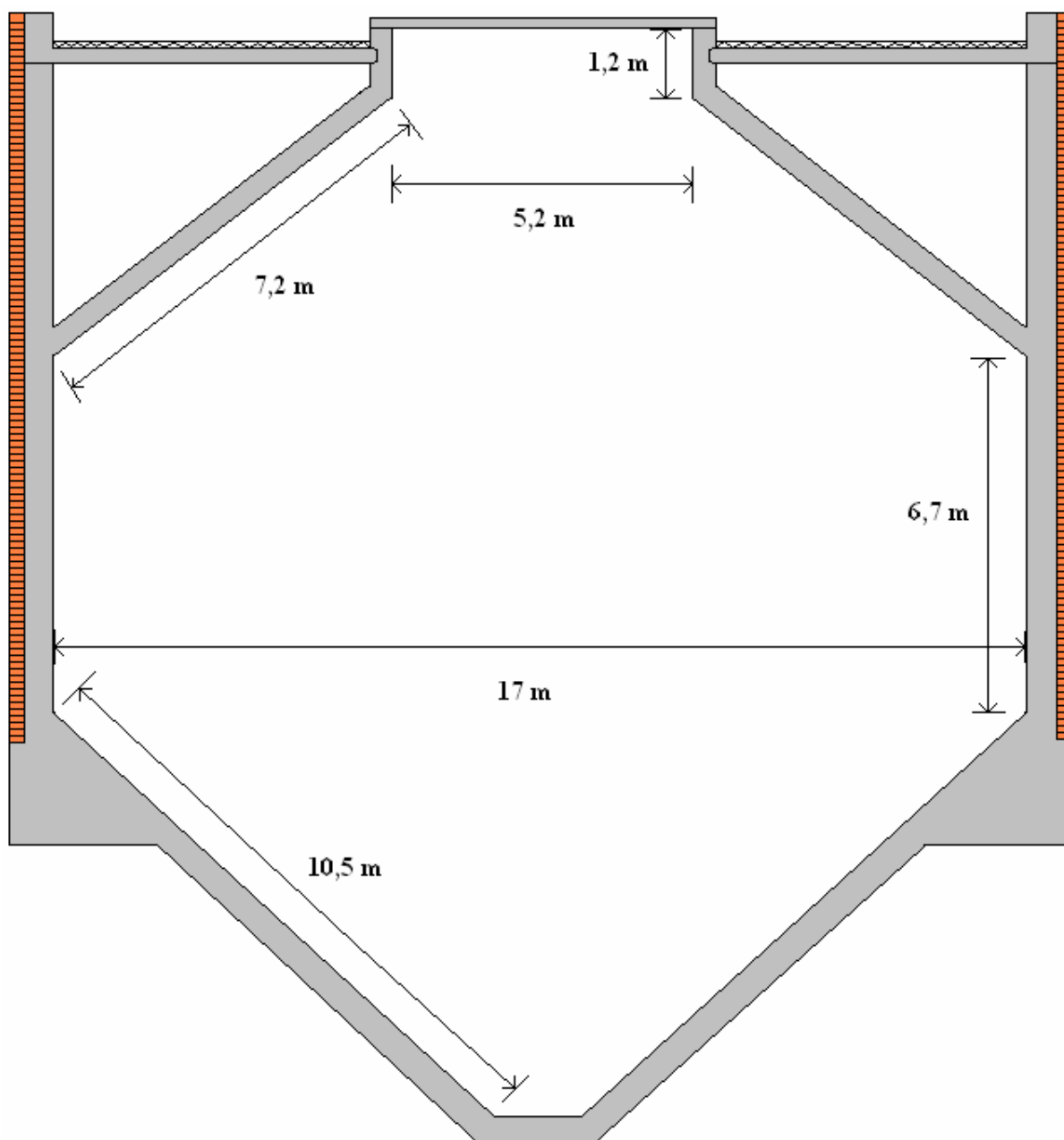
T_0 = omgivningstemperatur ($^\circ C$)

(Fullständiga uträkningar av värmeförluster i bilaga 3)

Rökammarens mantelarea

Den rökammaryta eller mantelarea man vill få fram till ekvationen är den yta av rökammaren som slammet ligger an. Därför måste man först ta reda på rökammarens höjd och radie. Enligt profilritningen (se Figur 1) av en av rötkamrarna på CRV är rökammarens inre radie 8 500 mm och dess inre höjd 19 000 mm. Dock är det inte helt så enkelt att räkna ut rökammarens yta då den är konad både uppe och nertill, men med hjälp av matematiska formler, så som formeln för mantelarean av rak cirkulär kon [10], och genom att få ut uppgifter om längder från ritningar av rökammaranläggningen, får man fram en mantelarea för rökammaren. (Se Bilaga 1 för beräkningar)

Enligt beräkningarna i Bilaga 1 så är mantelarean för en rökammare $908m^2$. Eftersom det är två rökammare som båda ska hålla en jämn temperatur, så ska båda rötkamrarna räknas till mantelarean. Den sammanlagda mantelarean blir då $1816m^2$.



Figur 1. Profilskiss och mått av en rötkammare på CRV.

Värmegenomgångskoefficienten

Värmegenomgångskoefficienten ”U-värdet” är beroende av materialets värmeledningstal och tjocklek. (Se Tabell 2)

Värmeledningstalet mäts i $W/m, ^\circ C$ och beskriver hur stor effekt i W som leds genom 1 meter av materialet vid en temperaturskillnad på $1 ^\circ C$. W motsvarar här den värme som leds genom materialet.

Värmegenomgångskoefficienten ”U-värdet” talar om hur många W per m^2 som materialet släpper igenom vid en temperaturskillnad av $1 ^\circ C$.

Tabell 2. Värmeledningstal [11].

Material	Tjocklek	Värmeledningstal	U-värde
	mm	$W/m, ^\circ C$	$W/m^2, ^\circ C$
Betong	500	1,70	3,40
Tegel	250	0,60	2,40
Mineralull	150	0,035	0,23

Rötkamrarna på CRV är av betong och är klädda med tegel. Betongens tjocklek varierar dock något. Längs dess sidor och i botten är betongen ca 500mm tjock, och uppe vid konan är den ca 400mm tjock. Svårigheten med att beräkna en exakt värmegenomgångskoefficient, är att både materialet och dess tjocklek skiftar i rötkamrarna. Se Figur 1.

Enligt beräkningar av värmegenomgångskoefficienten (se Bilaga 2) för rötkamrarna vid en tjocklek på betongen av 500mm och en tjocklek på teglet av 250mm fås en värmegenomgångskoefficient på $1,4 W/m^2, ^\circ C$.

Det finns dock ett stort problem med att räkna ut den faktiska värmegenomgångskoefficienten. Eftersom rötammaren skjuter ner med botten flera meter ner i marken, med 500mm betong som skyddande material. (Se figur 1) borde värmegenomgångskoefficienten bli högre längs denna del av rötammaren. Dock kan marken tänkas lagra mycket av den värme som försvinner ut från rötammarens botten samt att rötammaren här också är skyddad från kylande vind. Därför bör den uträknade värmegenomgångskoefficienten på $1,4 W/m^2, ^\circ C$ gå att använda som ett medelvärde för hela rötammaren.

Nuvarande värmeförluster

Vid nuvarande mesofil rötning är rötammartemperaturen ca $36 ^\circ C$. Omgivningstemperaturen fås genom årsmedeltemperaturen för 2007. Se Tabell 1.

$$E_k = 24h/d \cdot A \cdot U \cdot (T_k - T_0) = 24 \cdot 1816 \cdot 1,4 \cdot (36 - 9,1) = 1\,641\,373 \text{ Wh/d.}$$

För 1 år är värmeförlusterna $(365 \cdot 1\,641\,373) 599\,100\,000 \text{ Wh} = 599\,000 \text{ kWh}$.

Isolering av rötkamrarna

Vid en eventuell övergång till termofil rötning ser man på CRV det som självklart att man måste isolera de båda rötkamrarna. Värmeförlusterna från rötkamrarna vid termofil drift skulle bli alltför stora. Det kanske till och med inte skulle gå att få upp rötkamrarna till en temperatur av 55 °C på grund av de stora värmeförlusterna.

Vid isolering av rötkamrarna är en yttre isolering i form av att man klär in rötkamrarna med isolering och fasadplåt trolig. Låt säga att man klär in rötkamrarna med ett 150mm tjockt lager av mineralull. Den sammanlagda värmegenomgångskoefficienten för betong, tegel, och mineralull blir då 0,2W/m²,°C (se beräkningar i Bilaga 2).

Det är dock inte troligt att den faktiska värmegenomgångskoefficienten blir så låg vid isolering eftersom botten på de båda rötkamrarna inte går att isolera, samt att den skyddande isoleringen inte kommer att vara det material som ligger närmast rötkammaren. Det är ju en större area innanför isoleringen än den area som slammet ligger an.

Rötkammare för svenska förhållanden bör isoleras så att värmegenomgångskoefficienten som ett medelvärde för hela rötkammaren ligger under 0,5 W/m²,°C [11]. Vid isolering av de båda rötkamrarna på CRV bör en faktisk värmegenomgångskoefficient på 0,4 W/m²,°C gå att anta.

Gasproduktion

Den totala gasproduktionen för 2007 är enligt siffror hämtade från CRV ca 995 100 m³. Av dessa 995 100 m³ fördelades gasproduktionen på följande sätt:

Tabell 3. Fördelning av producerad gas 2007.

Till gaspannor	Till uppgraderingsanläggning	Till fackla
500 884 m ³	421 791 m ³	72 425 m ³

För att få en uppfattning om hur mycket energi den totala gasproduktionen motsvarar, får man se på rötgasens värmevärde. Värmevärdet för rötgas är 0,007 Mwh/m³ [13]. Detta motsvarar 7 kWh/ m³ rötgas.

Den sammanlagda rötgasproduktionen för 2007 uppgår då till ca 6 966 000 kWh.

Med en ökad utröttningsgrad av slammet vid termofil rötning, bör en högre gasproduktion också kunna erhållas [14]. Hur mycket högre denna gasproduktion skulle kunna bli är svårt att fastställa eftersom det inte finns några tillförlitliga siffror på detta.

Men för att få en uppfattning på hur mycket en eventuell ökning av gasproduktionen skulle påverka resultatet, i form av energibesparingar kommer detta att nämnas i diskussionen.

Resultat

De sammanslagna resultaten från de förluster för uppvärmning och värmeförluster från röt kamrarna visas i Tabell 4. Den totala gasproduktionen omräknad till kWh visas också.

Tabell 4. Energiproduktion samt förluster vid olika drift av röt kammaranläggningen

Drift	Uppvärmning kWh	Värmeförlust kWh	Gasproduktion kWh	Behållen energi kWh
Oisolerad mesofil	1 551 000	599 000	6 966 000	4 816 000
Isolerad mesofil	1 551 000	171 000	6 966 000	5 244 000
Oisolerad termofil	2 831 000	1 023 000	6 966 000*	3 112 000
Isolerad termofil	2 831 000	292 000	6 966 000*	3 843 000

* Gasproduktionen vid termofil rötning kan komma att bli högre.

Nedan visas den kostnad/förlust i sek för olika driftbetingelser för röt kammaranläggningen. Elpriset är baserat på rörligt elpris från Eon, inklusive moms och energiskatt [15]. Den energivinst/förlust som visas i tabellen nedan är skillnaden mellan dagens energiöverskott och det för olika driftbetingelser.

Tabell 5. Energivinst/förlust i sek.

Drift	Energivinst/förlust kWh	Elpris Öre/kWh	Energivinst/förlust SEK
Oisolerad mesofil	0	95,44	0
Isolerad mesofil	+ 428 000	95,44	+ 408 000
Oisolerad termofil	- 1 704 000	95,44	- 1 626 000
Isolerad termofil	- 973 000	95,44	- 929 000

Diskussion

Resultatet visar att den mest ekonomiska åtgärden vore att behålla dagens drift och enbart isolera rötkamrarna. Genom att isolera rötkamrarna så gör man en besparing av ca 408 000 SEK per år. Beloppet är inte riktigt rättvisande då man idag inte har någon möjlighet att omvandla den sparade energin till elektricitet, men det ger en uppfattning av hur mycket värmeförlusterna är i sek. De resultat jag kommit fram till är baserade på 2007 års siffror och ska ses som en riktvisare vid beslut om åtgärder för rötkammaranläggningen.

På C4-teknik vill man gå över till termofil rötning för att få en hygienisering av slammet och på sikt delta i att uppnå miljömålet om återföring av växtnäring. Därför är mindre öknings av energibehovet till rötkammaranläggningen av ringa betydelse. Men inför kommande beslut om utformningen av rötkammaranläggningen kan denna rapport tjäna som underlag för att minimera energibehovet.

Vid starten av detta arbete, hade jag uppfattningen att en termofil drift av anläggningen skulle vara den mest fördelaktiga ur energisynpunkt, under förutsättning att rötkammaranläggningen blev isolerad. Jag hade även uppfattningen om att gasproduktionen skulle öka betydligt vid en övergång till termofil rötning. Men efter att ha studerat den litteratur som finns på området hittade jag inget som talade för hur mycket gasproduktionen skulle öka. Däremot finns det mycket som talar för att den skulle öka. Det kan dock vara vanskligt att gissa sig till att det kommer att ske en ökning av gasproduktionen vid termofil rötning. Eftersom man inte vet hur stor ökningen blir kan man inte utgå från att den blir betydande.

Men om vi tillåter oss att anta att en ökning av gasproduktionen vid termofil rötning uppgår till 10 %, skulle gasproduktionen för termofil rötning baserad på 2007 års totala gasproduktion ligga på $(6\,966\,000 \cdot 1,1) = 7\,663\,000$ kWh. Efter förluster för uppvärmning av slam och värmeförluster i rötkamrarna blir det $(7\,663\,000 - (2\,831\,000 + 292\,000)) = 4\,540\,000$ kWh i behållen energi för isolerade rötkammare och termofil rötning. Jämför man detta med dagens behållna energi, skiljer det $(4\,816\,000 - 4\,540\,000) = 276\,000$ kWh. Detta betyder att det krävs en ökning av gasproduktionen på över 10 % för att nå upp till dagens behållna energi.

En ökning av 14 % av gasproduktionen för termofil drift och isolerade rötkammare ger $(6\,966\,000 \cdot 1,14) = 7\,941\,000$ kWh. Efter förluster får man en behållen energi på $(7\,941\,000 - (2\,831\,000 + 292\,000)) = 4\,818\,000$ kWh. Detta är likvärdigt med dagens behållna energi som ligger på 4 816 000 kWh. Det krävs alltså en 14 % ökning av gasproduktionen för att nå upp i samma behållna energi som idag.

Det krävs således en ökning av gasproduktionen på 14 % vid termofil drift av rötkammaranläggningen, för att det ur energisynpunkt ska vara försvarbart med en övergång. Men där kan finnas fler energivinster med termofil rötning än bara gasproduktionen. Får man en ökad gasproduktion vid termofil rötning så innebär detta också en större utrotningsgrad. Med en större utrotningsgrad av slammet så borde slammängden från rötkamrarna minska. Vilket torde resultera i att man får mindre slam som måste avvattnas, vilket i sin tur resulterar i minskad energi och polymeråtgång vid avvattning av slammet.

Det ska nämnas att resultatet i denna rapport är baserad på att uppvärmningen av slammet sker på samma sätt som idag. Man har under ett par år innehaft en slam/slam värmeväxlare som står i källaren på rötchammare 1. Denna värmeväxlare har dock aldrig riktigt fungerat och används idag inte. Värmeväxlarens funktion är att den ska förvärma det inkommande slammet till rötchammarna med utgående slam. Skulle man få denna värmeväxlare att fungera eller att man ersätter den med en liknande, skulle uppvärmningsbehovet minska drastiskt. Jag har själv diskuterat detta med Göran Johansson, arbetsledare på CRV och han anser att en värmeväxlare för att ta tillvara på den värme som finns i utgående slam, är en förutsättning för en övergång till termofil rötning.

Därför behöver inte värmebehovet bli större vid en övergång. Tvärtom kan en övergång till termofil rötning innebära investeringar i form av värmeväxlare för utnyttjande av värmen i utgående slam, samt i isolering av rötchammarna. Detta skulle troligen minska energibehovet snarare än öka det.

Vad gäller gasproduktionen, är denna väldigt beroende av en god omrörning. Toppmonterad propelleromrörare är en vanlig form av omrörare för rötchammare och används på CRV idag. Det finns dock många som menar att denna typ av omrörare är otillräcklig och rör mest om i centrum av rötchammaren. Det finns idag andra metoder för omrörning i rötchammare. En metod är att man med hjälp av pumpar sprutar ut slammet ur munstycken som sitter fast monterade inuti rötchammaren. På detta vis slipper man bekymret med att ha rörliga mekaniska delar inuti rötchammaren samtidigt som man får en bättre omrörning.

Slutsats

Bestämmer man sig för att övergå till termofil rötning krävs det att man utnyttjar värmen i utgående slam för uppvärmning av ingående slam, annars får man ett allt för högt energibehov för uppvärmning av slammet.

Det första man bör göra innan en övergång till termofil rötning, är att isolera rötchammarna, även med dagens mesofila rötning försvinner en stor del värme ut från rötchammarna och vid termofil rötning ännu mer.

Om man inte investerar i en värmeväxlare för att ta tillvara på energin i utgående slam krävs en ökning av gasproduktionen på ca 14 % för att ligga på samma energibehov som idag, under förutsättning att rötchammarna blir isolerade. Men det långsiktigt ökande behovet av biogas gör det nästan nödvändigt att man utnyttjar värmen i utgående slam för att minska den interna konsumtionen av rötgas.

Uppfyller man dessa kriterier så är jag övertygad om att en övergång till termofil rötning är bra både ur energi och miljösynpunkt.

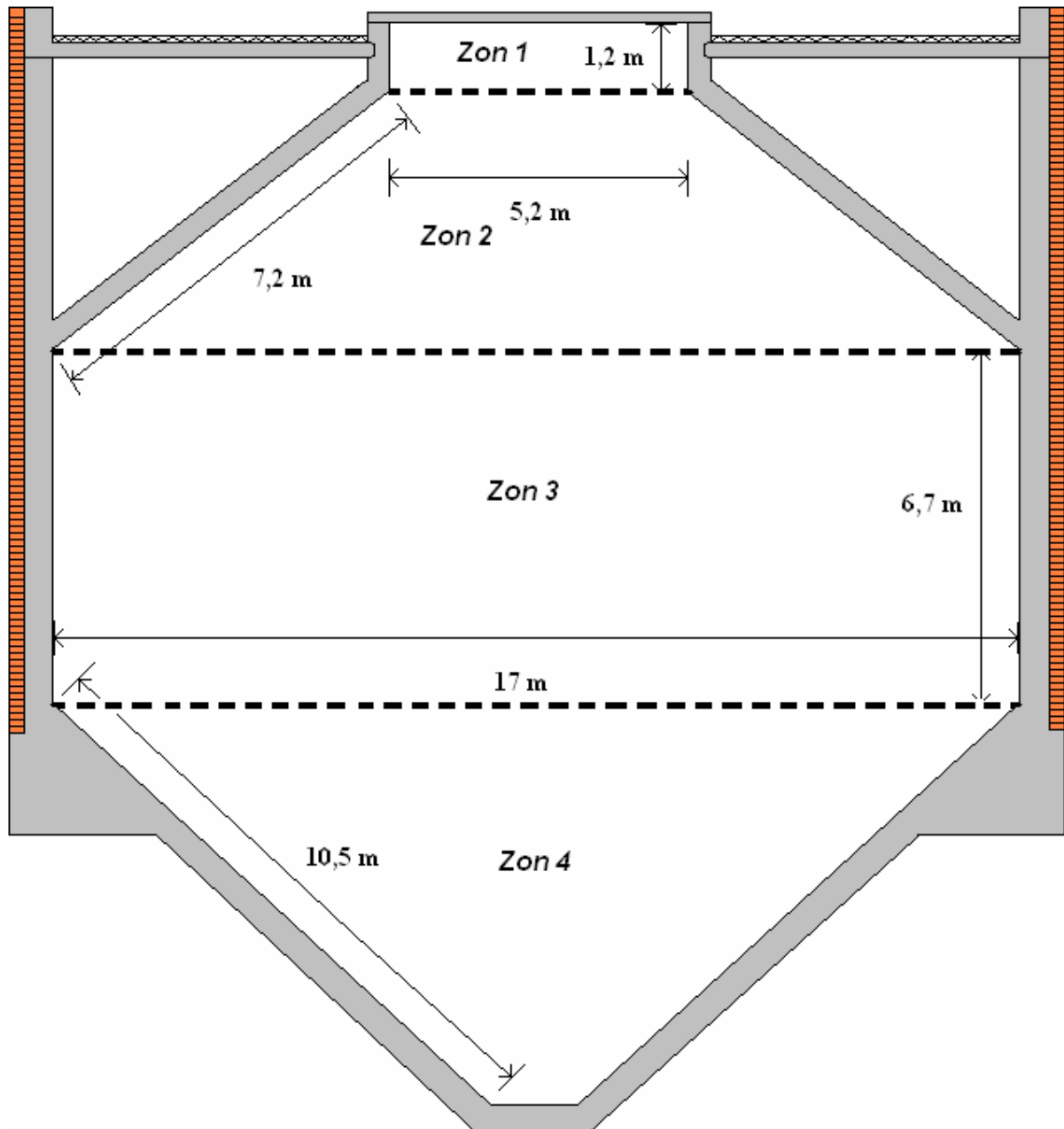
Referenser

- [1] Miljömålsportalen. [www].
(http://www.miljomal.nu/om_miljomalen/miljomalen/mal15.php). Hämtat 2008-05-28
- [2] Svenskt Vatten, 2008, Svenskt Vattens certifieringsregler – Utgåva 1 – 2008-02-21
- [3] Jordbruksverket. [www].
([http://www.sjv.se/annesomraden/stodtilllandsbygden/tvarvillkor/verksamhetskrav/spri
dningavavloppsslam.4.645fd10214dd95b08000186.html](http://www.sjv.se/annesomraden/stodtilllandsbygden/tvarvillkor/verksamhetskrav/spri
dningavavloppsslam.4.645fd10214dd95b08000186.html)). Hämtat 2008-05-28
- [4] Svenska kommunförbundet, 1992, Avloppsteknik, Biologisk rening,
ISBN: 91-7099-197-9
- [5] Kemira Kemwater, 2003, Konsten att rena vatten, ISBN: 91-631-4353-4
- [6] C4-teknik, 2006, Miljörapport 2006, Centrala reningsverket i Kristianstad
- [7] Svenska kommunförbundet, 1989, Avloppsteknik, Slambehandling,
ISBN: 91-7344-814-1
- [8] Starberg K, Karlsson B, Svenskt Vatten AB, 2005, Problem och lösningar vid
processoptimering av rötkamardriften vid avloppsreningsverk
- [9] Börje J, Kjellén, Andersson A-C, Svenskt Vatten AB, 2002, Energihandbok för
avloppsreningsverk, ISBN: 91-89182-58-8
- [10] Ekbohm L, Larsson S, Liber 1997, Tabeller och formler för NV-programmet,
ISBN: 91-47-01022-3
- [11] Ingelstam E, Rönngren R, Sjöberg S, Erik Ingelstam, Rolf Rönngren, Sjöbergs
bokförlag AB, 1993, Handbok för teknisk fysik, fysik och matematik, ISBN: 91-87234-
13-0
- [12] Svenska vatten och avloppsverksföreningen (VAV), 1981, Rötning av kommunalt slam
- [13] Naturvårdsverket, emissionsförluster. [www].
([http://www.naturvardsverket.se/sv/Klimat-i-forandring/Minska-
utslappen/Verktygslada-for-kommuner-och-foretag/Emissionsfaktorer/](http://www.naturvardsverket.se/sv/Klimat-i-forandring/Minska-
utslappen/Verktygslada-for-kommuner-och-foretag/Emissionsfaktorer/)). Hämtat 2008-
05-28
- [14] Nybruket S, Paulsrud B, Svenskt Vatten AB, 2003, Erfaringer med hygienisering av
slam i Norge, ISBN: 91-89182-96-0
- [15] Eon Sverige. [www]. (<http://www.eon.se/templates/InformationPage.aspx?id=11953>).
Hämtat 2008-05-29

bilaga 1

Beräkningar mantelarea

För att räkna ut rökammarens mantelarea delades denna in i 4 zoner enligt figur 1 nedan.



Figur 1.

Mantelarea zon 1.

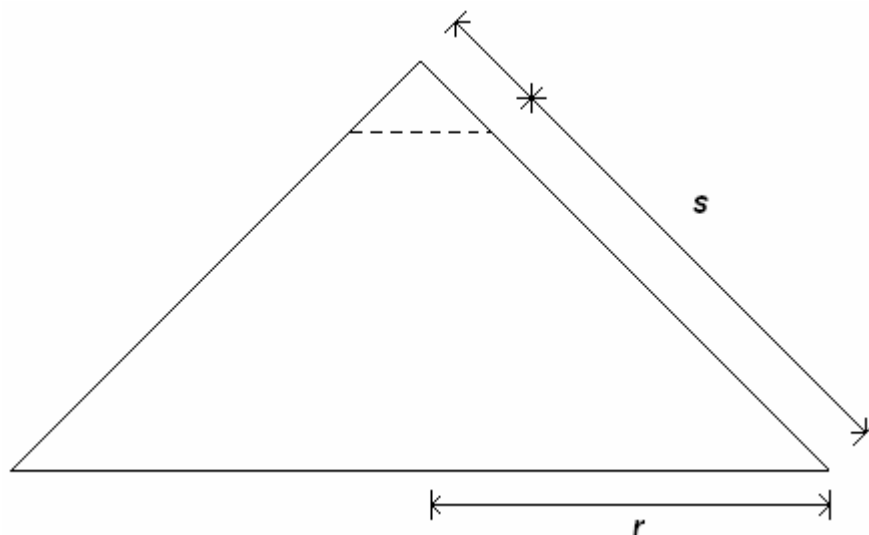
$$\text{Omkrets} = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 2,6 = 16,3\text{m}$$

$$16,3 \cdot h = 16,3 \cdot 1,2 = \mathbf{19,5\text{m}^2}$$

Mantelarea zon 2.

Eftersom denna zon är konad måste man använda ekvationen för rak cirkulär kon $M = \pi \cdot r \cdot s =$ konens mantelarea där r är radien och s är sidolängden [10].

Ekvationen ger oss mantelarean för hela konen, men vår zon är inte en hel kon. Därför måste vi räkna ut hela konens mantelarea och därefter mantelarean för den lilla konen. Se nedanstående figur.



Figur 2.

Den stora konens mantelarea minus den lilla konens mantelarea ger oss mantelarean för zon 2. Eftersom den profilritning jag har använt mig av för att få fram de olika måtten är skalenlig, behövde jag inte räkna ut s för den lilla konen.

$$M = \pi \cdot r \cdot s = \pi \cdot 8,5 \cdot 10,3 = 275\text{m}^2 \text{ för hela konen.}$$

$$M = \pi \cdot r \cdot s = \pi \cdot 2,6 \cdot 3,1 = 25\text{m}^2 \text{ för den lilla konen.}$$

$$275 - 25 = \mathbf{250\text{m}^2}$$

Mantelarea zon 3.

$$\text{Omkrets} = 2 \cdot \Pi \cdot r = 2 \cdot \Pi \cdot 8,5 = 53,4\text{m}$$

$$53,4 \cdot h = 53,4 \cdot 6,7 = \mathbf{358\text{m}^2}$$

Mantelarea zon 4.

$$M = \Pi \cdot r \cdot s \text{ (Se mantelarea zon 2)}$$

$$M = \Pi \cdot r \cdot s = \Pi \cdot 8,5 \cdot 10,5 = \mathbf{280\text{m}^2}$$

$$\text{Sammanlagd mantelarea för de fyra zonerna är } 19,5 + 250 + 358 + 280 = \mathbf{908\text{m}^2}$$

Bilaga 2

Beräkningar U-värden

Värmeledningstal

Betong: 1,7 W/m,°C

Tegel: 0,6 W/m,°C

Tjocklek på rötksammarvägg

Betong: 0,5m

Tegel: 0,25m

U-värde Värmeledningstal/tjocklek

$$\text{Tegel} = 0,6 / 0,25 = 2,4 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$$

$$\text{Betong} = 1,7 / 0,5 = 3,4 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$$

$$\text{Sammanlagt U-värde} = 1 / 2,4 + 1 / 3,4 = 0,71$$

$$1 / 0,71 = \mathbf{1,4 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}}$$

Isolering

Tjocklek: 0,15m

Värmeledningstal: 0,035 W/m,°C

$$\text{U-värde} = 0,035 / 0,15 = 0,233 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}$$

$$\text{Sammanlagt U-värde för betong, tegel och isolering} = 1 / 2,4 + 1 / 3,4 + 1 / 0,233 = 5$$

$$1 / 5 = \mathbf{0,2 \text{ W/m}^2, ^\circ\text{C}}$$

Bilaga 3

Beräkningar värmeförluster

Mesofil oisolerad

$$E_k = 24\text{h/d} \cdot A \cdot U \cdot (T_k - T_0) = 24 \cdot 1816 \cdot 1,4 \cdot (36 - 9,1) = 1\,641\,373\text{Wh/d.}$$

$$\text{För 1 år är värmeförlusterna } (365 \cdot 1\,641\,373) = 599\,100\,000\text{Wh} = 599\,000\text{kWh}$$

Mesofil isolerad

$$E_k = 24\text{h/d} \cdot A \cdot U \cdot (T_k - T_0) = 24 \cdot 1816 \cdot 0,4 \cdot (36 - 9,1) = 468\,964\text{Wh/d.}$$

$$\text{För 1 år är värmeförlusterna } (365 \cdot 468\,964) = 171\,000\,000\text{Wh} = 171\,000\text{kWh}$$

Termofil oisolerad

$$E_k = 24\text{h/d} \cdot A \cdot U \cdot (T_k - T_0) = 24 \cdot 1816 \cdot 1,4 \cdot (55 - 9,1) = 2\,800\,700\text{Wh/d.}$$

$$\text{För 1 år är värmeförlusterna } (365 \cdot 2\,800\,700) = 1\,023\,000\,000 = 1\,023\,000\text{kWh}$$

Termofil isolerad

$$E_k = 24\text{h/d} \cdot A \cdot U \cdot (T_k - T_0) = 24 \cdot 1816 \cdot 0,4 \cdot (55 - 9,1) = 800\,202\text{Wh/d.}$$

$$\text{För 1 år är värmeförlusterna } (365 \cdot 800\,202) = 292\,000\,000 = 292\,000\text{kWh}$$