KUNSKAP FÖR LANDETS FRAMTID

Hushållnings sällskapet

Åtgärder mot metanemissioner från lagring av rötrest

Delrapport från ”Utvärdering av biogasanläggningar på gårdsnivå – uppföljning av teknik och metanemissionsfrågor”

Maria Berglund
2015
Hushållningssällskapet Halland

Europeiska jordbruksfonden för landsbygdsutveckling: Europa investerar i landsbygdsområden

Förord

Denna rapport är en del av projekt ”Utvärdering av gårdsbaserad biogasproduktion - Uppföljning av teknik och metanemissionsfrågor i etablerade anläggningar” som drevs av Hushållningssällskapet under 2015.

Vi vill tacka Jordbruksverket för att vi fått möjlighet att genomföra projektet och anläggningsägarna för deras engagemang och medverkan i projektet!

Sammanfattning

I denna rapport visar vi hur man kan räkna på olika åtgärder som syftar till att minska metanproduktionen vid lagring av rötrest från gårdsbaserade biogasanläggningar. Olika åtgärder hanteras på olika sätt utifrån på vilket sätt de ska minska metanproduktionen och hur de kan beaktas i beräkningsmodellerna.

Metan bildas när organiskt material bryts ner av specialiserade mikroorganismer i syrefria miljöer, som vid lagring av flytande rötrest. Metanproduktionen i rötrestlager påverkas av flera parametrar. Dels handlar det om rötrestens sammansättning; mängd organiskt material (VS) samt det organiska materialets anaeroba nedbrytbarhet som ofta beskrivs med måttet ”maximal metanproduktionspotential” (B_o-värdet). Dels handlar det om lagrets utformning och hur lagringen sker, och då framför allt om temperaturen i lagret samt lagringstiden. Metanproduktionen ökar exponentiellt vid ökad temperatur (gäller normala lagringstemperaturer).

Metanproduktionen i rötrestlager kan beräknas på olika sätt beroende på tillgång på indata och vilka åtgärder som ska belysas. Det finns dynamiska modeller som beräknar metanproduktionen i lagret per tidsenhet utifrån hur temperatur, mängd rötrest och rötrestens sammansättning förändras över tid. Det finns även enklare statiska modeller som beräknar metanproduktionen givet vissa grundantaganden om lagringstid etc. och genomsnittlig temperatur vid lagringen, och där konstanterna i modellen anpassats till dessa givna förutsättningar.

Tre åtgärdsområden har tagits upp i rapporten nämligen: Minska mängden rötrest i lagret genom att sprida fler gånger under odlingssäsongen, Åtgärder för ökad utrötningsgraden samt Temperatur i lagret. Beskrivningarna och beräkningarna inom varje åtgärdsområde har anpassats utifrån vilka frågeställningar som är aktuella inom respektive åtgärdsområden och hur de kan kvantifieras med tillgängliga beräkningsmodeller.

Fler spridningstillfällen per odlingssäsong: Målet är att minska mängden VS i lagret, speciellt under varma perioder när metanproduktionen är som högst per kg VS. Åtgärden kortar även ner den genomsnittliga lagringstiden, och därmed hinner inte lika stor andel av VS brytas ner till metan i lagret. Metanproduktionen i lagret beräknas vecka per vecka och summeras för ett helt år utifrån temperaturen och mängden VS i lagret per vecka samt rötrestens B_o-värde och hur värdet förändras över tid. I grundalternativet antar vi att ett lager fylls på kontinuerligt under ett år och att rötresten sprids runt den 1 april och 1 oktober. Metanproduktionen i lagret blir då högst under sommarmånaderna och tidig höst när temperaturen är hög och/eller mängden rötrest i lagret är stor.

I ett jämförande alternativ med fler spridningstillfällen delas oktobergivan så att hälften sprids med myllningsaggregat vid midsommar och hälften med släpslangspridare runt 1 oktober, allt annat lika. Den stora skillnaden jämfört med grundalternativet är att mängden VS i lagret är mycket lägre efter midsommar tack vare det extra spridningstillfället och att metanproduktionen per vecka därmed blir mycket lägre efter midsommar. Totalt sett beräknas metanproduktionen per år vara en tredjedel lägre tack vare det extra spridningstillfället. Det är en stor minskning med tanke på att man bara ändrat spridningstidpunkten för en dryg femtedel av rötresten som tillförts lagret under året. Notera att effekten av denna åtgärd inte hade gått att beräkna med enklare statiska modeller eftersom de utgår från att rötresten alltid lagras en viss bestämd tid och att temperaturen i lagret är konstant över tid.

Ökat antal spridningstillfällen kan även vara en ekonomiskt intressant åtgärd. Åtgärden kan göras utan investeringskostnader, och de ökade spridningskostnaderna kompenseras av förbättrat kväveutnyttjande.

Ökad utrötningsgrad: Förbättrad utrötningsgrad medför att mängd VS som tillförs i rötrestlagret minskar och att det organiska materialet är mindre benäget att brytas ner till metan (lägre B_o-värde). Metanproduktionen i lagret minskar proportionerligt med minskningen av mängden VS samt B_o-värde.

Temperatur i lagret: Flera gårdsbiogasanläggningar har i sina miljötillstånd fått villkor angående temperaturen, oftast en maxgräns, på rötresten när den lämnar biogasanläggningen eller efterrötkammaren. Syftet är att det ska hålla nere temperaturen i rötrestlagren. Frågan är dock hur stor effekt ett sådant villkor har på temperaturen i lagret och därmed på metanproduktionen i lagret. Det saknas färdiga modeller i litteraturen som beräknar denna effekt. Här ger vi några förslag på hur man skulle kunna resonera kring frågeställningen och göra teoretiska beräkningar.

Temperaturen i lagret påverkas av flera faktorer som mängden rötrest som tillförs i förhållande till mängden rötrest som redan finns i lagret, temperaturen på tillförd rötrest och omgivningens temperatur samt värmeutbytet mellan lagret och omgivningen.

Temperaturen på tillförd rötrest beräknas ha störst betydelse för temperaturen i lagret när det är stora temperaturskillnader mellan omgivningen och tillförd rötrest och/eller när tillförseln av rötrest är stor i förhållande till mängden rötrest som redan finns i lagret. Rötrest från många gårdsbaserade biogasanläggningar lagras dock i stora brunnar relativt den dagliga rötrestproduktionen, vilket beräknas ge ett svagare samband mellan temperatur på tillförd rötrest och temperatur i lagret. Istället kan andra parametrar så som lagringstid, mängd VS och B_o-värde få större betydelse.

Temperaturen i lagret påverkas även av omgivningens temperatur och hur isolerad brunnen är. Temperaturen i en nedgrävd brunn påverkas mer av den tillförda rötrestens temperatur än ett lager som till stor del ligger ovan jord. Det beror på att marken isolerar, vilket minskar värmeförlusterna, och att markens temperatur är mer konstant än lufttemperaturen.

I miljötillståndssammanhang kan det vara lockande att sätta gränsvärden för högsta tillåtna temperatur på rötrest som tillförs ett lager i syfte att minska metanförlusterna från lagret. Villkorets verkliga betydelse för metanförlusterna från lagret är dock svagt och inte entydigt. Räkneexemplen som gjorts i denna rapport visar att temperaturen på tillförd rötrest bara är en av parametrarna som påverkar sluttemperaturen i lagret och att denna påverkan är olika stor beroende på lagret utformning, omgivningens temperatur och rötrestproduktionen.

Andra åtgärder, så som att minimera mängden VS i lagret speciellt under varma perioder eller att förbättra utrötningsgraden, beräknas ha mycket större effekt på metanproduktionen i rötrestlagren, och borde därmed prioriteras. Dessa åtgärder kommer dessutom alltid ha effekt på metanproduktionen i lagret oavsett temperatur eller lagrets utformning och placering.

Innehållsförteckning

Inledning **1**

Metan från lagring av rötrest **2**

Åtgärder för att minska metanavgången från rötrestlager **5**

Minska mängden rötrest i lagret genom att sprida fler gånger under odlingssäsongen 5

Grundalternativet *7*

Fler spridningstillfällen *10*

Jämförelse med flytgödsel *11*

Kostnad för åtgärden *14*

Ökad utrötningsgrad 15

Temperatur i lagret 16

Hur mycket värme tillförs lagret via rötrest? *16*

Värmebalans i ett lager *18*

Slutsatser om temperatur i lagret *23*

Referenser **25**

Inledning

Metanförluster från biogasproduktion är en viktig miljö- och ekonomisk fråga, och det finns behov att kunna bedöma förlusterna på enkla sätt, däribland från lager av rötrest. Ett sätt är att med matematiska modeller uppskatta hur olika åtgärder och produktionsförhållanden påverkar metanemissionerna. Sådana modeller tar t.ex. hänsyn till temperatur, utrötningsgrad och lagringstid. Kostnaderna för åtgärderna kan sedan ställas i relation till undsluppna utsläpp (kr per kg metan).

I denna rapport vill vi med översiktliga beräkningar visa effekten av några möjliga åtgärder för att minska metanförluster från lagring av rötrester. För att kunna göra det beskriver vi först vilka parametrar som styr metanförlusterna från lagring av rötrest och hur dessa parametrar tas med i olika beräkningsmodeller. Därefter beskriver vi olika praktiskt tillämpbara åtgärder för att minska metanförlusterna och hur de skulle kunna kvantifieras med beräkningsmodeller. Vi ger även några räkneexempel per åtgärd.

Målgruppen är rådgivare, tjänstemän och andra som är intresserade av åtgärder för att minska metanemissioner från lagring av rötrest från gårdsbaserad biogasproduktion och framför allt hur dessa åtgärder kan kvantifieras. Det är en fördel om läsaren har vissa förkunskaper om gårdsbaserad biogasproduktion.

Metan från lagring av rötrest

Metan bildas när organiskt material bryts ner av specialiserade mikroorganismer i syrefria (anaeroba) miljöer, t.ex. vid lagring av flytande rötrest.

Metanbildningen påverkas av flera olika parametrar som dels är kopplade till rötrestens egenskaper och dels kopplade till lagrets utformning och hur lagringen sker. Det finns flera mer eller mindre detaljerade beräkningsmodeller som kan användas för att beräkna metanavgången från lagring av stallgödsel eller rötrest utifrån dessa parametrar (se sammanställning i Berglund, 2014). Dels finns det dynamiska modeller som beräknar metanproduktionen i lagret per tidsenhet (t.ex. per dygn eller vecka) utifrån de förändringar som sker i lagret över tid. Sådana förändringar över tid gäller t.ex. hur temperaturen och mängden rötrest i lagret varierar över tid samt hur rötrestens egenskaper ändras i takt med att organiskt material i rötresten bryts ner under lagringen. Dels finns det enklare mer statiska modeller som beräknar metanproduktionen givet vissa grundläggande antaganden, t.ex. givet en viss lagringstid och genomsnittlig temperatur vid lagringen, och där konstanterna i modellen anpassats till dessa givna förutsättningar.

Nedan beskrivs de viktigaste parametrarna som används i dessa beräkningsmodeller samt hur dessa parametrar beaktas i beräkningsmodellerna:

Mängd organiskt material, VS:
Metan bildas vid nedbrytning av det organiska materialet i rötresten. Mängden organiskt material brukar anges som procent av rötrestens vikt (% VS av våtvikt) eller som en mängd (t.ex. ton VS). Det organiska materialet utgör en delmängd av torrsubstansen i rötresten och kan även uttryckas som en andel av rötrestens torrsubstansinnehåll (% VS av torrsubstans, TS). Resten av TS utgörs av aska.

Ofta är det den totala mängden VS i rötresten som avses, men ibland delas VS upp i olika fraktioner, t.ex. lättomsättbart respektive svårnedbrytbart VS, för att spegla att den anaeroba nedbrytningen sker olika snabbt för olika VS-fraktioner. Lättomsättbara kolhydrater, fetter och proteiner bryts ner snabbare än lignin och cellulosa.

I de beräkningsmodeller som påträffats i detta projekt förutsätts det finnas ett linjärt samband mellan mängd VS i rötresten och metanproduktionen från rötresten. Det innebär att ju mer VS det finns i rötrestlagret, desto högre kommer metanproduktion i lagret att bli, allt annat lika. Som tidigare nämnts varierar dock nedbrytningshastigheten bl.a. beroende på proportionerna mellan olika VS-fraktioner i rötresten. Det innebär att den anaeroba nedbrytningen och metanproduktionen är snabbare i rötrest som innehåller relativt mycket fett, protein och lättomsättbara kolhydrater jämfört med rötrest med relativt lågt innehåll av dessa VS-fraktioner. I en modell har VS därför delats upp i en lättomsättbar och en svårnedbrytbar fraktion, där det lättomsättbara VS antas brytas ner 100 gånger snabbare än de svårnedbrytbara fraktionerna (Sommer m.fl., 2004). I den modellen antas att det linjära sambandet mellan metanproduktion och VS gäller för respektive VS-fraktion.

Mängden metan som bildas vid rötning eller vid lagring av rötrest och gödsel brukar anges per enhet organiskt material, t.ex. som liter metan per kg VS rötrest.

Det organiska materialets egenskaper - Maximal metanproduktionspotential (B_o) och nedbrytbarhet:
I biogassammanhang brukar man använda begreppet ”B_o” som benämning på den maximala mängd metan som kan produceras anaerobt från ett visst substrat eller från rötrest. B_o-värdet bestäms genom utrötningsförsök där en känd mängd substrat+ymp eller rötrest rötas under en lång period (kan vara

>100 dagar) till dess metanproduktionen avstannar. Mängden metan som producerats under denna period summeras och jämförs med VS-innehållet i substratet eller rötresten. Resultatet, ofta uttryck som l metan per kg VS, utgör substratets eller rötrestens B_0-värde.

Olika substrat och rötrester har olika B_0-värde. Värdet styrs av det organiska materialets sammansättning. Hög andel lättomsättbart VS ger högt B_0-värde per kg VS, medan hög andel svåromsättbart VS ger lågt B_0-värde. Det beror bl.a. på att de anaeroba mikroorganismerna är bra på att bryta ner de lättomsättbara fraktionerna, medan de svåromsättbara fraktionerna knappt bryts ner anaerobt. Dessutom har VS-fraktionerna olika kemisk sammansättning, vilket styr hur mycket metan som teoretiskt kan produceras per kg VS. Som exempel ger fullständig anaerob nedbrytning av 1 kg fett ungefär dubbelt så mycket metan som nedbrytning av 1 kg protein.

I beräkningsmodellerna antas ett linjärt samband mellan B_0-värdet och metanproduktionen från rötresten. Så ju högre B_0-värde, desto mer metan per kg VS, allt annat lika. De dynamiska modellerna kan dessutom beakta att rötrestens nedbrytbarhet och metanproduktionspotential förändras under lagringen. Om man lagrar en viss mängd rötrest kommer de mest lättomsättbara VS-fraktionerna att brytas ner snabbare än de mer svåromsättbara fraktionerna. Andelen svårnedbrytbart VS kommer därmed att öka över tid i takt med att det mest lättomsättbart VS bryts ner.

Temperatur:
De metanbildande mikroorganismernas aktivitet styrs av omgivningens temperatur. Ju varmare det är desto snabbare går nedbrytningen och desto mer metan hinner mikroorganismerna producera. Detta gäller dock inom normala temperaturintervall för lagring av stallgödsel och rötrest. Vid mycket höga temperaturer avstannar metanbildningen. Metanbildningen avtar också vid mycket låga lagringstemperaturer, men det saknas litteraturuppgifter om det finns någon absolut temperaturgräns för när metanproduktionen upphör. Metanmätningar som gjorts vid lagring av flytgödsel och rötrest i Sverige och andra länder med kalla vintrar tyder på att metanproduktionen är mycket lägre vintertid än sommartid.

Sambandet mellan temperatur och metanproduktion beskrivs ofta med en exponentiell funktion, d.v.s. att metanproduktionen ökar exponentiellt vid ökad temperatur. Det innebär att en grads temperaturhöjning vid låg lagringstemperatur ger lägre ökning av metanproduktionen (l metan per kg VS) än vad denna temperaturhöjning ger vid högre lagringstemperaturer, allt annat lika. Detta samband kan antas gälla vid de lagringstemperaturer som råder under normala svenska förhållanden.

Temperaturen beaktas i alla modeller, men på olika sätt beroende på detaljeringsgrad och datatillgång. I några modeller är det temperaturen i lagret som ska anges. I praktiken är det dock svårt att få tag på rimliga värden på temperaturen i lagret. Därför har många modeller anpassats så att det är lufttemperaturen som ska anges eftersom dessa uppgifter är mer lättillgängliga och tillförlitliga. Temperaturen i lagret kan då beräknas som en funktion av lufttemperaturen, eller så anpassas konstanterna i modellen till lufttemperaturen. En del dynamiska modeller tar dessutom hänsyn till att temperaturen i lagret, eller luften, varierar över året. Metanproduktionen per dag kommer därmed att styras av årstid och plats, allt annat lika. I de enklare modellerna görs beräkningarna för en given temperatur som då ska motsvara medeltemperaturen under lagringsperioden.

Observera att det är temperaturen i lagret som är avgörande för metanproduktionen och som, direkt eller indirekt, beaktas i beräkningsmodellerna. Metanproduktionen i lagren beräknas alltså inte direkt som en funktion av temperaturen på rötresten som tillförs rötrestlagret. Temperaturen på tillförd rötrest har viss betydelse för temperaturen i lagret, men det är bara en av många parametrar påverkar

temperaturen i lagret. Andra viktiga parametrar är omgivningens temperatur, lagrets storlek och dess utformning (t.ex. om lagret är nedgrävt).

Lagringsteknik och rötrestens form:
Avser här t.ex. om det är en fast eller flytande produkt, och egenskaper hos eventuell täckning.

Lagringstekniken och rötrestens form påverkar bl.a. syretillgången i gödseln, och därmed metanbildningen eftersom den bara sker under anaeroba förhållanden. Flytgödsel och flytande rötrest är i princip syrefri, medan det finns förutsättningar för god syretillgången i fasta gödselslag. Metanbildningen i flytgödsel bedöms också vara högre än i fastgödsel. Aerob nedbrytning (d.v.s. kompostering) i t.ex. djupströgödsel höjer temperaturen i gödsel och kan därmed gynna metanbildningen i de syrefria zoner som kan bildas i gödseln.

Täckningens och gödselytans egenskaper påverkar hur stor andel av metanet som bildats i rötresten som sedan når atmosfären. Metan bildas i hela rötrestvolymen och måste passera ytskiktet innan det når atmosfären. I ett poröst ytskikt, t.ex. ett svämtäcke, kan en del av metanet oxideras medan det passerar svämtäcket och metanavgången från ytan blir då lägre än mängden metan som producerats i lagret. Ytskiktet kan alltså inte hindra att metan bildas, men det kan påverka hur stor andel av det bildade metanet som når atmosfären.

I modellerna beaktas lagringstekniken ofta med faktorn MCF, se nedan.

Lagringstid:
Metanbildningen är en relativt långsam process. Så ju längre lagringstid är, desto mer VS hinner mikroorganismerna bryta ner och desto högre blir metanproduktionen. Vid de relativt låga lagringstemperaturerna som råder i Sverige och vid korta lagringstider är det i princip ett linjärt samband mellan metanproduktionen i lagret och lagringstid, allt annat lika. Det innebär att metanproduktionen per tidsenhet i princip är konstant, allt annat lika.

Men vid höga lagringstemperaturer och långa lagringstider kommer nedbrytningshastigheten att avta med tiden i takt med att de mest lättomsättbara VS-fraktionerna bryts ner. Det innebär att metanproduktionen per tidsenhet kommer att avta ju längre tid lagringen pågår. Den ackumulerade metanproduktionen vid en viss lagringstid kommer dock alltid att vara högre ju högre lagringstemperaturen är.

I de dynamiska modellerna är lagringstiden en viktig parameter. I vissa modeller beräknas metanproduktionen från ett lager som fyllts vid ett tillfälle som en funktion av lagringstiden. Andra modeller återskapar dynamiken i lagren, d.v.s. hur mängden rötrest som finns i lagret vid en viss tidpunkt beror på tillförseln (ofta kontinuerlig tillförsel) och bortförsel (ofta några gånger per år) av rötrest i lagret.

Metankonverteringsfaktor (på engelska *Methane conversion factor*), MCF:
MCF är en faktor som ofta används i enklare statiska modellerna för att beskriva metanproduktionen givet en viss lagringsteknik, en viss lagringstid och en viss temperatur. MCF anger hur stor andel av B_0 som uppnås under dessa givna förutsättningar. MCF kan t.ex. vara lägre för flytgödsel med svämtäcke än utan svämtäcke för att beakta att metanemissionerna blir lägre tack vare att en del metan oxideras i svämtäcket. MCF brukar också anges givet en viss temperatur eller ett visst temperaturintervall (t.ex. ≤ 10 °C eller 12 °C) för att spegla sambandet mellan temperatur och metanbildning.

Åtgärder för att minska metanavgången från rötrestlager

De åtgärder som beskrivs här siktar in sig på någon eller några av de parametrar som beskrevs i föregående kapitel:

- **Minska mängden rötrest i lagret genom att sprida fler gånger under odlingssäsongen:** Målet är att minska mängden VS i lagret, speciellt under varma perioder när metanproduktionen är som högst per kg VS. Åtgärden kan även korta ner den genomsnittliga lagringstiden.
- **Åtgärder för ökad utrötningsgrad**: Syftet är att minska mängden VS i rötresten och dess B_o-värde. Ju mindre mängd VS i rötresten och ju lägre B_o-värde desto lägre metanproduktion i rötrestlagret, allt annat lika. Effekten kan t.ex. åstadkommas med säkrad tillgång på mikronäringsämnen i rötningsprocessen, efterrötkammare/tvåstegsprocess, övergång från mesofil till termofil process eller förbehandling av substrat.
- **Temperatur i lagret:** Syftet är att utreda vad temperaturen på utgående rötrest har för betydelse för metanproduktionen i rötrestlagret.

Effekterna av dessa åtgärder har bedömts med hjälp av modeller som tar hänsyn till dessa parametrar. Modellerna har valts så att de ska kunna belysa de frågor som ställs i respektive åtgärd. De ursprungliga modellerna har i vissa fall behövt modifieras så att de kan besvara aktuell frågeställning. Modellberäkningar ger en fingervisning om hur åtgärderna slår och vad som är stort och smått. Vi vill framför allt använda dem för att visa på storleksordningar och för att jämföra och rangordna alternativ. De absoluta värdena, t.ex. kg metan per ton rötrest, har i detta sammanhang mindre betydelse.

I varje åtgärd jämför vi hela tiden alternativa sätt att hantera en given mängd rötrest.

Minska mängden rötrest i lagret genom att sprida fler gånger under odlingssäsongen

Metanproduktionen i ett rötrestlager blir högre ju högre temperaturen är och ju mer organiskt material det finns i lagret. Högst metanproduktion kan förväntas från ett fullt lager sommartid. Målet med åtgärden är därmed att ha lite VS i lagret, speciellt under varma perioder när metanproduktionen är som högst per kg VS. I denna åtgärd åstadkommer vi detta genom att anpassa spridningen av rötrest och att sprida den fler gånger under odlingssäsong i syfte att minimera mängden rötrest i lagret under den varmaste årstiden. Åtgärden kan även korta ner den genomsnittliga lagringstiden.

Beräkningarna bygger på sambanden och modellen som presenteras i Linke m.fl. (2013). I den modellen beräknas metanproduktionen som sker i ett rötrestlager utifrån temperaturen i lagret, lagringstiden, mängden VS i lagret samt B_o-värdet och hur det förändras över tid.

Följande förutsättningar och antaganden gäller för de modellberäkningar som presenteras i detta kapitel:

Tiden: Metanberäkningarna görs för ett kalenderår, tidssteget är en vecka.

Dynamiken i lagret: Här simuleras hur mängden rötrest i lagret förändras över året beroende på bort- och tillförsel rötrest. Tillförseln antas vara konstant per tidsenhet, d.v.s. samma mängd rötrest tillförs lagret varje vecka under hela året. Bortförseln sker i samband med spridning. Här antas att det är tillåtet att sprida rötresten valfritt antal gång mellan den 1 mars och sista oktober.

I beräkningarna har vi förutsatt att mängden tillförd rötrest under året ska vara den samma som mängden bortförd rötrest. Det innebär att mängden rötrest i början av året ska vara den samma som mängden i slutet av året.

Vi räknar inte med någon effekt av nederbörd eller avdunstning från lagret. Visserligen påverkar nederbörd och avdunstning mängden rötrest i lagret, men det är mängden vatten som påverkas, inte mängden organiskt material. Förändringar av vattenhalten antas inte påverka metanproduktionen.

Temperatur i lagret: I Linke m.fl. (2013) beräknas metanproduktionen som en funktion av temperaturen i lagret. Vi saknar dock uppgifter om temperaturen i lagren och hur den varierar över året. Istället beräknar vi temperaturen i lagret som en linjär funktion av medeltemperaturen i luften, detta samband har även visats i en dansk studie av Lund Hansen m.fl. (2006). Temperaturen i lagret kan då skrivas som:

Temperatur i lagret = k*medeltemperaturen i luften + m

Det går alltså att hitta värden på ”k” och ”m”.

I den danska studien jämfördes lufttemperaturen och temperaturen i gårdslager som tog emot rötrest från termofila biogasanläggningar (Lund Hansen m.fl., 2006). Temperaturerna avsåg medelvärden per månad, och de fann att k=0,75 och m=6,3.

JTI har mätt temperaturen i flytgödsellager på tre platser i Sverige, och fann att årmedeltemperaturen i lagren var lik eller några grader högre än luftens medeltemperatur (Rodhe m.fl., 2008). De har även jämfört lager med flytgödsel och med rötad gödsel på två platser i landet. I den ena jämförelsen var årsmedeltemperaturen 0,6 °C högre i rötrestlagret än i flytgödsellagret. I den andra jämförelsen var temperaturskillnaden 4,5 °C. I det första fallet sänktes temperaturen på utgående rötrest i en efter-rötkammare, vilket inte gjordes i det andra fallet, och dessutom var utmatningen av varm rötrest lägre i det första fallet.

Mängden VS: Rötrestens innehåll av organiskt material anges som procent VS av våtvikt gånger mängden rötrest vid en given tidpunkt. Enligt modellen i Linke m.fl. (2013) ska det inte göras någon avräkning för VS som bryts ner under lagringen. I modellen beaktas nedbrytning av VS istället genom att B_o-värdet (l metan per kg ingående VS) justeras ner i takt med att det mest lättomsättbara organiska materialet bryts ner. Mängden VS avser därmed mängden VS i rötresten som tillfördes lagret, före avdrag för VS som brutits ner under lagringen.

Rötrestens B_o-värde: Här anger vi ett värde på B_o i rötrest som fylls på i lagret som indata till beräkningarna (samma B_o-värde för hela året). B_o-värdet kan hämtas från utrötningsförsök som gjorts på rötresten.

I Linke m.fl. (2013) beräknas istället B_o i rötresten som B_o i de substrat som matas in i rötkammaren minus metanproduktionen som skett i rötkammaren. Här förutsätter vi att detta samband även gäller i rötrestlagret, d.v.s. att B_o-värdet i rötrest som lagrats *n* veckor kan beräknas som B_o i rötresten när den fylldes på i lagret (vid n = 0 veckor) minus metanproduktionen som skett under lagringen (d.v.s. från vecka 0 till vecka n).

Det genomsnittliga B_o-värdet i rötresten som finns i lagret kommer därmed att variera över tid beroende på mängden nytillförd rötrest jämfört med mängden gammal rötrest (=rötrest som över-lagrats från föregående vecka) i lagret aktuell vecka, och den gamla rötrestens B_o-värde. Här antas att B_o-värdet i den gamla rötresten är lika med rötrestens genomsnittliga B_o-värde föregående vecka.

Vi behöver även en absolut referenspunkt där vi på förhand känner till veckans B_o-värde. Här har vi förutsatt att det genomsnittliga B_o-värdet i rötresten är som högst den vecka som mängden rötrest är

som lägst i lagret. Den veckan kommer nämligen andelen ny rötrest i lagret att vara som högst. Vi antar att det genomsnittliga B_o-värdet i rötresten den veckan motsvarar B_o-värdet i rötrest nytillförd rötrest.

Här beräknas metanproduktionen per vecka som en funktion av det genomsnittliga B_o-värdet i rötresten aktuell vecka.

Nedbrytningshastighet: Här antas samma värde som i Linke m.fl. (2013).

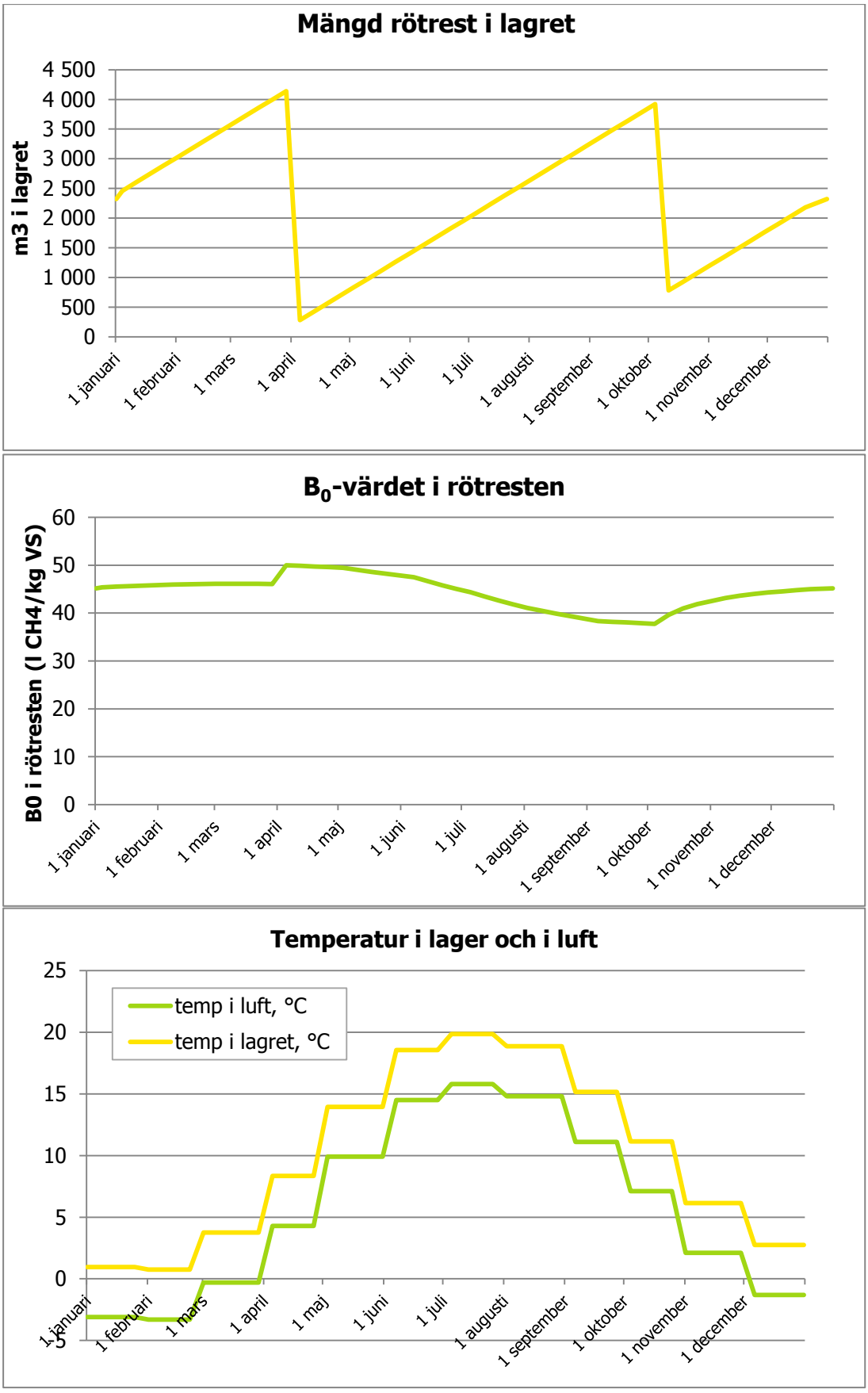
Metanberäkning: Här beräknas metanproduktionen per vecka. Vi utgår från att det i början av varje vecka finns en viss mängd gammal rötrest i lagret (=mängden som är kvar från föregående vecka efter avdrag för eventuell spridning av rötrest föregående vecka), och att lagret sedan fylls på med ny rötrest. Metanproduktionen som sker under veckan beräknas sedan för den gamla rötresten respektive den nytillförda rötresten utifrån B_o-värdet samt mängden VS i gammal och nytillförd rötrest, temperatur i lagret samt nedbrytningshastighet.

Grundalternativet

Vi har beräknat metanproduktionen i ett grundalternativ med följande antaganden:

- Rötrest som tillförs lagret;
    - B_o-värde = 50 l metan per kg VS
    - VS-halten = 3 %
    - Mängd tillfört = 140 m^3/vecka
- Rötrest sprids runt den 1 april (4 000 m^3) och 1 oktober (3 280 m^3)
- Temperaturen i lagret: Här antar vi att temperaturen i rötrestlagret följer luftens medeltemperatur (motsvaras här av SMHIs normalvärden per månad), men att den är 4 °C högre än luftens temperatur, d.v.s. k = 1 och m = 4.

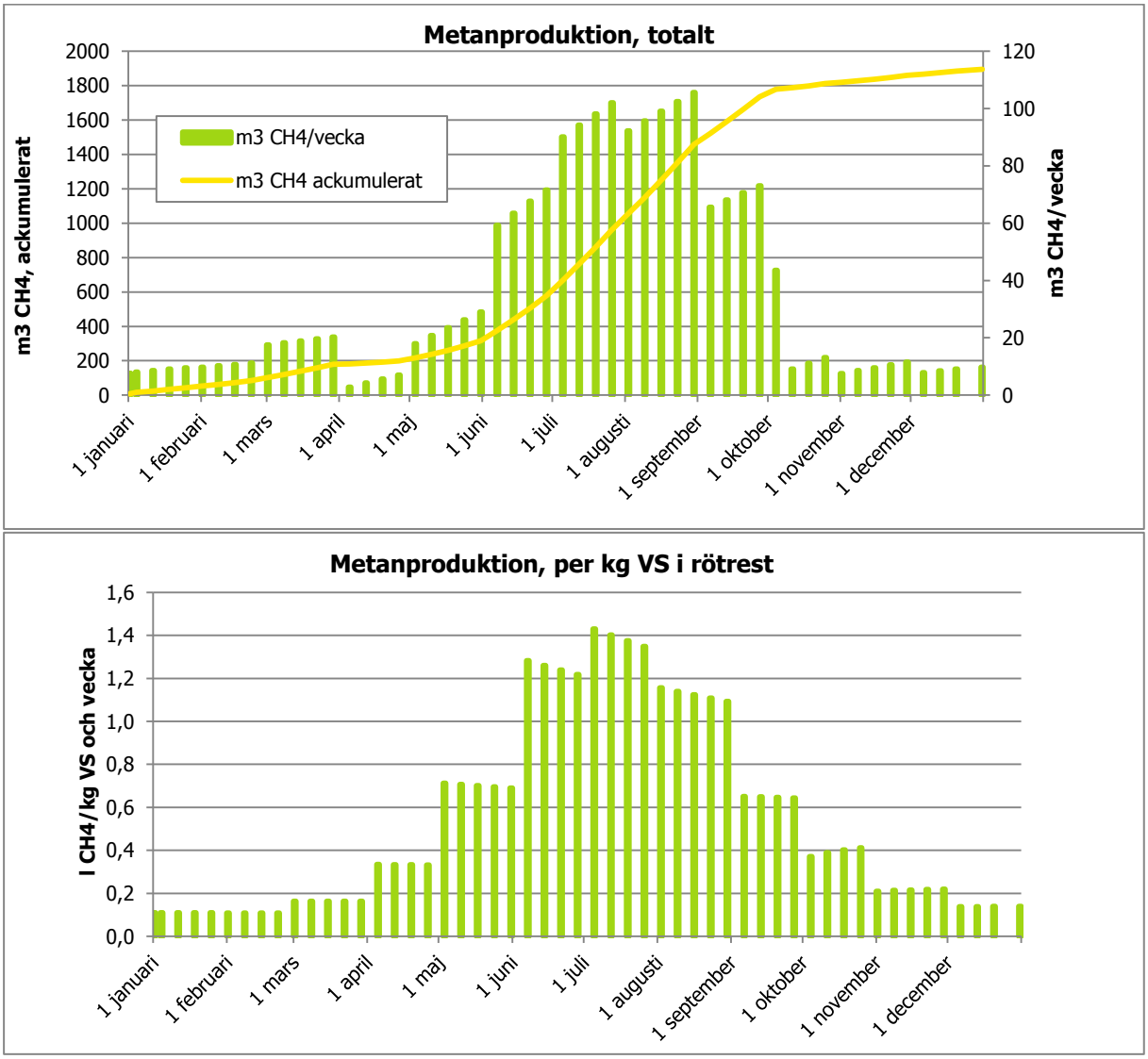
I Figur 1 visas lagringsdynamik, det genomsnittliga B_o-värdet och temperaturen för grundalternativet. Lagret töms nästan helt vid vårspridningen, och resten sprids vid ett tillfälle under hösten. Det genomsnittliga B_o-värdet i rötresten sjunker under sommaren p.g.a. att metanproduktionen är relativt hög då. Värdet stiger sedan under hösten eftersom metanproduktionen är relativt låg och relativt mycket ny rötrest med högre B_o-värde tillförs lagret.



Figur 1: Lagringsdynamik, det genomsnittliga B_0-värdet och temperaturen för grundalternativet

I Figur 2 visas resultatet från metanberäkningarna. I det övre diagrammet visas metanproduktionen från hela lagret dels som metanproduktion per vecka och dels ackumulerat under året. Det mesta metanet produceras under sommaren och tidig höst när temperaturen är hög och/eller lagren är väl fyllda. Man kan också se att metanproduktionen per vecka sjunker kraftigt vid vissa tidpunkter. Det beror på att lagren töms i samband med spridning (gäller tappet runt 1 april) och/eller att temperaturen i lagret är lägre än föregående månad (gäller månadsskiftet september/oktober). Den totala metanproduktionen per vecka ökar succesivt varje månad i takt med att mer rötrest fylls på i lagret och att det därmed finns mer VS som kan omvandlas till metan.

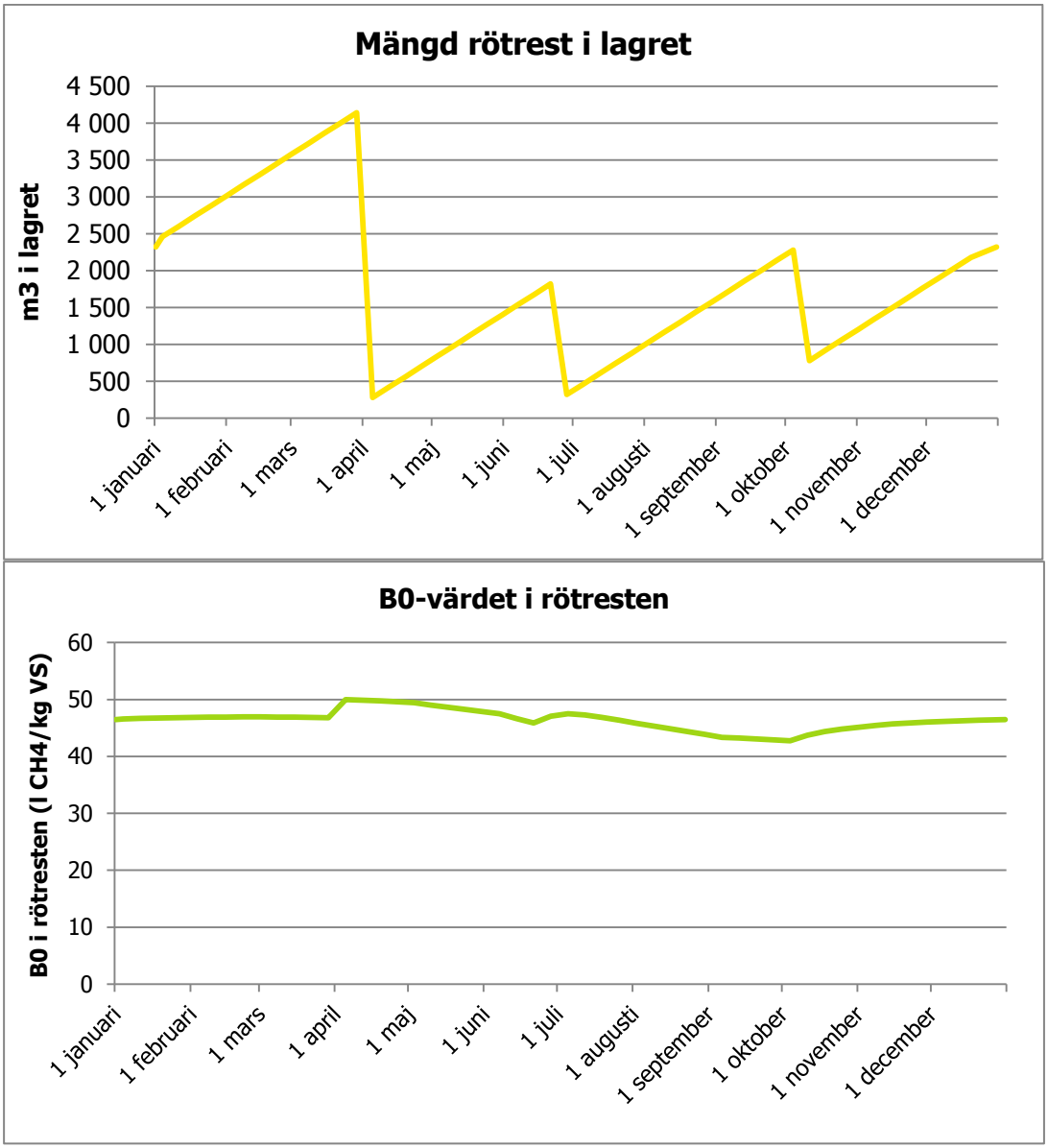
I det undre diagrammet presenteras resultaten istället per kg VS i rötresten och vecka. Återigen är temperaturen avgörande för metanproduktionen, och metanproduktionen per kg VS är därför högst under de varma sommarmånaderna. Då beräknas metanproduktionen vara ca 6-7 gånger högre än under de kallaste månaderna. Metanproduktionen per kg VS och vecka avtar något under varje enskild sommarmånad. Det beror på att B_0-värdet succesivt sjunker när metanproduktionen är högre än vad som kompenseras genom tillförsel ny rötrest med högre B_0-värde.



Figur 2: Beräknad metanproduktion i grundalternativet, dels den totala metanproduktionen från lagret och dels metanproduktionen per kg VS i rötresten.

Fler spridningstillfällen

I nästa alternativ lades ytterligare ett spridningstillfälle in, allt annat lika. I grundalternativet spreds 3 280 m³ runt den 1 oktober, men i alternativet med fler spridningstillfällen delades denna giva så att hälften av givan (1640 m³) spreds vid midsommar och den andra hälften runt den 1 oktober (se Figur 3). Det är alltså samma mängd rötrest som lagras och sprids totalt sett per år, den enda skillnaden är att ett extra spridningstillfälle lagts till.

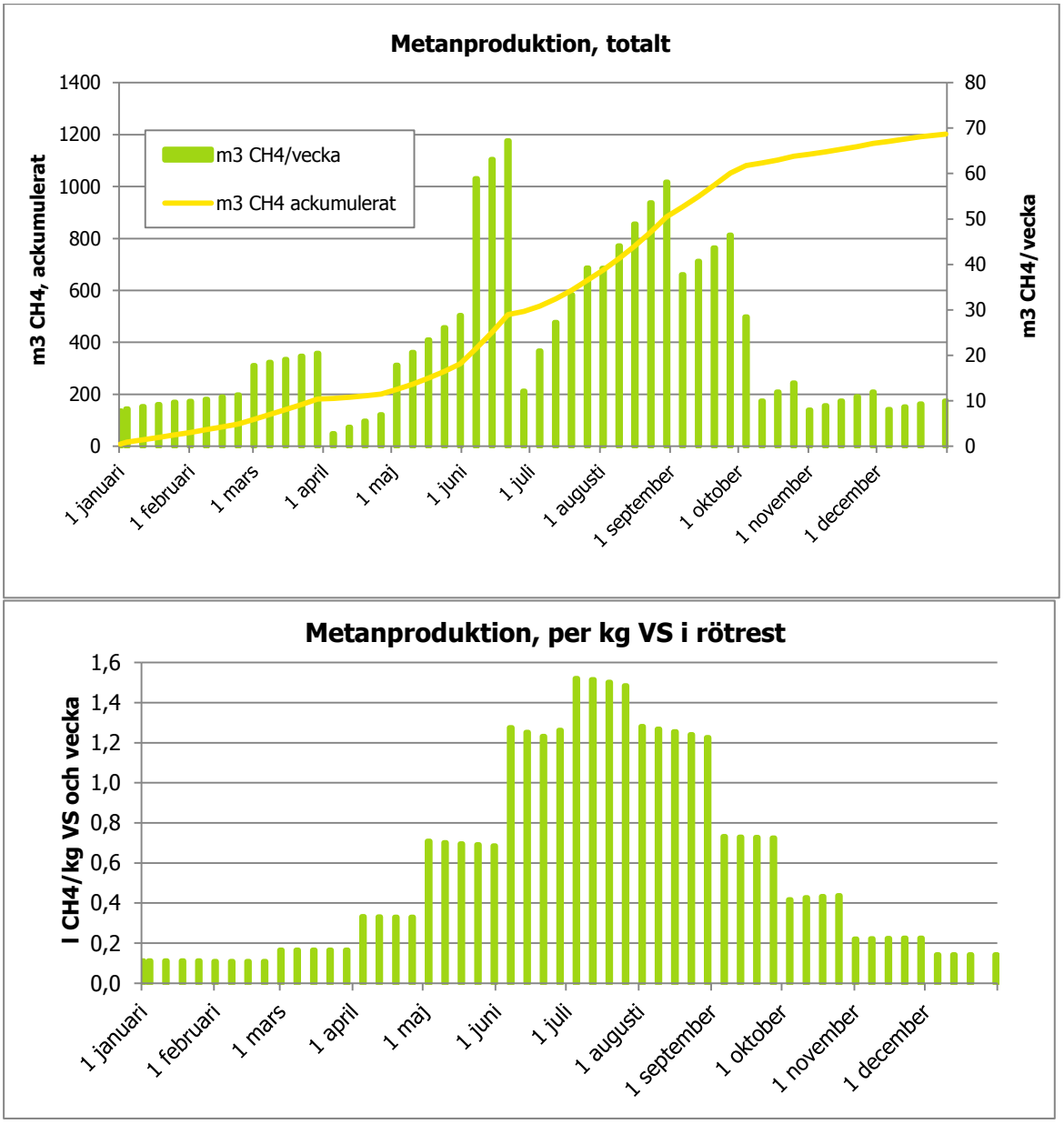


Figur 3: Lagringsdynamik och det genomsnittliga B_0-värdet i alternativet med fler spridningstillfällen än i grundalternativet

Resultaten från alternativet med fler spridningstillfällen visas i Figur 4. Den stora skillnaden jämfört med grundalternativet (se Figur 2) är att mängden VS i lagret är mycket lägre efter midsommar tack vare det extra spridningstillfället och att metanproduktionen per vecka därmed blir mycket lägre efter midsommar. Den genomsnittliga mängden rötrest i lagret under tillåten spridningssäsong (1 mars-sista oktober) är betydligt lägre än i grundalternativet (ca 1 540 m³ jämfört med 2 220 m³ i grundalternativet). Notera att metanproduktionen per kg VS i princip är den samma per vecka i grundalternativet och i alternativet med ett extra spridningstillfälle.

Totalt sett beräknas metanproduktionen per år vara en tredjedel lägre tack vare det extra spridnings-tillfället. Det är en stor minskning med tanke på att man bara ändrat spridningstidpunkten för en dryg femtedel av rötresten som tillförts lagret under året. Åtgärden innebär även att den genomsnittliga lagringstiden för rötresten (exklusive överlagrad rötrest) sjunker, från ca 110 dygn till drygt 80 dygn. Ju kortare lagringstid desto mindre andel av VS hinner brytas ner till metan.

Andra spridningsstrategier och temperaturvariationer över året ger andra resultat. Men poängen är ändå att det ur metanförlustsynpunkt är fördelaktivt om lagret innehåller lite VS när temperaturen i lagret är hög.



Figur 4: Beräknad metanproduktion i alternativet med fler spridningstillfällen, dels den totala metanproduktionen från lagret och dels metanproduktionen per kg VS i rötresten.

Jämförelse med flytgödsel

Men hur hade det sett ut om man lagrat orötad stallgödsel istället för rötad stallgödsel? Om vi antar att beräkningsmodellen även är giltig för lagring av flytgödsel kan vi göra följande justeringar för att få jämförbara alternativ:

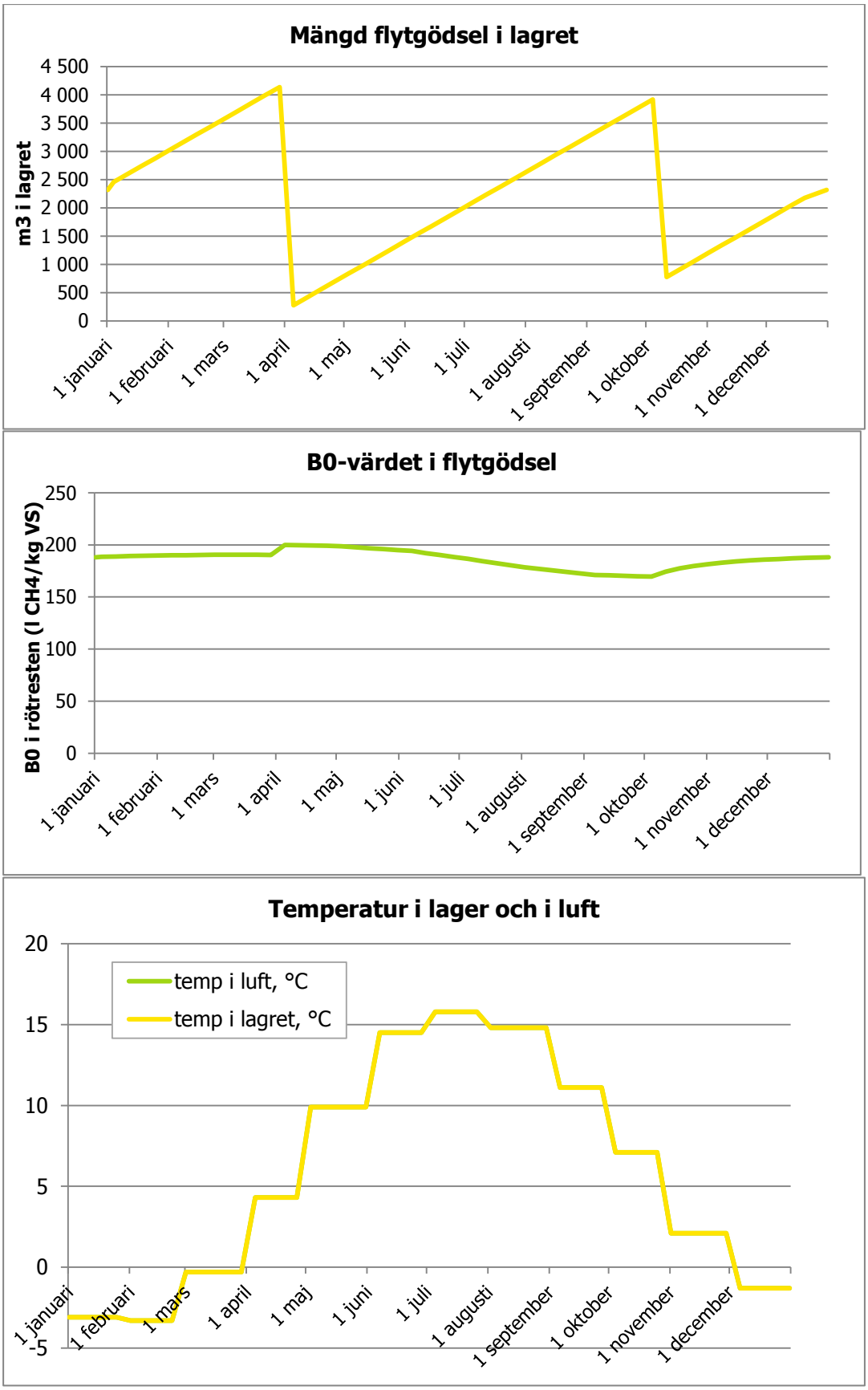
- Samma mängd flytgödsel (140 m^3/vecka) tillförs lagret som i grundalternativet, men flytgödseln har annan sammansättning än gödselbaserad rötrest.
    - B_0-värde är högre eftersom flytgödseln inte har rötats. Här antar vi att B_0-värde är 200 l metan per kg VS flytgödsel istället för 50 l metan per kg VS rötrest. Det är samma härad som för nötflytgödsel. Svinflytgödsel ligger högre.
    - VS-halten är något högre i flytgödseln än i rötresten eftersom inget VS har brutits ner i någon rötningsprocess. Här antas att VS-halten i flytgödseln är 4 % av våtvikt istället för 3 % som den var för rötresten.
- Flytgödseln sprids vid samma tidpunkt och i samma mängd som i grundalternativet, d.v.s. runt den 1 april (4 000 m^3) och 1 oktober (3280 m^3)
- Temperaturen i lagret antas vara lägre i flytgödsellagret än i rötrestlagret eftersom rötrest från rötkammaren kan hålla högre temperatur än flytgödsel som kommer direkt från ett stall. Här antas att temperaturen i lagret med flytgödsel i genomsnitt 4 °C längre än i rötresten i grundalternativet, vilket ger att k = 1 och m = 0. Det är stor temperaturskillnad.

Resultaten från beräkningarna visas i Figur 5 och Figur 6. Förändringen av B_0-värdet i flytgödseln följer samma mönster som i grundalternativet, men värdet ligger alltid mycket högre. Temperaturen i lagret antas här vara den samma som luftens temperatur, och därför syns bara en kurva i temperatur-diagrammet.

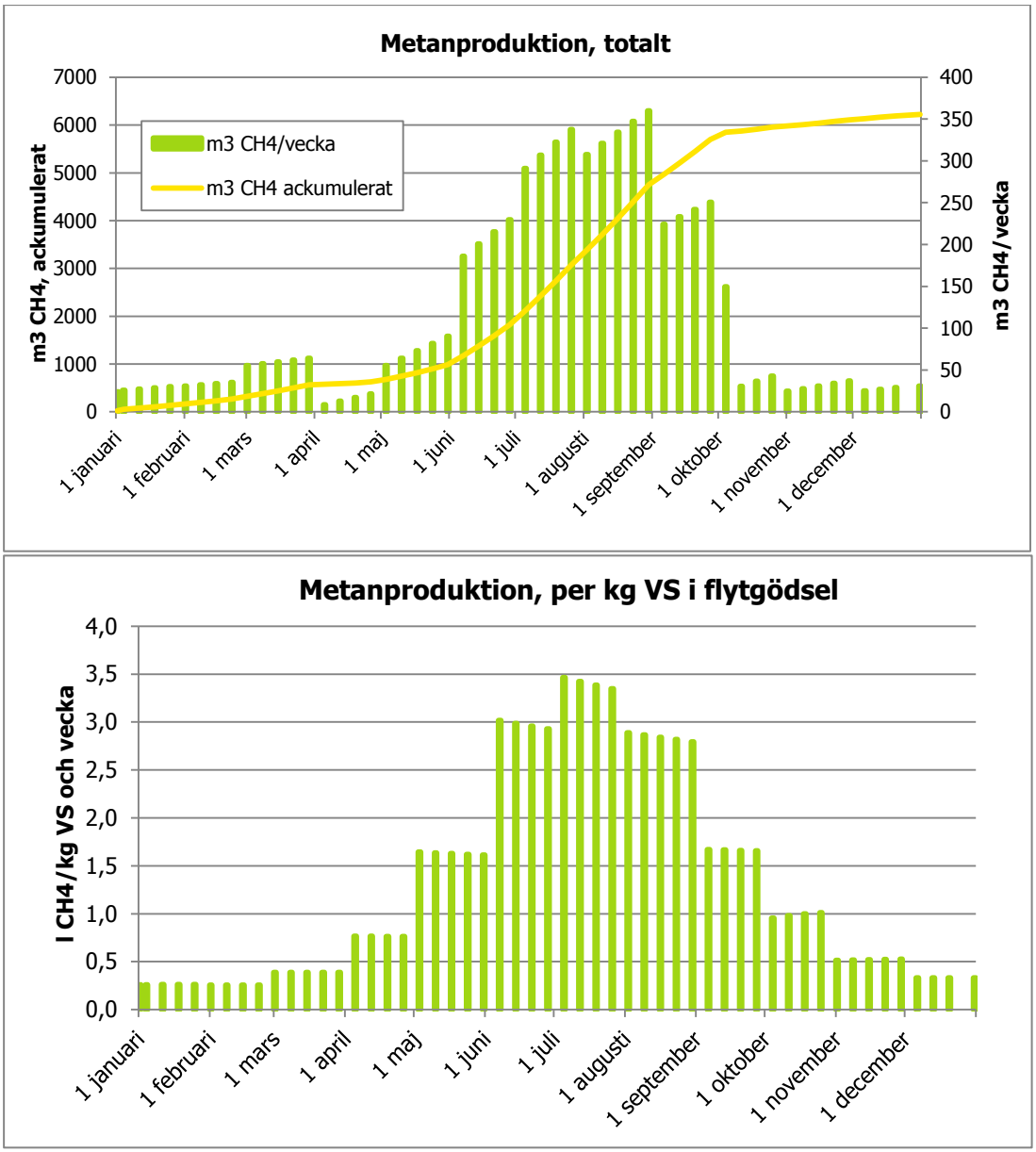
Årsvariationen av den totala metanproduktionen från lagret och per kg VS flytgödsel följer samma mönster som i grundalternativet (se Figur 2). Men utsläppsnivåerna är mycket högre. Den totala metanproduktionen beräknas vara drygt 3 gånger högre från flytgödsellagret än i grundalternativet, och metanproduktionen per kg VS beräknas vara 2,5 gånger högre från flytgödsellagret än i grund-alternativet. När den totala metanproduktionen beräknas ingår det att flytgödseln innehåller mer VS än rötresten, och därmed blir skillnaden högre än när man jämför metanproduktionen per kg VS flytgödsel respektive kg VS rötrest.

Metanproduktionen i flytgödselalternativet hålls ändå nere tack vare att temperaturen i flytgödsel-lagret antagits vara lägre än i rötrestlagret. Om man istället hade antagit att temperaturen i flytgödsel-lagret är den samma som i rötrestlagret hade metanproduktionen i flytgödsellagret istället blivit 5 gånger högre (totala metanproduktionen från lagren) respektive 4 gånger högre (metanproduktionen per kg VS) än i grundalternativet. Det är en mycket stor skillnad!

Enligt denna modell och de antaganden som gjorts i grundalternativet respektive alternativet med orötad flytgödsel beräknas metanproduktionen i rötrestlagret var mycket lägre än i flytgödsel-alternativet. Det krävs stora ”försämringar” i rötrestalternativet för att dess metanproduktion ska närma sig metanproduktionen i flygödsellagret. Först om temperaturen i rötrestlagret i genomsnitt hade varit hela 9 °C högre än i flytgödsellagret (d.v.s. en dubbelt så stor skillnad som JTI uppmätte vid jämförelse mellan ett flytgödsel- och ett rötrestlager) beräknas den totala metanproduktionen i flytgödsellagret vara dubbelt så hög som från rötrestlagret, allt annat lika. Om rötrestens istället inte hade varit lika väl utrötad och B_0-värde hade varit dubbelt så högt, d.v.s. 100 l istället för 50 l metan per kg VS, hade metanproduktionen i flytgödsellagret ändå varit 60 % högre, allt annat lika.



Figur 5: Lagringsdynamik, det genomsnittliga B_0-värdet och temperaturen vid lagring av flytgödsel.



Figur 6: Beräknad metanproduktion i alternativet med lagring av flytgödsel, dels den totala metanproduktionen från lagret och dels metanproduktionen per kg VS i flytgödseln.

Kostnad för åtgärden

Åtgärden kräver inga extra investeringskostnader för lagring av rötresten.

Kostnaden för att sprida rötresten behöver inte heller påverkas. Det är samma mängd rötrest som ska spridas oavsett spridningsstrategi. Spridningskostnaden per ton rötrest skulle dock kunna förändras när spridningstidpunkten ändras om spridningen sker med annan teknik (t.ex. med myllningsaggregat i mitten av sommaren istället för med släpslang på hösten) eller om kväveutnyttjandet förändras så att det påverkar ekonomin i växtodlingen. Men dessa förändringar kan både slå uppåt och nedåt.

Här har vi gjort ett räkneexempel där grundalternativet jämförs med ”fler spridningstillfällen”, och med följande antaganden:

- I grundalternativet sprids all rötrest med släpslangspridare. I alternativet med fler spridningstillfällen sprids givan runt midsommar (1 640 m^3) med myllningsaggregat, övrig rötrest sprids med samma teknik som i grundalternativet. Merkostnaden för spridning med myllningsaggretat antas vara 5 SEK per m^3.
- Rötrestens kväveinnehåll antas vid spridningstillfällena vara 2 kg NH4-N/m^3.
- Kväveutnyttjandet antas vara 35 % vid 1 oktober (motsvarar utnyttjandegranden för flytgödsel som sprids ”Sen höst, band, nedbrukning 12 timmar” enligt Stank in Mind) och 60 % vid myllning runt midsommar (motsvarar utnyttjandegranden enligt Stank in Mind för nötflytgödsel som myllas i vall under försommar eller sommar).
- Skillnaden i kväveeffektivitet justeras med ändrad tillförsel av mineralgödselkväve i motsvarande grad. Gödselpriset antas vara 10 SEK/kg N.

Kostnaderna för spridningen av rötrest skulle med dessa antaganden öka med 8 200 SEK (1 640 m^3*5 SEK/ m^3). Å andra sidan skulle kostnaderna för inköp av mineralgödselkväve minska med 8 200 SEK (1 640 m^3*2 kg NH4-N/m^3*(60%-35%)*10 SEK/kg N). Det vill säga de ökade spridningskostnaderna vägs upp av förbättrat kväveutnyttjande.

Om skillnaden i kväveeffektivitet mellan alternativen är större, om rötrestens kväveinnehåll är högre eller om värdet av ett sparat kg kväve i rötresten värderas högre kommer alternativet med fler spridningstillfällen att ge ett bättre ekonomiskt utfall än grundalternativet. Om t.ex. kväveinnehållet i rötresten är 2,2 kg NH4-N/m^3 och skillnaden i kväveutnyttjande mellan spridningsteknikerna är 40 % istället för 25 %, allt annat lika, skulle alternativet med fler spridningstillfällen minska kostnaderna med 0,86 SEK per m^3 rötrest som lagras. Dessutom beräknas utsläppen av metan att minska genom denna åtgärd. Om kostnadsbesparingen slås ut på de minskade metanförlusterna motsvarar det 9 SEK/kg undsluppet metanutsläpp, eller omräknat till koldioxidekvivalenter ca 0,36 SEK per kg CO_2e.

Men om kostnaden för myllning är högre eller om värdet av att spara kväve i rötresten är lägre än i räkneexemplet kommer alternativet med fler spridningstillfällen att ge ett sämre ekonomiskt utfall än grundalternativet. Om t.ex. merkostnaden för myllning är 8 SEK/m^3 och rötrestens kväveinnehåll är 1,8 kg NH4-N/m^3, allt annat lika, skulle alternativet med fler spridningstillfällen öka kostnaderna med 0,79 SEK per m^3 rötrest som lagras. Det motsvarar en kostnad på ca 8 SEK per kg undsluppet metanutsläpp, eller ca 0,30 SEK per kg koldioxidekvivalent.

Ökad utrötningsgrad

Förbättrad utrötningsgrad minskar risken för metanproduktion i rötrestlagret på två olika sätt. Dels minskar den totala mängden VS i rötresten eftersom en större andel av VS i substraten bryts ner i rötkammaren och mindre mängd VS därmed finns kvar i rötresten som tas ut ur rötkammaren. Dels kommer det VS som finns kvar i rötresten att vara mer svårnedbrytbart eftersom mer av det lättomsättbara organiska materialet brutits ner i rötkammaren. Den potentiella metanproduktionen per kg VS kommer därmed också att minska.

Effekten av åtgärden kan beräknas på samma sätt som i föregående kapitel. Justera mängden VS och B_o-värdet så att värdena representerar situationen före respektive efter åtgärden. I modellen antas ett linjärt samband både mellan mängden VS och metanproduktionen och mellan B_o-värdet och metanproduktionen. Det innebär att om en åtgärd t.ex. bedömts minska mängden VS i utgående rötresten med 10 % och B_o-värdet med 20 % beräknas metanproduktionen i lagret minska med 28 % (100%-(100%-10%)*(100%-20%)).

Kostnaden för åtgärden beräknas gårdsspecifikt eftersom den beror på vilka förändringar som gjorts på den enskilda anläggningen.

Temperatur i lagret

Temperaturen i lagret har stor betydelse för metanproduktionen i rötrestlagret. Temperaturen i lagret påverkas i sin tur bl.a. av omgivningens temperatur, lagrets utformning och hur välisolerat det är, värme som tillförs via tillförd rötrest och solinstrålning. Eventuellt skulle biologisk aktivitet i lagret också kunna ge viss värmeproduktion, men värmeproduktionen är låg vid anaerob nedbrytning.

Flera gårdsbiogasanläggningar har i sina miljötillstånd fått villkor angående temperaturen, oftast en maxgräns, på rötresten när den lämnar biogasanläggningen/efterrötkammaren. Tanken med dessa villkor är att hålla nere temperaturen i rötrestlagren. Frågan är dock hur stor effekt ett sådant villkor, exempelvis som maxgränser på temperatur på utgående rötrest, har på temperaturen i lagret och därmed på metanproduktionen i lagret. Vi har inte hittat några färdiga räkneexempel eller modeller i litteraturen som beräknar denna effekt. Här ger vi några förslag på hur man skulle kunna resonera kring frågeställningen.

Utgångspunkten är att det finns ett färdigbyggt lager och det är temperaturen i detta lager som ska jämföras i olika scenarion. I praktiken har ju gårdsbiogasanläggningarna ett, eller flera, lager med sina givna förutsättningar och det är detta lager/dessa lager som tillståndsvillkoren ska tillämpas på. Lagrets utformning, storlek, placering etc. ska alltså vara den samma när olika scenarion jämförs, t.ex. när effekter av olika temperaturer på tillförd rötrest jämförs. I temperturmätningar som rapporterats om i litteraturen jämförs istället olika brunnar, och då påverkas resultatet av skillnader i utformning, placering etc.

Här kommer vi att teoretiskt beräkna temperaturen och värmeflödet i lagret. Exemplen visar alltså inte resultat från praktiska temperaturmätningar. I denna studie passar det bättre med teoretiska beräkningar än med praktiska mätningar. Det beror på att vi vill jämföra olika tänkbara scenarion och visa hur man kan resonera kring effekterna av rötrestens temperatur snarare än att rapportera tillståndet i några enstaka brunnar vid några enstaka mättillfällen.

I alla räkneexempel antas att en given mängd flytande rötrest tillförs lagret per dygn och att lagret redan innehåller en viss mängd rötrest. Den tillförda rötresten förutsätts ha högre temperatur än vad temperaturen i lagret är. Vidare förutsätter vi att temperaturen i lagret inte påverkas av anaerob nedbrytning eller annan eventuell biologisk aktivitet i den lagrade rötrest. Vid jämförelser mellan scenarion förutsätts att lagret har samma utformning, storlek och placering.

Hur mycket värme tillförs lagret via rötrest?

I Tabell 1 visas ett enkelt räkneexempel på hur temperaturen i ett rötrestlager förändras när varm rötrest tillförs. I exemplet tillförs 20 m^3 rötrest till ett lager som redan innehåller 1 180 m^3 rötrest, d.v.s. den nytillförda rötresten kommer att utgöra en sextiondel (1,67 %) av den totala mängden rötrest i lagret.

Tabell 1: Beräknad förändring av temperaturen i ett rötrestlager efter tillförsel av ny rötrest

	Initial temperatur (°C)	Mängd (m^3)	Andel av mängden rötrest i lagret	Värme-innehåll (GJ)	Andel av värmet i lagret	Temperatur i lagret efter omblandning, före värme-förluster (°C)
Varmare rötrest						

I lagret sedan tidigare	10	1180	98,3 %	1396	98,2 %	10,25
Tillförd rötrest, högre temperatur	25	20	1,67 %	24,91	1,75 %	
Svalare rötrest						
I lagret sedan tidigare	10	1180	98,3 %	1396	98,3 %	10,17
Tillförd rötrest, lägre temperatur	20	20	1,67 %	24,49	1,72 %	

Mängden värme i rötresterna har beräknats som:

Massa (ton)*specifik värmekapacitet (GJ/ton*K)*temperaturen (K)

Där rötrestens densitet antagits vara 1 ton/m^3 och att dess specifika värmekapacitet är den samma som för vatten (4,18 GJ/ton*K). Observera att temperaturen ska anges i Kelvin.

Den tillförda rötresten är varmare (räknat på två olika temperaturer) än den ”gamla” rötresten. Den tillförda rötresten har då ett något högre värmeinnehåll, men skillnaden är inte stor per m^3 rötrest. Om temperaturen i lagret är 10 °C från början och den tillförda rötresten håller 25 °C kommer värmen i den tillförda rötresten att motsvara 1,75 % av värmeinnehållet i lagret, vilket kan jämföras med att den utgör 1,67 % av den totala mängden rötrest i lagret.

Temperaturen i lagret efter tillförsel av varm rötrest har sedan beräknats som det totala värmeinnehållet i ”gammal” och nytillförd rötrest genom den totala volymen rötrest i lagret och rötrestens specifika värmekapacitet. Det motsvarar då temperaturen som skulle fås vid total temperaturutjämning mellan "gammal" och nytillförd rötrest samt före värmeförluster till omgivningen. I detta räkneexempel skulle tillförsel av varm rötrest (25 °C) medföra att temperaturen i lagret ökade från 10,0 till 10,25 °C. Om den nytillförda rötresten varit svalare (20 °C) hade temperaturen istället blivit 10,17 °C. Temperaturskillnaden mellan den varmare och den svalare nytillförd rötrest är alltså 5 °C, men efter temperaturutjämning mellan gammal och nytillförd rötrest beräknas skillnaden i den genomsnittliga temperturen i lagret vara mycket liten (mindre än 0,1 °C).

I Tabell 1 visas ett räkneexempel med givna temperaturer och volymer rötrest. Om lagret hade innehållit mindre mängd rötrest från början hade temperaturen i lagret påverkats mer, allt annat lika. Metanproduktionen per kg VS hade då blivit något högre. Men det överskuggas helt av att den totala mängden VS i lagret också skulle vara mycket lägre, vilket har större betydelse för de absoluta metanemissionerna (kg CH_4/lager och dygn).

Observera att dessa resultat gäller före värmeförluster till omgivningen! En del värme som tillförs lagret via den varma nytillförda rötresten kommer att förloras till omgivningen så att den slutliga temperaturen i lagret blir lägre än vad räkneexemplet ovan tyder på. Det innebär även att temperaturskillnaderna mellan alternativen blir ännu mindre.

Så små temperaturskillnader har mycket liten inverkan den totala metanproduktionen i lagret. Ett exempel: Anta att metanproduktionen i rötrestlagret kan beräknas på samma sätt som grundalternativet i föregående kapitel (se Figur 1 och Figur 2). Anta sedan att rötresten som tillförs lagret är 5 °C varmare än i grundalternativet (samma som i räkneexemplet i Tabell 1) och att detta leder till att temperaturen i lagret i genomsnitt är 0,05 °C högre än i grundalternativet (d.v.s. k=4,05 istället för 4,0). Det skulle leda till att metanproduktionen från lagret bara ökade med 0,6 % per år. Även om detta är ett mycket förenklat räkneexempel tyder det på att en reell sänkning av temperaturen på utgående rötrest har marginell effekt på metanproduktionen i lagret. Jämför t.ex. med exemplet med ett extra spridningstillfälle under odlingssäsongen (se Figur 3 och Figur 4) som beräknades minska

metanproduktionen i lagret med tiotals procent! De totala kostnaderna för att sänka temperaturen med 5 °C på all tillförd rötrest året om bedöms dessutom vara mycket högre än de ökade spridningskostnaderna som kan vara vid ett extra spridningstillfälle. Utslaget per kg undsluppet metan blir kostnaden ännu mycket högre med tanke på den relativt ringa besparingen av metanutsläpp.

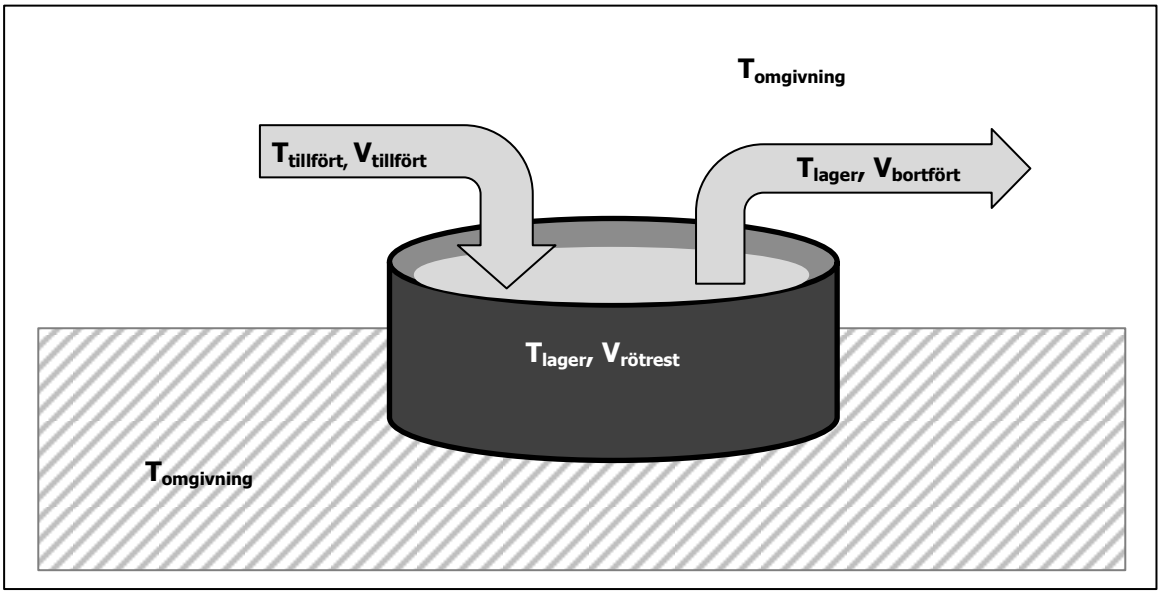
Värmebalans i ett lager

Ovan beskrevs hur temperaturen i lagret kan beräknas enkelt och generellt när två massor med olika temperatur blandas och temperaturskillnaderna utjämnas utan värmeutbyte med omgivningen. Men för att bedöma och jämföra den långsiktiga effekten på temperaturen i lagret av att tillföra rötrest med olika temperaturer behöver man beakta värmeutbytet med omgivningen. Sådana beräkningar blir dock mer komplicerade och kräver mer indata om lagrets egenskaper och om omgivningen. Dessutom behöver en del begränsningar göras, och beräkningen kommer därmed att görs för en given situation.

Här ges ett förslag på hur man kan beräkna temperaturen i ett lager på längre sikt givet följande förutsättningar:

Lagret innehåller en konstant volym rötrest ($V_{rötrest}$), och en viss mängd byts ut en gång per dygn genom att bortförsel av lagrad rötrest ($V_{bortfört}$) är lika stor som den dagliga tillförseln av varm rötrest ($V_{tillfört}$), d.v.s. $V_{bortfört} = V_{tillfört}$ (se Figur 7).

Vi har tre temperaturer att ta hänsyn till (se Figur 7); temperaturen på tillförd rötrest ($T_{tillfört}$), temperaturen i lagret (T_{lager}) och omgivningens temperatur ($T_{omgivning}$). Temperaturen på tillförd rötrest är högre än temperaturen i lagret som i sin tur är högre än omgivningens temperatur (d.v.s. $T_{tillfört} > T_{lager} > T_{omgivning}$). Temperaturen på tillförd rötrest och omgivningens temperatur är indata i beräkningar, medan temperaturen i lagret ska beräknas. Omgivningens temperatur representerar här ett värde för hela lagret, d.v.s. för både temperaturen i marken vid den nedgrävda delen av brunnen och luften runt delarna av brunnen ovan jord. T_{lager} avser temperaturen som nås efter det att varm rötrest har tillförts lagret och att det sedan skett vissa värmeförluster till omgivningen. Dessutom kan temperaturen i lagret före värmeförluster beräknas på samma sätt som i föregående kapitel. Vi antar att det inte finns någon temperaturgradient i lagret, d.v.s. att temperaturen är den samma i alla delar av lagret och i all rötrest som finns i lagret samt som bortförs från lagret.



Figur 7: Schematisk skiss över de flödena (V) och temperaturer (T) som beaktas i beräkningarna.

Vi antar att temperaturen i lagret representerar ett *steady state*, d.v.s. att mängden värme som tillförts lagret per dygn är den samma som värmeförlusterna från lagret per dygn. Värme tillförs lagret via den varma rötresten som matas in i lagret varje dygn. Mängden tillförd värme (GJ) beräknas då som (avser skillnaden i värmemängd mellan den nytillförda varma rötresten och rötresten som bortförts):

$V_{tillfört}$ [ton/dygn]*specifik värmekapacitet [GJ/ton*K]*($T_{tillfört}$ – T_{lager}[K]) (Ekvation 1)

Värme förloras från lagret via värmeförluster genom lagrets väggar och gödselytan. Värmeförlusterna beräknas då som:

Lagrets area [m²]* k [W/m², °C]*(T_{lager}-$T_{omgivning}$ [K]) (Ekvation 2)

Där ”lagrets area” är lagrets yta mot omgivningen, d.v.s. bottenplatta, mantelareal och gödselyta. ”k” är värmegenomgångskoefficienten (även kallat U-värde) som är ett mått på ett materials isolerings-förmåga. Ju lägre U-värde desto bättre isoleringsförmåga. Här räknar vi med ett genomsnittligt U-värde för hela behållaren. Vi har fått fram ett rimligt utgångsvärde genom att beräkna tre U-värden för gödselytan (antar poröst svämtäcke), betongelement ovan jord (d.v.s. gödsel på ena sidan och luft på andra sidan väggen) respektive under jord (d.v.s. gödsel på ena sidan och mark på andra sidan väggen). Dessa U-värden har sedan viktats samman utifrån hur stor andel respektive lagerdel utgör av den lagrets totala yta.

Vid *steady state* är nettovärmetillförseln och värmeförlusterna lika stora, d.v.s. resultatet av Ekvation 1 och 2 ska bli lika. T_{lager} kan då lösas ut ur ekvationerna och beräknas som en funktion av temperatur på inkommande rötrest, omgivningens temperatur, lagrets "egenskaper" (d.v.s. utformning, isolering och storlek) och mängd tillförd/bortförd rötrest per dygn. Temperaturen i lagret beräknas alltså utifrån flera parametrar som är frikopplade från varandra vilket ger en spridning och variation i resultatet.

Grundalternativ

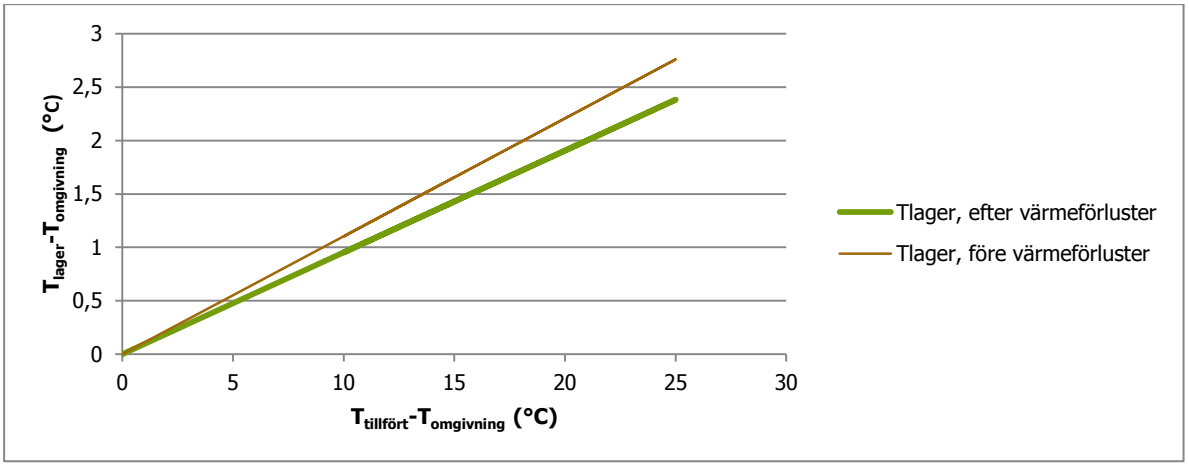
Som utgångspunkt räknar vi på en befintlig brunn som är drygt 25 m i diameter och innehåller 1 800 m³ rötrest. Brunnen är delvis nedgrävd. Varje dygn tillförs 30 m³ varm rötrest, och 30 m³ rötrest bortförs. Det innebär att en sextiondel av rötresten byts ut varje dygn. Den bortförda rötresten har samma tempertur som temperaturen i lagret efter värmeförluster till omgivningen.

U-värdet för hela brunnen antas vara 0,8 W/m², °C. Det är ett viktat medelvärde där U-värdet för bottenplattan och betongväggarna under jord beräknats till ca 0,3 W/m², °C, betongväggarna ovan jord till ca 10 W/m², °C och för gödselytan till 1 W/m², °C.

I Figur 8 visas hur temperaturen i lagret påverkas av temperaturen på tillförd rötrest i grundalternativet. Den tunna bruna linjen visar temperaturen före temperaturutjämning med omgivningen och den gröna grövre linjen visar temperaturen efter värmeförluster till omgivningen. Resultatet presenteras relativt omgivningens temperatur eftersom skillnaden mellan temperaturen på tillförd rötrest och temperaturen i lagret är lika oavsett omgivningens temperatur. Linjerna har alltså samma lutning oavsett omgivningens temperatur. Diagrammet visar att ju varmare den tillförda rötresten är i förhållande till omgivningen, desto högre blir temperaturen i lagret. Här beräknas till exempel att temperaturen i lagret kommer vara ca 1 °C högre än i omgivningen, gäller vid *steady state,* om temperaturen på tillförd rötrest är 10 °C högre än omgivningen. Så om rötrestens temperatur är 20 °C och omgivningens temperatur är 10 °C skulle temperaturen i lagret bli ca 11 °C. Om den tillförda rötrestens temperatur ändras med ±5 °C innebär det att temperaturen i lagret långsiktigt ändras med

±0,5°C. Det vill säga; om den tillförda rötresten istället i genomsnitt var 15 °C respektive 25 °C skulle temperaturen i lagret istället vara ca 10,5 °C respektive 11,5 °C, allt annat lika.

Så trots att vi räknar med en relativt kort uppehållstid i brunnen (60 dygn) och att en relativt stor mängd varm rötrest därmed tillförs per dygn kommer inte temperaturen i brunnen att påverkas så mycket av temperaturen på tillförd rötrest. Dessutom har en rimlig förändring av rötrestens temperatur (några grader upp eller ner) marginell effekt på temperaturen i lagret.



Figur 8: Temperaturen i lagret som en funktion av temperaturen på tillförd rötrest. Temperaturerna anges relativt omgivningens temperatur.

Ändrad uppehållstid i lagret

Figur 9 visar hur temperaturen i lagret påverkas när uppehållstiden i lagret ändras, allt annat lika jämfört med grundalternativet. I detta exempel visas en fördubbling respektive halvering av uppehållstiden.

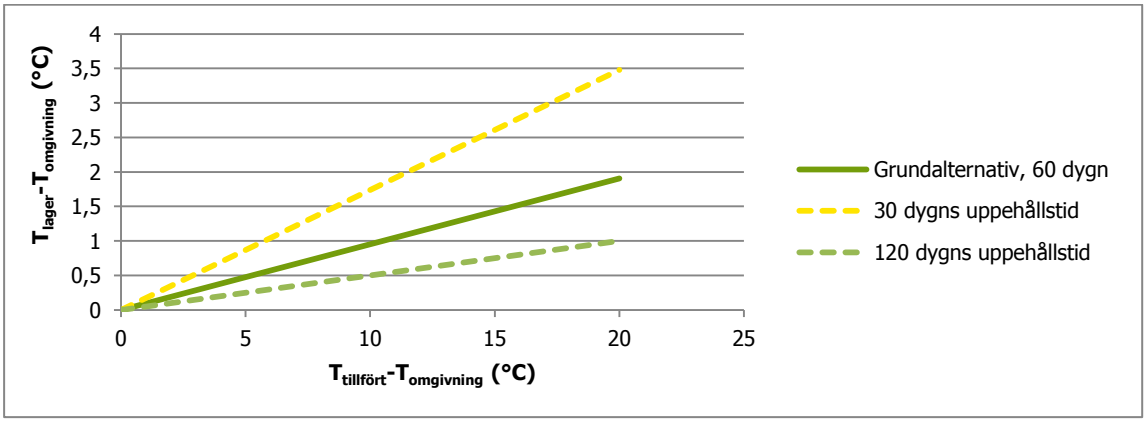
Kortare uppehållstid innebär att mer varm rötrest tillförs per dygn (60 m^3 istället för 30 m^3) och att mer värme därmed tillförs per dygn. Den tillförda rötrestens temperatur får då större genomslag på temperaturen i lagret. Så om omgivningens temperatur är 10 °C och den tillförda rötresten är 20 °C (d.v.s. 10 °C varmare än omgivningen) skulle temperaturen i lagret, efter värmeförluster till omgivningen, bli 11,7 °C istället för ca 11 °C som i grundalternativet.

Högre tillförsel av varm rötrest innebär även att temperaturen i lagret stiger mer direkt efter tillförseln än i grundalternativet. Om vi beräknar temperaturen i lagret före värmeförluster på samma sätt som i föregående kapitel, alltså när två massor med olika temperaturer blandas helt, blir resultatet 12 °C (alternativet med kortare uppehållstid) respektive 11,1 °C (grundalternativet). Det innebär att värmeförlusterna är högre i alternativet med kort uppehållstid eftersom temperaturskillnaden mellan lagret och omgivningen är större än i grundalternativet.

Å andra sidan innebär en längre uppehållstid att mindre varm rötrest och därmed mindre värme tillförs lagret per dygn. Den tillförda rötrestens temperatur får då mindre genomslag på temperaturen i lagret. Med samma förutsättningar som i räkneexemplet ovan skulle temperaturen i lagret vid fördubblad uppehållstid bli 10,5 °C istället för ca 11 °C som i grundalternativet.

Uppehållstiden, eller egentligen mängden tillförd rötrest per dygn i förhållande till den redan lagrade mängden rötrest, har betydelse för temperaturen i lagret, speciellt vid låga rötrestnivåer i lagret och stora temperaturskillnader mellan tillförd rötrest och omgivning. Observera att rötrest från många gårdsbaserade biogasanläggningar lagras i stora brunnar relativt den dagliga rötrestproduktionen, och

att sambandet mellan uppehållstid och temperatur i lagret snarare torde likna exemplet med lång uppehållstid än med kort uppehållstid. Så i praktiken lär det finnas ett visst samband mellan temperatur på tillförd rötrest och temperatur i lagret, men den långa lagringstiden gör att andra parametrar kan få större betydelse.

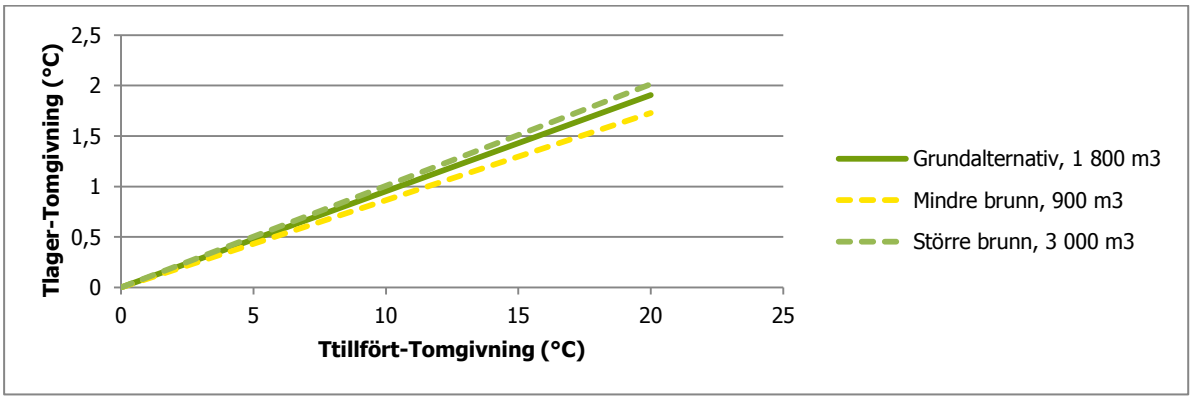


Figur 9: Effekter på temperaturen i lagret av att uppehållstiden i lagret ändras. Temperaturerna anges relativt omgivningens temperatur.

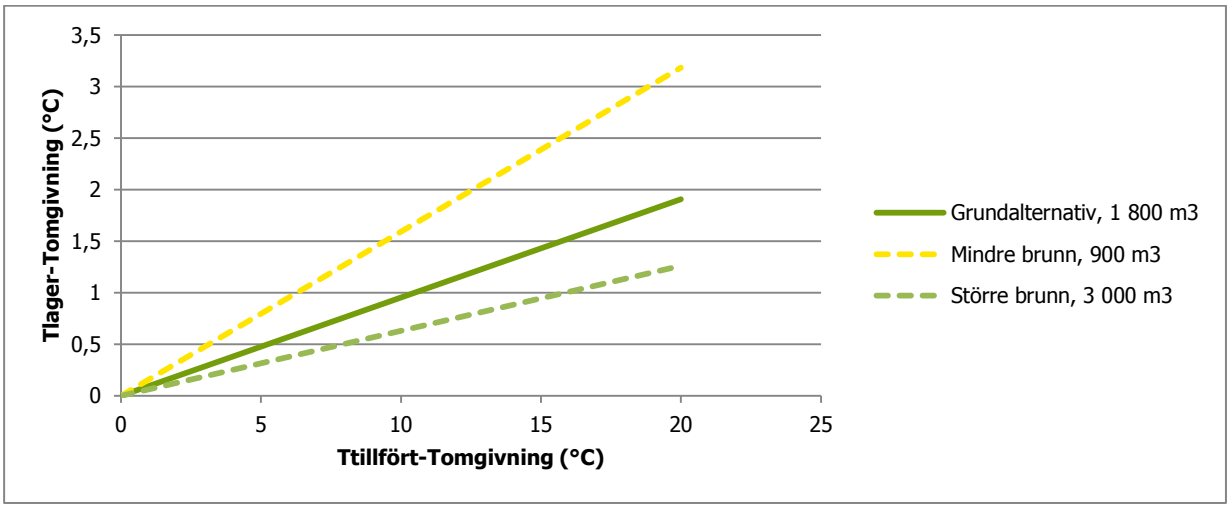
Lagrets utformning

I räkneexemplen ovan har utgångspunkten varit en befintlig brunn med en given utformning, och sedan har temperaturen i brunnen beräknats utifrån tillförsel av rötrest och omgivningens samt rötrestens temperatur. Men lagrets utformning och skillnader mellan lager har också betydelse för temperaturen i lagret.

Brunnens storlek har betydelse för temperaturen i lagret eftersom den dels påverkar proportionerna mellan brunnens volym och dess yta (bottenplatta, väggar samt gödselyta) och dels uppehållstiden i brunnen. Hos en mindre och/eller grundare brunn är brunnens yta större i förhållande till dess volym än vad den är hos en större och/eller djupare brunn. En relativt stor yta innebär också större värmeförluster från brunnen genom dess ytor, förutsatt att omgivningens temperatur är lägre än temperaturen i lagret. Figur 10 visar hur brunnens volym kan påverka den beräknade temperaturen i lagret, och att värmeförlusterna beräknas vara högre ju mindre brunnen är. Uppehållstiden i brunnarna är den samma i alla alternativ, vilket innebär att den dagliga tillförseln av rötrest är lägre i den mindre brunnen än i den större brunnen. Om istället den dagliga tillförseln av rötrest är den samma i alla brunnar blir resultatet ett annat (se Figur 11). I den mindre brunnen kommer då effekten av att en större mängd sval rötrest dagligen ersätts av varmare rötrest överskugga effekten av att värmeförlusterna genom ytorna är något större.



Figur 10: Brunnsstorlekens inverkan på temperaturen i lagret. Samma uppehållstider i brunnarna som i grundalternativet



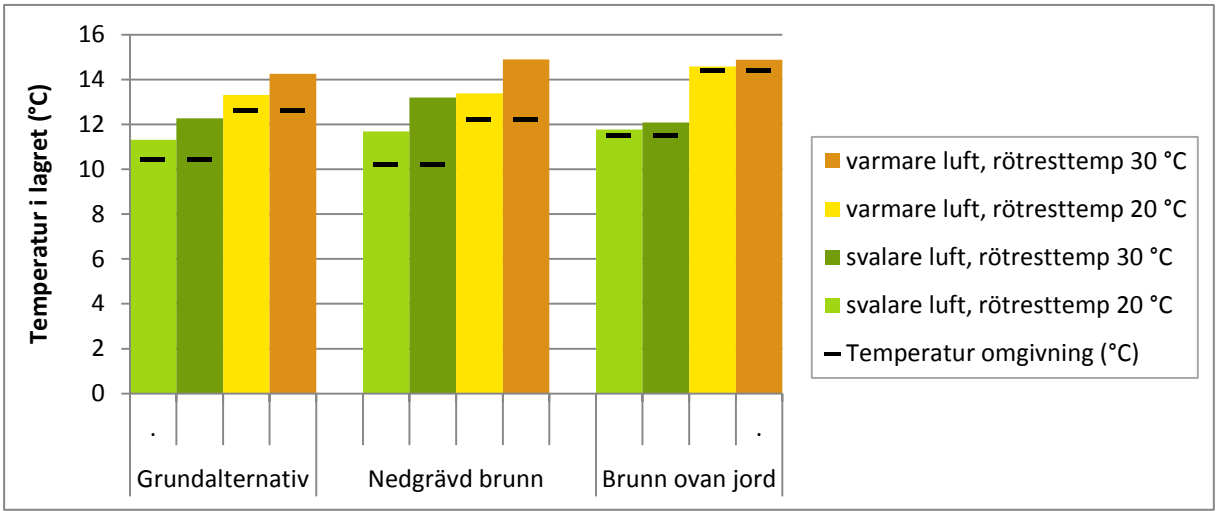
Figur 11: Brunnsstorlekens inverkan på temperaturen i lagret. Den dagliga tillförseln av rötrest är den samma i alla alternativ, och därmed är uppehållstiden i den mindre brunnen kortare än i den större brunnen.

Brunnens placering påverkar också temperaturen i lagret. Omgivningens temperatur och brunnens U-värde kommer nämligen skilja sig åt beroende på brunnens placering, och dessa faktorer har också gemensamma nämnare. En viktig aspekt som berör båda dessa faktorer är hur stor del av brunnen som ligger under markytan. Marktemperatur varierar mindre över året än vad lufttemperaturen gör. Marken är svalare än luften under sommaren, men ofta varmare än luften vintertid. Sommartid är temperaturskillnaden mellan lagret och marken därmed större än temperaturskillnaden mellan lagret och luften (i alla fall enligt de förutsättningar som gäller för dessa beräkningar). Ju större temperatur-skillnad desto större värmeförluster. Så värmeförlusterna sommartid kan därmed vara större från en brunn som är mer nedgrävd än om en större del av brunnen varit ovan jord. Men marken har också bättre isoleringsförmåga än luften, vilket dämpar värmeförlusterna från de nedgrävda delarna av brunnen.

I Figur 12 ges ett räkneexempel där brunnen är mer eller mindre nedgrävd och hur detta beräknas påverka temperaturen i lagret. Alla andra parametrar, så som volym, brunnens proportioner, mängd tillförd rötrest per dygn etc., är lika i alternativen. I grundalternativet är brunnen till stor del nedgrävd.

I alternativet med nedgrävd brunn är brunnens U-värde (här uppskattat till 0,5 istället för 0,8 W/m², °C) bättre tack vare att all rötrest lagras under markytan och att hela väggpartiet därmed isoleras av marken. Mer värme från den tillförda rötresten kan då stanna kvar i lagret. Det märks på att en förändring av den tillförda rötrestens temperatur får ett större genomslag om brunnen är nedgrävd än i grundalternativet. Men effekten av bättre isoleringsförmåga motverkas av att den genomsnittliga omgivande temperaturen är något lägre än i grundalternativet eftersom marken är svalare än luften (här antas att marktemperaturen är 7 °C) och en större del av brunnen exponeras mot marken än i grundalternativet. Om det varit större skillnad i U-värde och omgivningens temperatur jämfört med grundalternativet, t.ex. om mindre andel av brunnen i grundalternativet hade varit nedgrävd, skulle temperaturen i lagret i den nedgrävda brunnen varit lägre än i grundalternativet.

Alternativet med en brunn som inte är nedgrävd har sämre U-värde än grundalternativet (här uppskattat till 0,5 istället för 0,8 W/m², °C) p.g.a. att marken inte isolerar väggelementen. Värmeförlusterna från denna brunn kan då vara högre än i grundalternativet. Det märks på att temperaturen i lagret följer omgivningens temperatur i större grad än vad den gör i grundalternativet. Dessutom har den tillförda rötrestens temperatur liten betydelse för temperaturen i lagret jämfört med situationen i grundalternativet. Men samtidigt är omgivningens genomsnittliga temperatur högre än i grundalternativet eftersom en större del av brunnen exponeras mot luften, vilket bromsar värmeöverföringen mellan lager och omgivning. I detta räkneexempel slår omgivningens temperatur igenom så att temperaturen i lagret i de flesta fall blir högre i den icke-nedgrävda brunnen än i grundalternativet.



Figur 12: Effekt på temperaturen i lagret beroende på om brunnen är nedgrävd eller inte. I grundalternativet är brunnen delvis nedgrävd. "rötresttemp" är temperaturen på tillförd rötrest.

Slutsatser om temperatur i lagret

Temperaturen på rötresten som tillförs rötrestlagret har viss betydelse för temperaturen i lagret, MEN sambandet är olika starkt för olika brunnar och olika situationer. Det beror på att andra parametrar har stor betydelse för sluttemperaturen i lagret och att de kan uppvisa stor variation. En sådan parameter är omgivningens temperatur som har avgörande betydelse för värmeöverföringen mellan lagret och omgivningen. Omgivningens temperatur varierar dessutom över året och inom landet, och bidrar därmed till temperaturvariationen i lagret över tid. Andra viktiga parametrar är brunnens utformning (inklusive isoleringsförmåga) och dess storlek i förhållande till tillförseln av rötrest. Lång uppehållstid (d.v.s. att den återkommande tillförseln av rötrest är liten jämfört med den redan lagrade mängden rötrest) och relativt dålig isolering av brunnen medför att temperaturen på tillförd rötrest har marginell betydelse för temperaturen i lagret. Varje brunn har dessutom sina givna förutsättningar vad gäller storlek, placering, omgivningens temperatur etc., och sluttemperaturen i olika brunnar kommer därmed att skilja sig åt även om de tillförs rötrest med samma temperatur.

I de beräkningar som gjorts i detta kapitel har vi utgått från att rötrestnivån i lagret är konstant. I praktiken varierar dock mängden rötrest i lagren över tid, och därmed även hur stor inverkan den tillförda rötesten har på temperaturen i lagret. När lagret har tömts och rötrestnivån i lagret är låg kommer varm nytillförd rötrest att höja temperaruten i lagret mer än om lagret varit välfyllt, vilket beräknas ge något mer metan per kg VS som lagras. Å andra sidan är mängden VS i det tömda lagret klart lägre än i ett välfyllt lager, vilket har större betydelse för den totala mängden metan som bildas.

Visst kan det i miljötillståndssammanhang vara lockande att sätta gränsvärden för högsta tillåtna temperatur på rötrest som tillförs ett lager i syfte att minska metanförlusterna från lagret. Villkoret är kvantifierbart och möjligt att följa upp, men dess verkliga betydelse för metanförlusterna från lagret är svagt och inte entydigt. Dessutom har sådana gränsvärden satts generellt utan hänsyn till lagrens utformning, omgivningens temperatur och biogasanläggningarnas rötrestproduktion. Det saknas dock stöd i litteraturen och i de förenklade beräkningar vi kunnat göra för att det skulle finnas en sådan allmängiltig gräns.

Andra åtgärder, så som att minska mängden VS i lagret speciellt under varma perioder eller att förbättra utrötningsgraden, beräknas ha mycket större effekt på metanproduktionen i rötrestlagren, och borde därmed prioriteras. Dessa åtgärder kommer dessutom alltid ha effekt på metanproduktionen i lagret oavsett temperatur eller lagrets utformning och placering.

Vi har inte kvantifierat hur metanproduktionen i lagret skulle förändras om temperaturen på tillförd rötrest sänks. Det hade krävt att många fler parametrar hade beaktats och de skulle kunna överskugga effekten av sänkt temperatur på tillförd rötrest. Dessutom hade mer avancerade beräkningsmodellerna behövts som beskriver hur temperaturen i lagret och värmeutbytet med omgivningen påverkas när omgivningens temperatur och mängden rötrest lagret varierar. Den modell som används här gäller vid en konstant rötrestnivå i lagret och så länge temperaturen i omgivningen inte förändras. Vår bedömning är att temperaturen på tillförd rötrest har viss betydelse för temperaturen i lagret, men att andra åtgärder så som fler spridningstillfällen eller förbättrad utrötningsgrad har potential att minska metanproduktionen i lagren mer än vad kylning av tillförd rötrest har. Dessa åtgärder har även bestående effekt eftersom de innebär att den genomsnittliga mängden VS i lagret blir mindre och/eller att den VS som lagras har lägre potential att bilda metan. Temperaturen i lagret kommer däremot att påverkas t.ex. av skiftningar i omgivningens temperatur, och kylning av utgående rötrest har inte därmed inte samma beständiga effekt på metanproduktionen i lagret.

Vi bedömer att kostnaderna för att sänka temperaturen på utgående rötrest är höga jämfört med andra åtgärder som diskuterats i denna rapport.

Referenser

Berglund, M. 2014. Utsläpp från lagring av gödselbaserad rötrest - Rapport i projektet ”Utvärdering av biogasanläggningar på gårdsnivå”. Hushållningssällskapens Förbund

Lund Hansen T, Sommer S G, Gabriel S & Christensen T H. 2006. Methane production during storage of anaerobically digested municipal organic waste. Journal of Environmental Quality 35: 830-836.

Linke B, Muha I, Wittum G & Plogsties V. 2013. Mesophilic anaerobic co-digestion of cow manure and biogas crops in full scale German biogas plants – A model for calculating the effect of hydraulic retention time and VS crop production in the mixture on methane yield from digester and from digestate storage at different temperatures. Bioresource Technology 130: 689-695

Sommer S G, Petersen S O & Møller H B. 2004. Algorithms for calculating methane and nitrous oxide emissions from manure management. Nutrient Cycling in Agroecosystems 69: 143–154

Rodhe L, Ascue Contreras J, Tersmeden M, Ringmar A & Nordberg Å. 2008. Växthusgasemissioner från lager med nötflytgödsel. Rapporter lantbruk och industri, R 370. JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik

Rodhe L, Ascue J, Tersmeden M, Willén A, Nordberg Å, Salomon E & Sundberg M. 2013. Växthusgas från rötad och rötad nötflytgödsel vid lagring och efter spridning – samt bestämning av ammoniakavgång och skörd i vårkorn. JTI-rapport 2013, Lantbruk & Industri nr 413. JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik

Namn Namnsson
www.hushallningssallskapet.se | 035-465 00 | infohalland@hushallningssallskapet.se

Hushållnings sällskapet