

JTI-rapport

Lantbruk & Industri

357

Torrötning

– kunskapssammanställning och
bedömning av utvecklingsbehov

Ulf Nordberg
Åke Nordberg



JTI - Institutet för jordbruks- och miljöteknik

2007

Torrötning

– kunskapssammanställning och
bedömning av utvecklingsbehov

Ulf Nordberg
Åke Nordberg

Innehåll

Förord.....	5
Sammanfattning	7
Inledning	10
Syfte.....	10
Omfattning och avgränsning.....	10
Grundförutsättningar för våt- och torrrotning	11
Miljöfaktorer som påverkar biogasprocessen	15
Våt- och torrrotning – principer och indelning	16
Våtrötning	16
Torrrotning	18
Satsvisa processer	19
Kontinuerliga processer	23
Substratmängder och potential för torrrotning.....	25
Tidigare potentialberäkningar av rötbara substrat.....	25
Kategorisering av lämpliga substrat för torrrotning	25
Potential – mängder och gasutbyten.....	26
Gödsel.....	26
Skörde- och foderrester	29
Park och trädgårdsavfall	29
Energigrödor.....	29
Sammanfattning av potential för torrrotning	30
Biogasproduktion i Sverige	30
Torrrottningsanläggningar i Sverige.....	31
Jämförelse mellan torrrotning och våtrötning	33
Substrat.....	34
Lagring, förbehandling och inblandning samt ympning	35
Lagring av substrat	35
Förbehandling.....	35
Inblandning av ympmaterial och inmatning av substrat.....	36
Uppvärmning.....	38
Den biologiska processen och gasproduktion	39
Efterbehandling, rötrestlagring och spridning.....	42
Säkerhet, emissioner och lukt.....	43
Ekonomiska kalkyler.....	43

Beskrivning av de tekniker som jämförs	44
Investeringar	46
<i>Byggnad</i>	46
<i>Teknik inklusive el- och gasteknik</i>	46
<i>Planering, tillstånd och igångsättning</i>	46
Kapital- och driftskostnader	46
Grundförutsättningar för de ekonomiska kalkylerna.....	47
Resultat av ekonomiska beräkningar	48
Diskussion ekonomiska kalkyler	51
Utvecklingsbehov	52
Litteratur	55
Bilaga 1. Exempel på kommersiella torrötningskoncept och leverantörer	59

Förord

Följande studie har genomförts inom ramen för Stiftelsen Lantbruksforskning och Energimyndighetens FUD-program (forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram) för bioenergi.

Produktion och användning av biogas har under de senaste åren ökat och inom jordbruket finns en rad råvaror som lämpar sig för rötning. Torrötning erbjuder en rad tekniska fördelar jämfört med våtrötning när fasta, staplingsbara material ska rötas. Mot bakgrund av det stigande intresset hos svenska lantbrukare för biogas samt att det för närvarande pågår utveckling och implementering av torrötning i Tyskland har denna kunskapssammanställning gjorts och behov av utvecklingsinsatser identifierats.

Projektet har löpt under perioden 2007-04-01 till 2007-08-31 och genomförts av Åke Nordberg (projektledare), Ulf Nordberg och Mats Edström samtliga från JTI – Institutet för miljö- och jordbruksteknik. Till arbetet har en referensgrupp varit knuten som har bestått av Ove Litorell (Fjäderfäcentrum), Kurt Hansson (Gasilage AB), Artur Granstedt (Stiftelsen Biodynamiska institutet) och Kjell Christensson, (Agellus, LTH).

Till samtliga, som medverkat och lämnat uppgifter till projektet, vill vi framföra ett varmt tack.

Uppsala i september 2007

Lennart Nelson

VD för JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik

Sammanfattning

Torrrotning erbjuder en rad tekniska fördelar jämfört med våtrotning när fasta, staplingsbara material ska rötas. Inom jordbruket finns en rad fasta råvaror lämpliga för rotning, t.ex. grödor, skörderester/biprodukter och gödsel (nöt, svin, fjäderfä, häst). Mot bakgrund av det stigande intresset hos svenska lantbrukare för biogas samt att det för närvarande pågår utveckling och implementering av torrrotning i Tyskland har denna kunskapssammanställning gjorts med syfte att beskriva utvecklingsläget för torrrotning och göra en teknisk och ekonomisk jämförelse mellan våt- och torrrotning samt identifiera framtida behov av forskning, utveckling och demonstration inom området.

Rötningstekniken kan indelas i våta och torra processer. Med våt process menas generellt rotning av flytande och pumpbara substrat där TS-halten i rötammaren är ca 2-10 viktprocent. Med torr process menas generellt rotning av stapelbara substratblandningar där TS-halten i rötammaren är ca 20-35 viktprocent. I Tyskland finns uppskattningsvis drygt 300 torrrottningsanläggningar och i Sverige finns för närvarande två anläggningar baserade på jordbruksråvaror. Beräkningar i denna studie visar att fastgödsel, skörderester och park- och trädgårdsavfall, dvs. material lämpliga för torrrotning, kan motsvara ungefär 4,6 TWh årligen. Till detta kan ytterligare mellan 2 och 4 TWh komma från energigrödor vid odling av 100 000 ha för energiändamål. Detta skulle sammantaget motsvara ungefär 6-9 TWh per år. Den sammanlagda biogasproduktionen i Sverige är för närvarande ca 1,3 TWh per år.

Genom åren har ett flertal koncept utvecklats för torrrotning. Processen kan vara satsvis eller kontinuerlig och vidare kan indelning ske i undergrupper för antalet faser och reaktortyper. Kontinuerliga processer har utvecklats för avfallsbehandling, men i Tyskland är det mest tillämpade konceptet inom lantbruket *satsvis perkolationsbädd* i uppvärmda garageliknande rötammare där in- och urlastning sker med traktor eller hjullastare genom en gastät port på reaktorns kortsida.

Fördelar med torrrotning omfattar bl.a. att gårdens befintliga maskinpark för stapelbara material kan användas vid hantering. Vidare krävs ingen omfattande sönderdelning och inslag av eventuella störande ämnen som jord, sand, sten, trä m.m. påverkar inte hantering och materialtransport på samma sätt som vid våtrotning. De relativt små vätskemängder som cirkuleras vid torrrotning kräver mindre dimensioner på rör och pumpar och lägre elåtgång. Lagring och transport av material och rötrest blir också effektivare eftersom vattenhalten är mindre än vid våtrotning.

Vid torrrotning i satsvisa system sker inlastning av nytt röttningsmaterial i varje rötammare ca en gång per månad. Arbetsinsatsen blir stor vid dessa tillfällen, medan det vid våtrotning krävs en viss daglig insats om inte automatiseringen är hög. Vid satsvis torrrotning måste ymp blandas in i samband med inläggning av nytt material i rötammaren. Mängden beror på materialets egenskaper och omsättbarhet och en väl fungerande blandning av ymp och substrat krävs för att erhålla bra förutsättningar för effektiv nedbrytning. Vid stora mängder ymp nyttjas inte rötammarens volym lika effektivt. Ympning kan även ske vid cirkulation av vätska via en separat rötammare, t.ex. ett anaerobt filter.

Vid satsvis torrötning med perkolation är bäddens struktur viktig för att man ska få en god utrötning. Kanalbildning kan orsaka ojämn fördelning av värme och begränsad kontakt mellan mikrober och substrat, vilket ger ett lägre gasutbyte. Försök har dock visat att metanutbytet kan vara i samma storleksordning som vid våtrötning. Vid torrötning erhålls en fast rötrest och ett överskott av vätska som kan spridas som en flytande rötrest.

Dokumentation av driftsanläggningar med torrötning har hittills tyvärr varit knapphändig. Avsaknaden av uppföljning gör att tillförlitliga ekonomiska uppgifter är svåra att få tag i. De firmor som marknadsför torröttningsanläggningar lämnar inte gärna ifrån sig kostnadsuppgifter av konkurrensskäl. En modellkalkyl från FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V, Tyskland, har använts i denna studie omfattande fyra koncept; satsvis med perkulation, satsvis med perkulation och aerob förbehandling; kontinuerlig pluggflödesrötning med cirkulation av perkolatvätska och traditionell våtrötning. Våtrötning ger lägre produktionskostnader än torrötning både för fastgödsel och för majsensilage. Generellt gäller att med ökad produktionskapacitet minskar produktionskostnaden samt att skillnaden mellan de olika koncepten minskar. För fastgödsel och den största anläggningen (11 000 ton per år) visar grundkalkylen ett spann för produktionskostnaden på 0,31-0,48 kr/kWh. Med ett investeringsstöd på 30 % blir produktionskostnaden 0,28-0,42 öre/kWh och om man dessutom förutsätter en potential i att minska investeringskostnaden med 25 % för torrötning så blir produktionskostnaden 0,28-0,38 kr/kWh. För majsensilage blir produktionskostnaden 0,47-0,53 kr/kWh i grundkalkylen för den största anläggningen. Enligt beräkningar baserat på uppgifter från FNR Ergebnisse des Biogas-Messprogramms (2005) är produktionskostnaden i spannet 0,15-0,52 kr/kWh. I detta fall finns även betydligt större anläggningar med, vilket ger lägre produktionskostnader.

Våtrötningstekniken har utvecklats under en betydligt längre tid jämfört med torrötning, vilket delvis kan förklara att våtrötning ger en lägre produktionskostnad. En vidareutveckling av torrötning kräver en rad olika forsknings-, utvecklings- och demonstrationsinsatser.

Förutsättningar för samverkansanläggningar, där det finns stora ekonomiska skal fördelar för hantering, röttningsanläggning och förädling av biogas, är ett område där fortsatt utrednings- och utvecklingsarbete bör ske. Vidareutveckling av ekonomiska beräkningsmodeller där hänsyn kan tas till lokala förutsättningar för att finna möjligheter till ökad lönsamhet är nödvändig. För att öka erfarenhetsbasen i Sverige skulle en samverkansanläggning för demonstration av torrötning vara mycket värdefullt. Studierna bör även omfatta ägande- och organisationsformer. Nätverkande bland aktörer inom området är viktigt och bör gynnas för att sprida kunskap och dela erfarenheter.

En kontinuerlig bevakning av utvecklingen i Tyskland som förutses fortsätta är viktigt ur ett svenskt perspektiv. Översättning av de utvärderingar och rapporter som produceras till svenskt informationsmaterial är en betydelsefull del i kunskaps-spridningen om tillgänglig teknik.

Utveckling av effektiva berednings- och inblandningstekniker av ymp och substrat i syfte att åstadkomma en textur och struktur med goda perkolationsegenskaper är ett viktigt moment för att få en jämn utrötning i satsvisa system. Vidare finns behov av studier kring optimala mängder ymp för olika substrat och substratblandningar samt tvåstegsrötning där inympning kan snabbas på och hydrolysen optimeras.

Aerob förbehandling är ett sätt att initialt skapa en jämn värmefördelning samt att undvika en kraftig pH-sänkning då lättomsättbara substanser omsätts. Utveckling med fokus på lämplig lufttillförsel och kontrollerbar temperaturökning bör därför ske.

Flexibla och enkla koncept, t.ex. torrötning i plastslangar, som medger låga investeringskostnader är av stort intresse för att sänka produktionskostnaden. Viktiga frågeställningar i utvecklingen av denna typ av koncept är uppvärmningssystem, isolering, gasuppsamling samt hantering av pressvätska.

Dränkta bäddar är ett system som skapar en jämn fördelning av ymp och värme men tillåter samtidigt en hög torrsustanshalt i rötchammaren. Studier kring detta koncept kan t.ex. omfatta substrat med sämre perkolationsegenskaper samt system baserade på uppflöde av processvätska genom bädden.

Utveckling av system och driftsstrategier för att styra gasproduktionen till tider med högt behov av energi kan ge ekonomiska fördelar. Vid satsvis rötning sker rötningen sekventiellt för att åstadkomma en så jämn gasproduktion som möjligt. Beroende på vilken form av avsättning gasen har bör olika driftsstrategier kunna utvecklas för att på så sätt optimera inkomsten vid försäljning av el, värme eller gas.

Vid rötning av kväverika material (t.ex. fjäderfägödsel samt kväverika grödor som gräs/klöver) finns risk att ammoniumhalten blir hög och därmed hämmar processen. Driftsstrategier för substratblandningar samt tekniker för att avskilja ammonium från processvätskan till en lämplig form för spridning på åkern bör utvecklas.

Vid rötning av ensartade material, t.ex. enbart energigrödor, visar erfarenheten att processtörningar kan uppkomma efter en längre tids drift. Detta beror ofta på brister i näringsammansättningen och studier för att kartlägga och kunna tillföra essentiella näringsämnen är viktiga i dessa fall.

Efterbehandling av den utrötade massan kan behövas för att nå hygieniserings-effekter samt en bra lagringsbarhet. Olika tekniker för att åstadkomma bästa miljömässiga och ekonomiska teknik för rötrestlagring bör studeras och hur hantering och spridning av rötrest sker på bästa sätt. Vidare bör orienterande fältförsök för bedömning av växtnäringsvärde och effekter av rötrest från torrötning utföras.

Kartläggning av emissioner av ammoniak, metan och lustgas i samband med hantering och lagring i framförallt satsvisa system bör göras. Vidare bör åtgärder för att minimera emissioner av växthusgaser studeras.

Inledning

Den konventionella och dominerande tekniken för rötning av organiskt material till biogas utgörs av slambaserade processer med relativt låga torrsubstanshalter, s.k. våtrötning (2-10 % TS), där masstransport sker genom pumpning. Denna teknik lämpar sig väl för flytande och pumpbara material t.ex. flytgödsel och slam från reningsverk. Vid rötning av material med högre torrsubstanshalt (t.ex. fast avfall, fastgödsel, skörderester och energigrödor) måste en utspädning ske med vätska för att möjliggöra våtrötningsteknik. Detta innebär att de volymer som måste hanteras ökar kraftigt, vilket blir kostsamt både med avseende på lagring och med avseende på transport av den rötade restprodukten. Ett sätt att skapa vattensnåla processer är att tillämpa s.k. torrrotning vid torrsubstanshalter mellan ca 20 och 35 %. Den ökade torrsubstanshalten i rötkammaren innebär principiellt att rötkammarvolymen skulle kunna utnyttjas effektivare vilket kan medföra att rötkammarkostnaden per rötad mängd substrat minskar. Dessutom kan problem med skumning och svämtäcken undvikas.

De tidigaste koncepten för torrrotning byggde på satsvisa system med perkolation av vätska i en laktbädd, men under 1980- och 90-talet har tekniker för kontinuerliga röttningsprocesser utvecklats, framförallt för den organiska delen av hushålls- och trädgårdsavfall. Om man ser till den totala andelen av biogasanläggningar i drift i Tyskland svarar torrrottningsanläggningarna för en mycket liten del, men tendensen de senaste åren har varit att intresset för torrrotning av energigrödor (t.ex. majsensilage) ökat eftersom det utgår en s.k. teknologibonus med 2 euro-cent/kWh_{el} i det pris man får för levererad elström (FNR Ergebnisse des Biogas-Messprogramms, 2005)

Torrrotning kan alltså erbjuda en rad tekniska fördelar jämfört med våtrötning när fasta, staplingsbara material ska rötas. Med det stigande intresset hos svenska lantbrukare för biogas samt att det för närvarande pågår utveckling och implementering av torrrotning i Tyskland finns det därför anledning att sammanställa de erfarenheter som hittills kommit fram avseende torrrotning och att jämföra förutsättningarna för kostnadseffektivitet i förhållande till våtrötning. Vidare behöver tekniska begränsningar identifieras för att klarlägga framtida utvecklingsbehov.

Syfte

Syftet är att beskriva utvecklingsläget för torrrotning och göra en teknisk och ekonomisk jämförelse mellan våt- och torrrotning samt identifiera utvecklingshinder och framtida behov av forskning, utveckling och demonstration inom området.

Omfattning och avgränsning

Denna studie omfattar de substrat, dvs. råvaror för rötning, som är speciellt lämpliga för torrrotning och som i första hand produceras eller erhålls på lantbruk eller närliggande verksamhet, t.ex. grödor, skörderester/biprodukter, fast gödsel (nöt, svin, fjäderfä, häst, får). Fasta avfall från samhället liksom animaliska restprodukter från slakterier tas inte upp i denna rapport. Studien fokuserar på att beskriva

tekniska koncept och förutsättningar för torrrotning. Vissa tekniska jämförelser med våtrotning görs och i de ekonomiska kalkylerna jämförs våtrotning med olika torrrotningkoncept. I de ekonomiska kalkylerna görs beräkningar och bedömningar på produktionskostnaden av rågas. Kostnader för vidare konvertering av gas till el, värme och fordonsgas beräknas inte i denna studie utan hänvisning sker till de beräkningar som utförs inom SLF-projekten ”Gårdsbaserad biogas” (V0640026) och ”Lönsam produktion av kraftvärme från gårdsbaserad biogas” (V0640003) samt Fjäderfäcentrums rapport ”Produktion av biogas från fjäderfä-gödsel”.

Grundförutsättningar för våt- och torrrotning

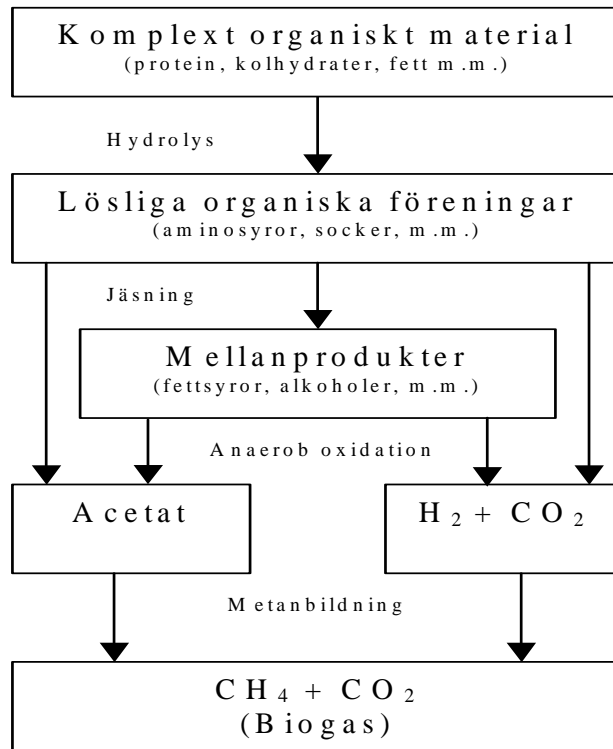
Den grundläggande biologiska processen som nyttjas vid anaerob nedbrytning är densamma oavsett vilken rötningsteknik som används.

Det är under anaeroba förhållanden som mikroorganismer omvandlar organiskt material till biogas. Gasen består av främst metan och koldioxid, och beroende på materialet som rötas så varierar metanhalten mellan 45 och 85 % och koldioxidhalten mellan 15 och 45 %. Hur väl nedbrytning och gasproduktion fungerar beror bl.a. på substratsammansättning, temperatur samt mikroorganismfloran och dess tillväxthastighet. Förenklat kan processen beskrivas i olika steg där komplext organiskt material bryts ner med hjälp av mikroorganismer till mindre molekyler i flera steg (figur 1).

Cellulosa, fett och protein m.m. hydrolyseras till mindre beståndsdelar med hjälp av enzymer som utsöndras av hydrolytiska bakterier. Samma slags bakterier och ytterligare andra fermenterar sedan hydrolytprodukterna till flyktiga fettsyror. De flyktiga fettsyrorna omvandlas i sin tur till ättiksyra samt väte och koldioxid av ättiksyrabildare. I det sista nedbrytningssteget, metanbildningen, omvandlas ättiksyra samt väte och koldioxid till slutprodukterna metan och koldioxid av metanbildande mikroorganismer.

Hydrolytsteget och metanbildningen är hastighetsbegränsande i den anaeroba nedbrytningen. En långsam hydrolys innebär en långsam bildning av ättiksyra samt vätegas och koldioxid, de produkter som metanbildarna behöver för att bilda biogas. En långsam metanbildning innebär risk för ackumulering av flyktiga fettsyror. Om ackumuleringen av flyktiga fettsyror pågår tillräckligt länge sjunker pH vilket i sin tur kan hämma de metanbildande mikroorganismerna ytterligare.

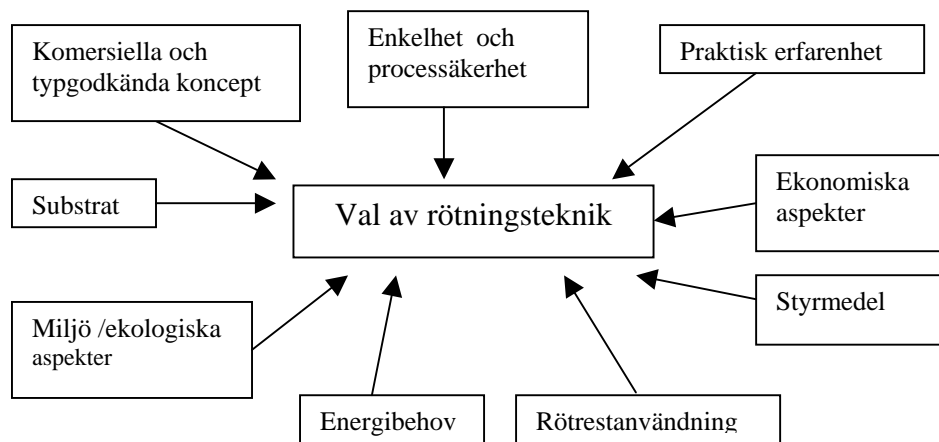
Mikroorganismfloran kan anpassas till olika substrat och situationer men sådana anpassningar tar lång tid och måste ske gradvis. En plötslig förändring av processmiljön som varar under en längre period (dagar) kan innebära att processen störs och metanbildningen minskar.



Figur 1. Schematisk bild över anaerob nedbrytning (Efter Zinder, 1984)

Vid tillämpning av biogasprocessen kan hela nedbrytningsvägen ske i en rötchamre, s.k. enstegsrötning. Vid tvåstegsrötning sker hydrolys och syrabildning huvudsakligen i den första rötchamren och metanbildning i den andra rötchamren.

Olika tekniker och koncept för rötning har utvecklats beroende på att de använda rötningråvarorna har olika karaktärstik avseende sammansättning, fukthalt, nedbrytningsgrad, struktur mm. Valet av rötningsteknik beror även av andra faktorer (fig. 2)



Figur 2. Exempel på faktorer som påverkar val av rötningsteknik.

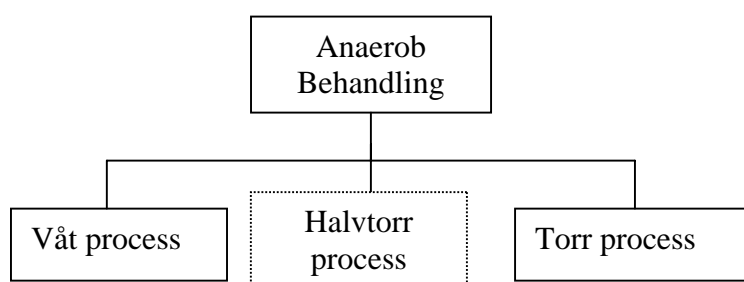
Den övergripande indelningen av olika rötkammarbaserade rötningstekniker kopplas ofta till torrsubstanshalten (TS-halten) i rötkammaren (fig. 3). För att grovt särskilja processerna delas de in i våta och torra processer. Med våt process menas generellt rötning av flytande och pumpbara substrat där TS-halten i rötkammaren är ca 2-10 viktprocent. Med torr process menas generellt rötning av stapelbara substratblandningar där TS-halten i rötkammaren är ca 20-35 viktprocent. I Tyskland har Bundesumweltministerium (BMU) definierat begreppet torrötning eftersom det utgår en teknologibonus när tekniken används. Denna definition innebär att:

- Substraten ska vara stapelbara med en medelvattenhalt på maximalt 70 %. Ensilage av majs, gräs och andra energigrödor får ha en vattenhalt över 70 %
- Den organiska belastningen ska minst vara 3,5 kg VS (organiskt material) per kubikmeter reaktorvolym och dag.
- Halten flyktiga fettsyror, uttryckta som ättiksyra-ekvivalenter får högst vara 2000 mg per liter.

Begreppet ”torr process” kan vara något missvisande eftersom det inte avser en process där TS-halten i processen är i nivå med torkad, lagringsbar biomassa (t.ex. hö eller spannmål). Beteckningen får ändå anses som gängse och används även i andra språk, t.ex. ”dry fermentation” (engelska) och ”trockenfermentation” (tyska).

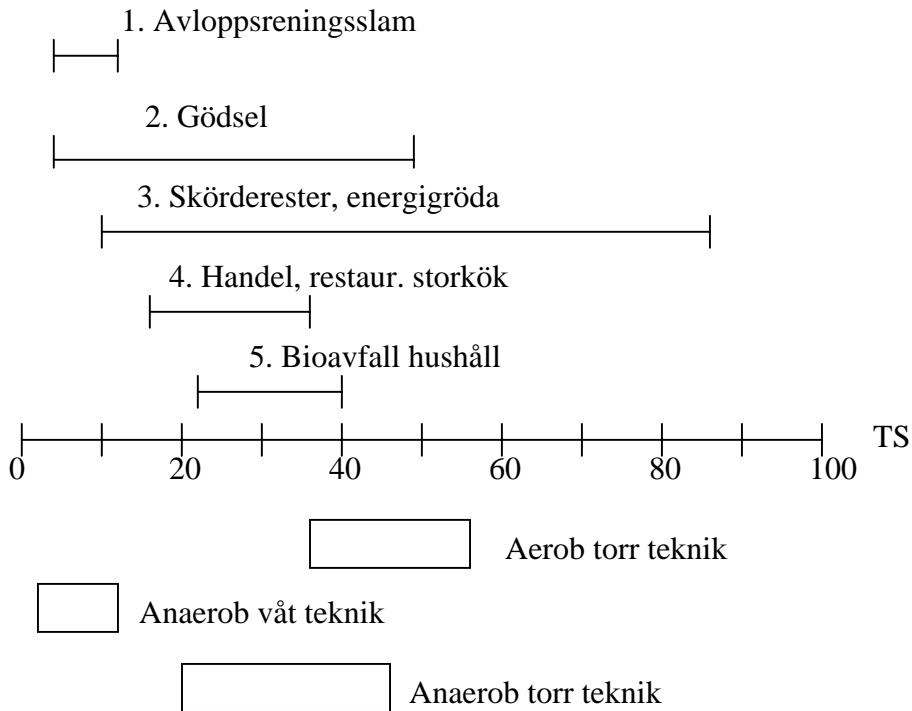
Vidare bör påpekas att våtrötning av substrat med höga TS-halter kan ske om de späds med vatten eller processvätska. Däremot sker inte torrötning av flytande eller pumpbara substrat.

Begreppet ”halvtorra röttningsprocesser” förekommer ibland och då avses TS-halter mellan ca 10 och 20 %. I dessa fall kan konsistensen liknas vid kletgödsel, dvs. trögflytande och med viss mängd fri vätska. Detta begrepp förekommer dock sällan bland de rötningstekniker och koncept som marknadsförs.



Figur 3. Indelning av rötningstekniker baserade på TS-halten i rötkammaren.

Behandlingstekniskt kan det organiska materialet hanteras på olika sätt beroende på syftet med behandlingen. I figur 4 görs en schematisk beskrivning av olika materials variationer i TS-halt samt lämpligheten för olika behandlingar. Aerob torr teknik, dvs. kompostering kan användas om syftet är att stabilisera organiskt material, t.ex. avfall, men omfattas inte vidare i denna rapport.



Figur 4. Indelning av olika substrat efter TS-halt.

Förutom variation i TS-halt varierar substrat för rötning även med avseende på struktur. Beroende på struktur och TS-halt kan substraten härledas till olika behandlingstekniker. De substrat som normalt kan komposteras kan även rötas i en torrrottningsanläggning. En mycket grov indelning av substrat efter struktur visas i figur 5.

Ris och buskar

Jordbruksrester

Trädgårdsavfall

Fastgödsel

Organiskt verksamhetsavfall

Bioavfall hushåll

Matrester hushåll

Restaurang o storköksavfall

Slaktavfall

Gödsel

Slam

← Grövre materialstruktur

Figur 5. Indelning av olika material efter struktur.

Miljöfaktorer som påverkar biogasprocessen

Eftersom biogasprocessen är en biologisk process så påverkas den av en rad miljöfaktorer. Dessa redogörs kort för nedan.

Näringsinnehåll och inhiberande substanser. Den näring som mikroorganismerna behöver för att vara aktiva kommer normalt från det substrat som ska rötas. Mikroorganismerna behöver kol, kväve och fosfor samt mikronäringsämnen, vitaminer och spårelement för tillväxt. Vidare är förhållandet mellan kol- och kväveinnehåll i substratet viktigt. En kvot uppemot 30 brukar anges som gynnsamt (Hawkes, 1980). En lägre C/N-kvot än 10-15, det vill säga överskott på kväve, orsakar höga ammoniumhalter och höga pH-nivåer, vilket kan vara hämmande för mikroorganismerna. Vid högre C/N-kvoter kan den mikrobiella aktiviteten avta pga. kvävebrist. Spårelement (t.ex. kobolt, molybden och nickel) är viktiga för de metanbildande mikroorganismerna och brister kan leda till driftsproblem (Jarvis m.fl. 1997; Richards m.fl. 1991). Flera substanser har i högre koncentration hämmande verkan på mikroorganismerna, dels oorganiska ämnen såsom salter (t.ex. ammonium), klor och peroxider och dels organiska ämnen såsom lösningsmedel, halogenerade aromater m.m. När man rötat substrat med lantbruksursprung är det vanligtvis höga ammoniumhalter som kan orsaka processtörningar.

Ympning. För att erhålla en process med hög nedbrytningseffektivitet måste rätt sorts mikroorganismer finnas närvarande. Vid våtrötning startas processer normalt upp med rötresten från biogasprocesser eller med nötflytgödsel och substrat tillförs därefter rötkammaren kontinuerligt. Vid torrötning sker ofta en inblandning av utrötat material till färskt material eller så ympas materialet gradvis genom cirkulation av processvätska genom torrötningens bädden. Även kombinationer av de två ympningsförfarandena förekommer.

Vattenhalt och masstransport. Vatten är nödvändigt för den anaeroba processen som lösningsmedel för näringsämnen och för att utjämna temperatur och pH. Vid våtrötning förbättras rörligheten för mikroorganismerna och deras kontakt med substratet som ska omsättas. Vid torrötning kan alltför låga vattenhalter leda till nedgång i mikroorganismernas aktivitet pga. begränsningar i masstransport och diffusion (Lay m.fl. 1997). Ett krav på minst 65 % vattenhalt, dvs. maximalt 35 % TS, brukar generellt anges som gräns för att erhålla en bra mikrobiell aktivitet. Jewell m.fl. (1981) konstaterade vid torrötning av energigrödor att TS-halter upp till 30 % inte påverkade nedbrytningsgrad och reaktionshastighet nämnvärt. Vid högre TS-halter sjönk reaktionshastigheten och vid 50 % TS-halt var rötning inte möjlig.

Temperatur. Temperaturen är viktig dels genom att den påverkar mikroorganismernas ämnesomsättning och tillväxthastighet, och dels genom att kemiska jämvikter är temperaturberoende. Tre olika temperaturintervaller brukar anges som lämpliga för rötning (Tchobanoglous m.fl., 1993); psykofil (0-20°C), mesofil (15-45°C) och termofil (45-75°C). Psykofila processer används t.ex. i hushållsrötkammare i vissa delar av Asien, men är ofta ineffektiva pga. låg nedbrytningsaktivitet. Energi-balansen bedöms vara sämre i psykofila processer pga. lågt metanutbyte (Bohn, 2006). Mesofila processer har traditionellt tillämpas mest, men termofila processer får ökad användning, bl.a. för att nedbrytningshastigheten kan vara den dubbla jämfört med mesofil rötning (Mladenovska & Ahring, 2000). Termofila processer kan

dock vara mer känslig för toxiska ämnen, t.ex. höga ammoniumhalter (Angeledaki & Ahring, 1994).

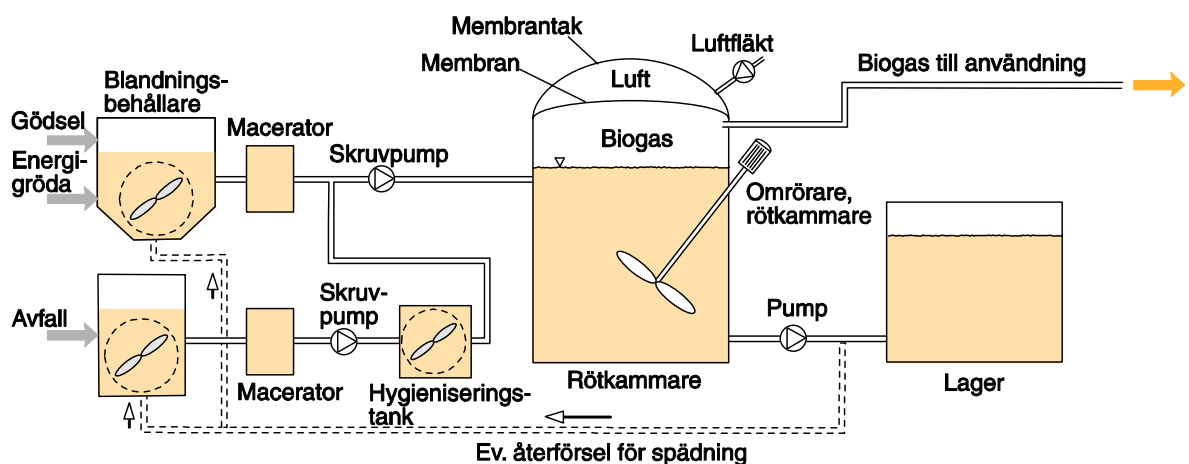
pH och alkalinitet. En balanserad, stabil pH- nivå är viktig för en välfungerande process. Optimalt pH för den anaeroba nedbrytningsprocessen ligger mellan 6,5 och 7,5 (Tchobanoglous m.fl., 1993). Alkalinitet som är ett mått på buffertkapaciteten och därmed förmågan att motstå snabba pH förändringar bör ligga på minst 1000-5000 mg/l.

Våt- och torrrotning – principer och indelning

I följande avsnitt beskrivs olika koncept för torrrotning. För att sätta in torrrotning i ett sammanhang görs inledningsvis en kort beskrivning av principen för våtrötning samt en sammanfattning av rötningserfarenheter i Tyskland (FNR Ergebnisse des Biogas-Messprogramms, 2005; Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung, 2004).

Våtrötning

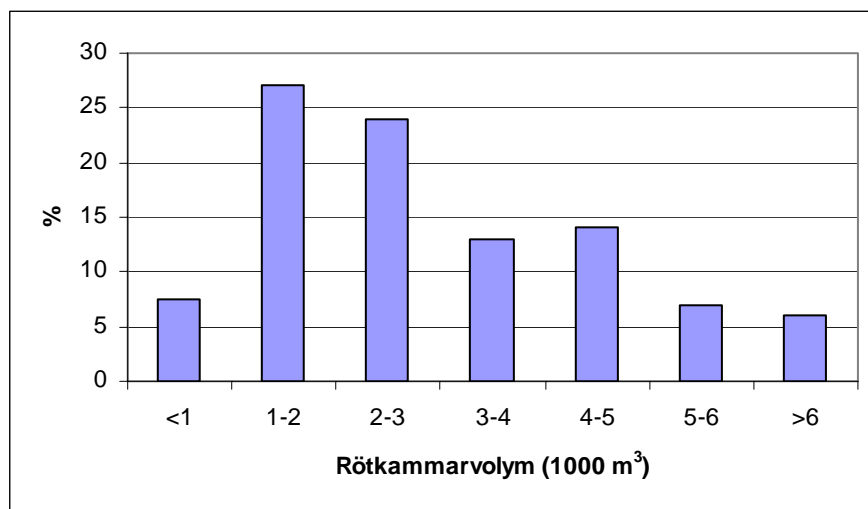
En våtröttningsanläggning består förutom av en röttkammare även av komponenter uppströms och nedströms den biologiska processen. En schematisk anläggningsbeskrivning för våtrötning visas i figur 6. Anläggningen består av en mottagningsdel omfattande lagringsbehållare med ombländning samt eventuellt skärande pump. Vid rötning på gårdsnivå av gödsel, skörderester och energigrödor finns inga behov eller krav på hygienisering. Det är bara i de fall som externt bioavfall tas in som substrat som hygienisering och avskiljning av eventuella orenheter krävs. Inmatning sker upp till flera gånger per dygn beroende på substrat och automatiseringsnivå. Röttkammaren är försedd med omrörare. Vid kontinuerlig drift pumpas materialet i röttkammaren ut i samband med inpumpning eller bräddas ut genom ett bräddavlopp så att volymen hålls konstant. Rötresten lagras i en gödselbehållare eller motsvarande lager vilken kan täckas för att undvika avgång av metangas. Ett mindre gaslager kan vara integrerat med röttkammaren eller vara placerat fristående. Gasen nyttjas sedan för att producera värme (gaspanna) eller kraftvärme (förbränningsmotor). Alternativt kan gasen renas och avyttras eller säljas för extern rening. En brännfackla för bränning av överskottsgas ska finnas.



Figur 6. Principskiss för våtröttningsanläggning.

I Tyskland är det vanligt att 2-3 olika substrat används samtidigt vid rötning. I över 90 % av de nyuppförda våtröttningsanläggningar används gödsel respektive majs som substrat. Vidare förekommer inblandning av spannmål, helsädesensilage och vallensilage (FNR Erbgenisse Des biogas-Messprogramms, 2005)

Variationen på den totala rötkammarvolymen per anläggning är stor. Ungefär två tredjedelar av alla nyuppförda anläggningar (2000-2005) har rötkammarvolym över 2 000 m³ (figur 7). Andelen över 4 000 m³ är ca en tredjedel. Under de första åren under 2000-talet byggdes ungefär lika många anläggningar med enstegsteknik som tvåstegsteknik. Under de senaste åren har över två tredjedelar av alla nya anläggningar som uppförts mer än ett rötningsssteg och drivs i serie. Det första steget belastas relativt högt och de efterföljande får lägre belastning varvid det organiska materialet ska nå en hög nedbrytningsgrad. Mer än 85 % av anläggningarna drivs under mesofila temperaturförhållanden och endast 8 % under termofila förhållanden.



Figur 7. Total rötkammarvolym i nyuppförda anläggningar som används för biogasproduktion (FNR Ergebnisse des Biogas-Messprogramms, 2005).

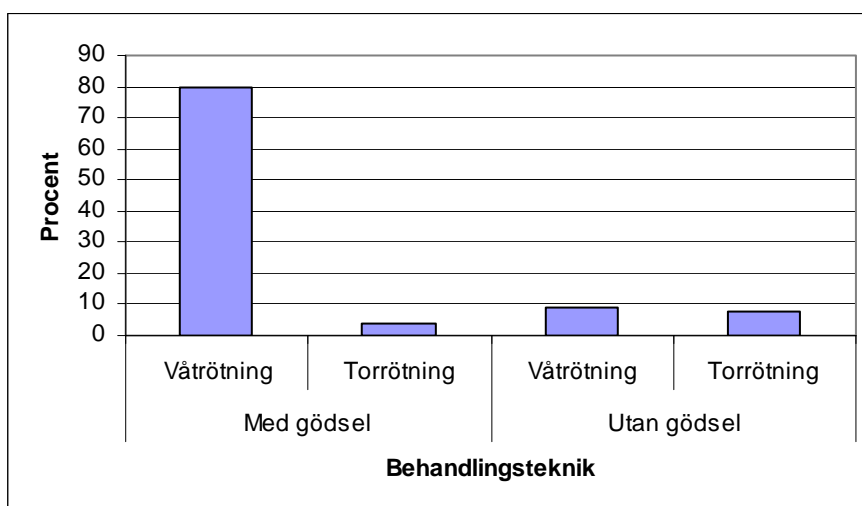
Under de senaste åren har en rad erfarenheter erhållits som kunnat leda vidare till de stora framsteg som gjorts. De problem som uppstått omfattar framförallt planeringsstadiet, fusk vid uppförandet av anläggningarna och fel materialval. I tabell 1 sammanfattas fördelningen av de tekniska funktionsfelen.

Tabell 1. Andel av tekniska funktionsfel i nyare biogasanläggningar i Tyskland (FNR *Ergebnisse des Biogas-Messprogramms, 2005*).

Anläggningsdel	Andel av förekommande fel %	Störningar eller stopp
Kraftvärme- produktion	38	Brister i kontrollsystemet, motorstopp, tändstift, turboladdare, kylsystemet, luftfilter, tomgångskylning.
Rötkammare	15	Olämpliga omrörare, otillräcklig omblandning, skumbildning.
Imatning av material	12	Olämplig doseringsutrustning, trasiga skruvar.
Pumpar	10	Olämpliga pumpar, höga belastning, höga varvtal, igensättning på grund av främmande föremål.
Omrörare	10	Fel dimensionering, motorhaveri, transmissionsfel, omrörningsfel, förankringsfästen och matarkablar.

Torrötning

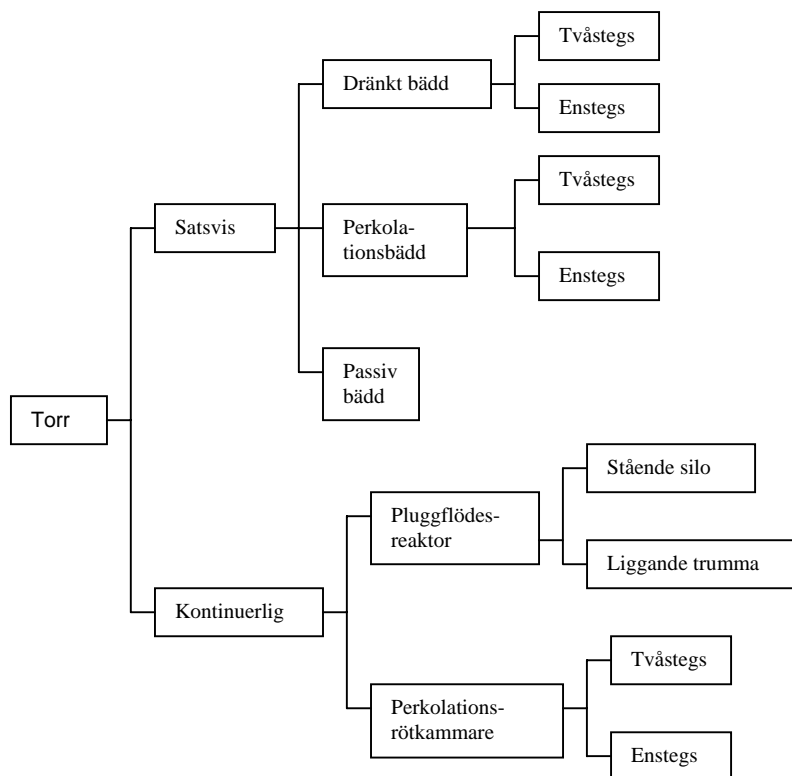
Den första utvecklingen av torrötningsprincipen var kopplad till behandling av fastgödsel (Jewell m.fl., 1981). De första koncepten byggde på satsvisa system (Sun m.fl., 1987; Liu m.fl., 1987). Därefter har dock tekniker för kontinuerliga röttningsprocesser av framförallt den organiska delen av hushållsavfall utvecklats, t.ex. DRANCO (de Baere m.fl., 1986), VALORGA (Begounen m.fl., 1988) och KOMPOGAS (Wellinger m.fl., 1992). Torrötning av energigrödor studerades i laborieförsök i ett omfattande amerikanskt forskningsprogram under 1980-talet (Richards m.fl., 1991; Jewell m.fl., 1993). Under de senaste åren har intresset för torrötning av energigrödor ökat i Tyskland (figur 8). Detta till stor del på grund av den bonus som kan erhållas för nya tekniker och som kan ge ca 13 % högre inkomst från levererad kWh el.



Figur 8. Andel av våta och torra rötningstekniker i Tyskland (FNR *Ergebnisse des Biogas-Messprogramms, 2005*).

Vid indelning av tyska anläggningar som behandlar gödsel eller inte gödsel framgår att de anläggningar som behandlar gödsel nästan uteslutande (ca 80 %) använder den våta tekniken. Bland de anläggningar som behandlar andra substrat än gödsel, framförallt energigrödor, förekommer det nästan lika många torrrottningsanläggningar.

Genom åren har ett flertal koncept utvecklats för torrrotning. Den torra behandlingstekniken kan ske satsvis eller kontinuerligt och vidare kan indelning ske i undergrupper för antalet faser och reaktortyper (Figur 9). Det finns givetvis ytterligare ett flertal möjligheter att kombinera olika processkoncept, men figur 9 visar de som är vanligast.



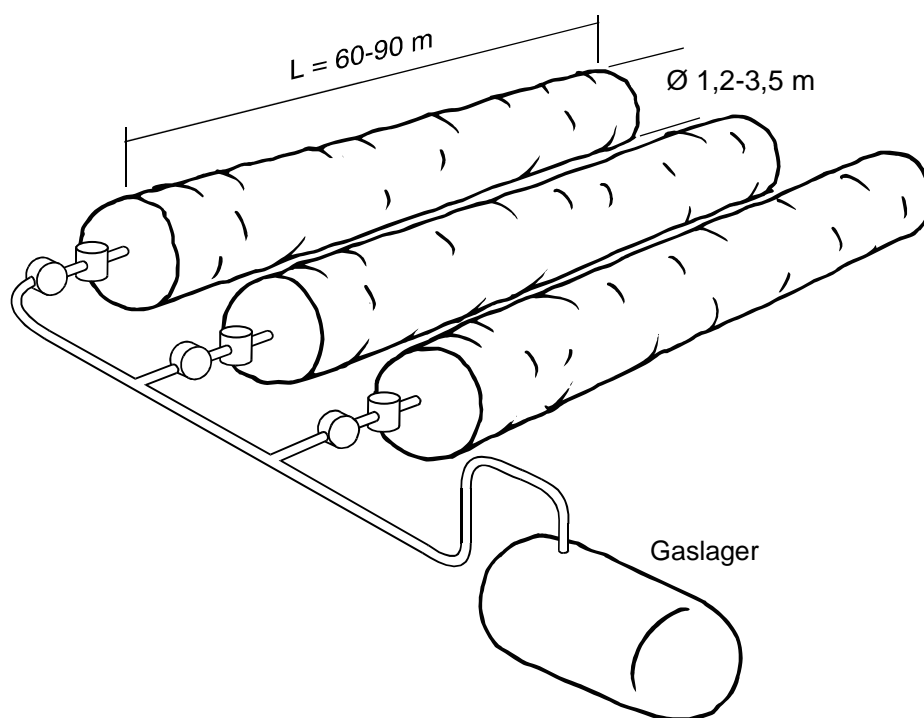
Figur 9. Schema för olika typer av processlösningar vid torrrotning.

Satsvisa processer

Vid satsvis behandling används i huvudsak i tre olika typer av anläggningstekniker nämligen *passiv bädd*, *perkulationsbädd* eller *dräckt bädd*. För att satsvisa anläggningar ska ha en relativt jämn gasproduktion över tiden krävs att flera rötkammare parallellkopplas och att de olika rötkammarenheterna drivs färförskjutna i förhållande till varandra med tanke på nedbrytningsförloppet.

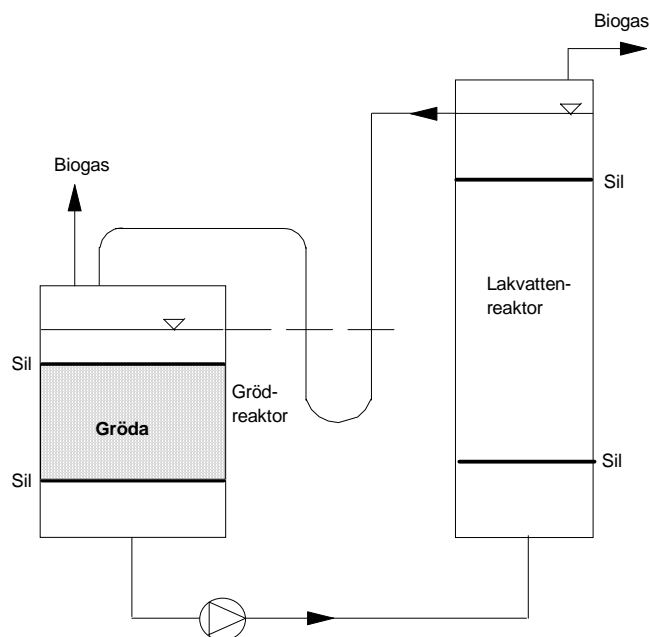
Med *passiv bädd* menas att substratet i rötkammaren får ligga utan omrörning under nedbrytningstiden till dess att gasproduktionen avklingar. Ingen borttransport eller recirkulation sker av den vätska som kan ansamlas i nedre delen av rötkammaren. Det enklaste systemet för passiv bädd är rötning i plastslang (Jäkel, 2004). Substratet pressas in i slang enligt samma princip som vid ensilering och kompostering i slang (figur 10). I samband med inläggning av substrat läggs även en perforerad plastslang in för uppsamling av biogas. Slangen ansluts till ett gaslager.

För att uppnå rätt behandlingstemperatur med hänsyn till rötningsprocessen sker en inledande fas med aerob nedbrytning (kompostering) som sedan får övergå i anaerob nedbrytning. Då biogasproduktionen avtagit blåses luft in i slangarna för att starta en efterföljande kompostering. Efter nedbrytningen öppnas plastslangarna och komposten lagras inför spridning. Under årstider med kall väderlek finns möjlighet att täcka slangarna med isolerplast vilket innebär att randeffekterna av kylan minskar och temperaturen inte sjunker för kraftigt. Fördelen är att den passiva bädden är flexibel och har låg investeringskostnad, men i dagsläget är inte detta koncept fullt utvecklat varför det inte tillämpas i någon större skala.



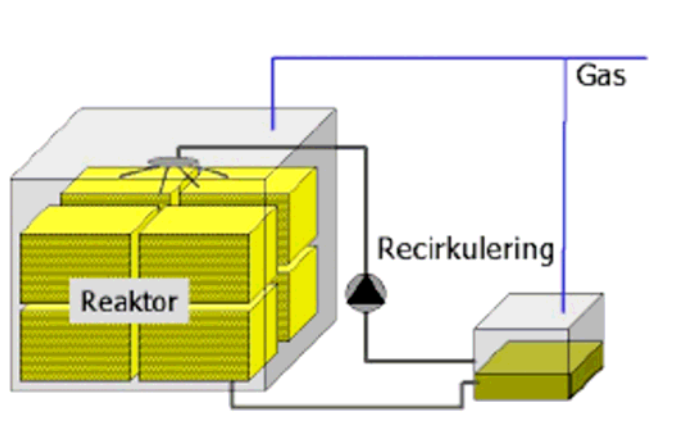
Figur 10. Passiv bädd utformad som rötning i plastslang.

Med *dränkt bädd* menas att vätska tillförs röt-kammaren så att substratet blötläggs helt under nedbrytningstiden. Då gasproduktionen avklingar töms röt-kammaren på vätska och lagras i tank medan materialet lastas ut. Vätskan återanvänds igen för att fylla upp en ny reaktor med färskt substrat. Därigenom sker inympning av metanbakterier och biogasproduktionen i den nyinlastade röt-kammaren kan starta relativt snabbt. Rötning-konceptet kan även utformas som en tvåstegs rötning där den dränkta bädden kopplas till en separat metanreaktor med rundpumpning av vätskan (figur 11; Jewell m.fl. 1985). Fördelen är att vätskan fördelas jämnt i substratet, vilket medger en jämn temperatur och en bra inympning. Detta koncept tillämpas inte heller i någon vidare omfattning.



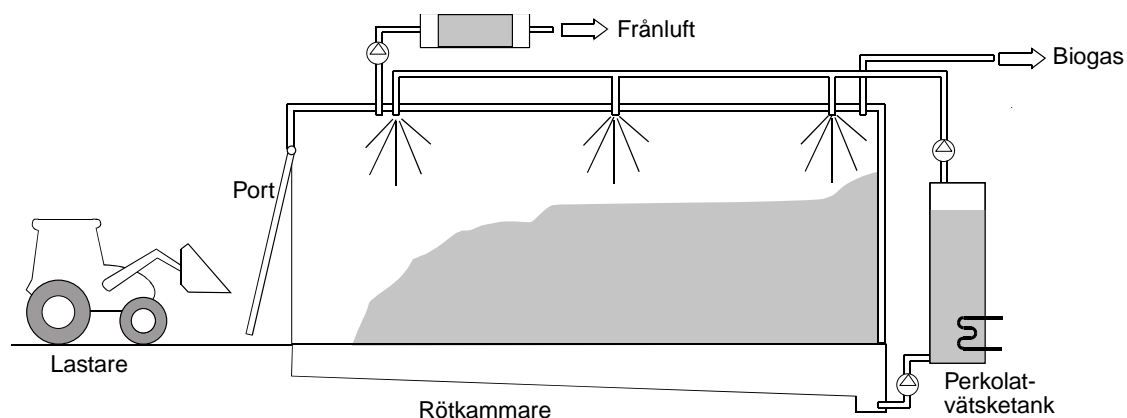
Figur 11. Principskiss över rötningssystem utformat som dränkt bädd och med lakvattenbehandling (efter Jewell m.fl. 1985).

Med *perkolationbädd* menas att vätska som tillförs och bildas i röt-kammaren får dränera bort genom ett perforerat golv och i vissa koncept även perforerade väggar (LOOCK Biogas-Systeme GmbH, 2007). Vätskan uppsamlas i en behållare och återförs till röt-kammaren genom dysor i taket. Substratet återfuktas genom att vätskan får perkolera igenom bädden. Uppsamlings-tanken med perkola-tionsvätska kan vara gemensam för alla reaktorer (figur 12). Detta möjliggör att inympning av perkolatorvätska med hög andel metanbakterier kan ske till färskt substrat.



Figur 12. Principbild för satsvis perkolationssystem. (Källa: Agrigas, 2004)

Satsvisa tekniker med rötning i uppvärmd box eller garageliknade röttkammare är utformade så att inlastning sker med traktor eller hjullastare genom en gastät port på reaktorns kortsida t.ex. system BEKON (figur 13 och 14) alternativt genom en öppning i taket. Därefter tillsluts och tätas porten. Anläggningar av denna typ har ofta en röttkammarvolym på 100 – 300 m³ vardera och antalet röttkammare uppgår till fyra enheter eller fler. Höjden på röttkammaren anpassas till att inlastning och utlastning kan ske med traktor eller hjullastare, ofta ca 4 m. Bredden varierar mellan 4 och 6 m. Perkolationsvätskan samlas i en tank med uppvärmningsmöjligheter.



Figur 13. Inlastning av substrat i röttkammare.



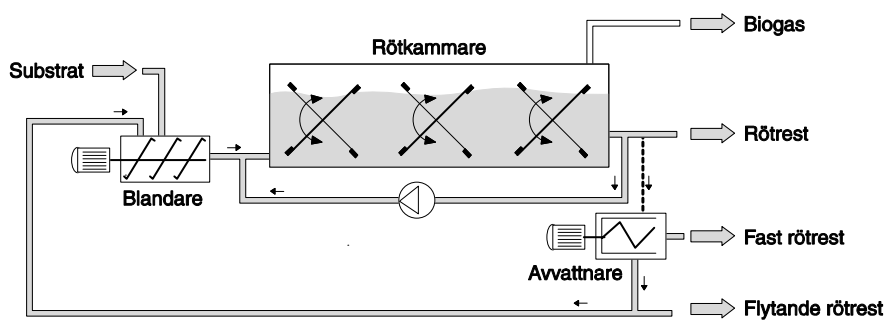
Figur 14. Inlastning av färdigblandat substrat i röttkammare. Källa: Biogasanlage München, System BEKON

Den uppsamlade perkolationsvätskan kan växlas mellan tidigare etablerade röt-kammare och nyetablerade röt-kammare för att förbättra uppstarten, inympning av bakterier och bortförande av flyktiga syror från röt-kammaren. Tekniken kallas även *sekventiell satsvis anaerob rötning*. Efter en tid då metanbildarna etablerats i den senast uppstartade röt-kammaren flyttas den perkolerade vätskan till en ny-etablerad röt-kammare. Dessa typer av anläggningar kan även utformas som två-stepsprocesser.

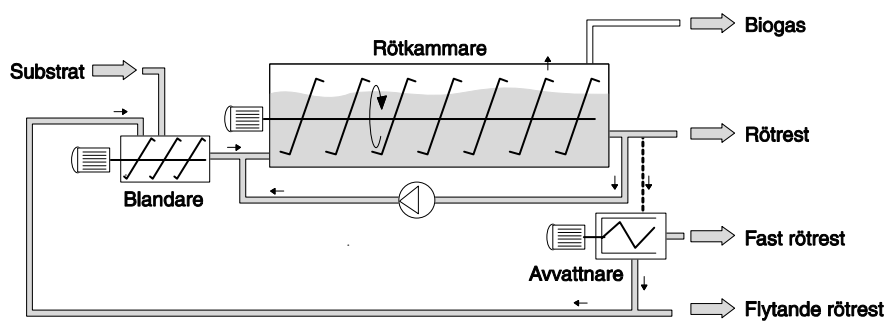
Kontinuerliga processer

Vid kontinuerlig torrrotning används reaktorer med *pluggflöde* eller *perkulations-röt-kammare*.

Vid *pluggflöde* används liggande röt-kammare där substratet matas in i en ända och förflyttas genom att motsvarande mängd tas ut i andra änden. Förflyttning av röt-kammarinnehållet sker antingen med hjälp av korsmonterade paddlar som sitter på ur substratflödesriktningen tvärmonterade axlar t.ex. Linde-system (figur 15) eller med hjälp av medbringare som är fast monterade på en längsgående axel i hela röt-kammarens längdriktning t.ex. system KOMPOGAS (figur 16). Dessa typer av anläggning uppförs ofta för att behandla över 10 000 ton per år och är ursprungligen utvecklade för rötning av bioavfall.

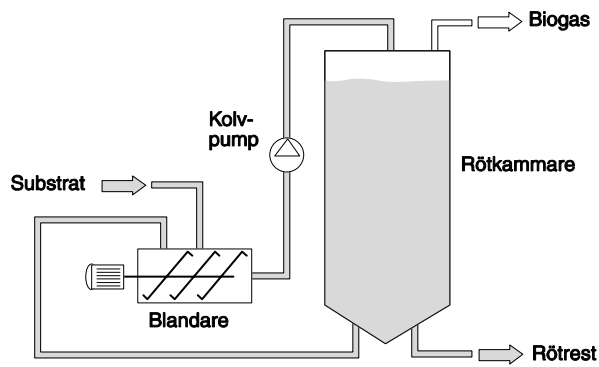


Figur 15. Pluggflödeskoncept enligt Linde-system.



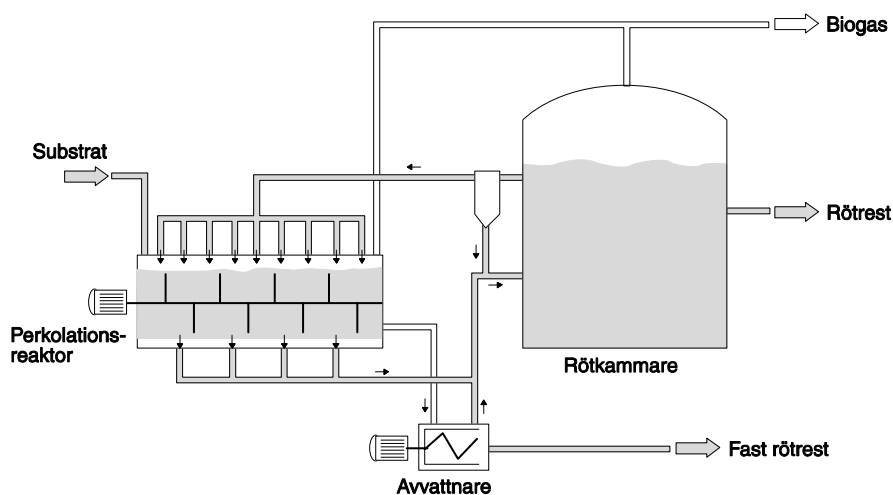
Figur 16. Pluggflödeskoncept enligt Kompogas-system.

Pluggflödeskoncept förekommer även med stående röt-kammare som består av en cylindrisk stående smal reaktor, vilken beskickas från ovansidan med hjälp av en kolvpump, t.ex. DRANCO-system (figur 17). Färskt material blandas tillsammans med rötrest som återförs från botten av reaktorn.



Figur 17. Pluggflödeskoncept enligt Dranco-system.

Kontinuerlig perkolationsrötkammare består av en liggande perkolationsreaktor där substratet översilas med vätska som samlas upp genom en perforerad röt-kammarbotten (t.ex. ISKA-system). Materialet transporteras framåt med hjälp av medbringare som är fast monterade på en längsgående axel i hela röt-kammarens längdriktning. Utrötat material behandlas i en avvattnare för att höja TS-halten. Vätskan pumpas tillbaka till röt-kammaren för att återfukta materialet (enstegs-process) eller via en separat röt-kammare för att påskynda metanproduktionen (tvåstegsprocess, figur 18).



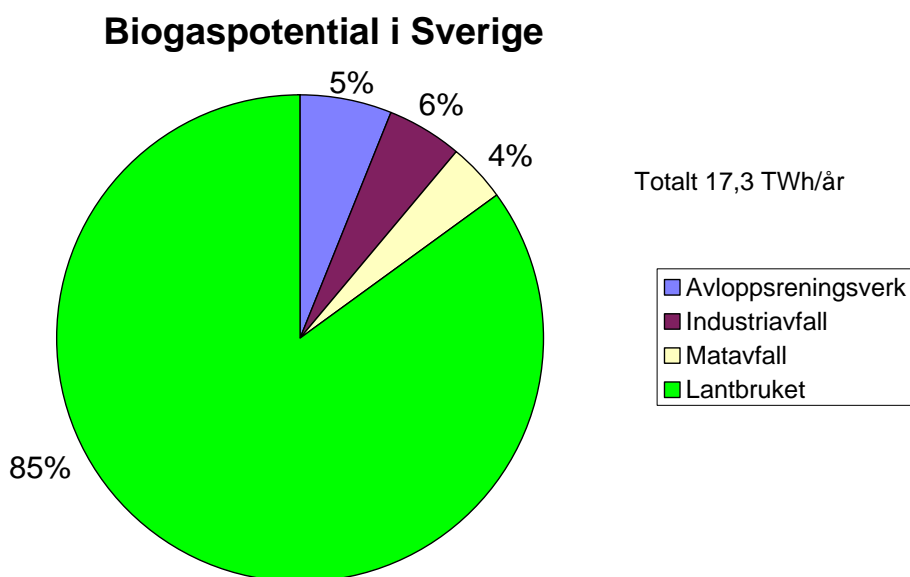
Figur 18. Kontinuerligt perkolationskoncept med två steg enligt ISKA-system.

Substratmängder och potential för torrötning

Organiska restprodukter och energigrödor som lämpar sig bra för torrötning har relativt hög TS-halt, grov struktur och ska vara stapelbara som nämnts i avsnittet om grundförutsättningar. Stapelbarhet innebär att substratet kan läggas upp på hög utan att flyta ut och går att hantera med olika jordbruksredskap. Den grövre strukturen ger substratet en sammanhållande förmåga och hög porositet. I detta kapitel görs uppskattningar över mängden substrat och beräkningar över mängden energi i form av biogas som dessa mängder motsvarar. Någon bedömning av den svenska biogaspotentialen för torrötning har inte tidigare rapporterats.

Tidigare potentialberäkningar av rötbara substrat

Den totala mängden substrat med motsvarande biogaspotentialen i Sverige har tidigare beräknats vid ett par tillfällen. Enligt de beräkningar som utförts av SGC och JTI motsvarar mängden substrat mellan 14,5 (Linné & Jönsson, 2005) och 17,3 TWh (Nordberg m.fl. 1998). Den procentuella fördelningen enligt Nordberg m.fl. (1998) presenteras i figur 19, där det framgår att 85 % finns inom jordbrukssektorn. En stor del av de substrat som uppkommer inom jordbrukssektorn, dock ej flytgödsel, har egenskaper som gör dessa lämpliga för torrötning.



Figur 19. Fördelning av biogaspotential i Sverige i procent för olika substratområden.

Kategorisering av lämpliga substrat för torrötning

Substrat som finns inom jordbrukssektorn kan indelas i gödsel, skörde- och foderrester samt energigrödor. Gödsel genereras på gården och kräver omhändertagande och lagring före spridning. Skörde- och foderrester uppkommer i samband med livsmedelsproduktion och lagring samt utfodring av djur. Energigrödor måste odlas, skördas och lagras innan rötning.

• Gödsel	• Skörde- och foderrester	• Energigrödor
○ Nötgödsel		○ Vallgröda
○ Svingödsel	○ Halm	○ Majs
○ Hästgödsel	○ Potatisblast	○ Vetekärna
○ Fjäderfågödsel	○ Sockerbetsblast	○ Helsädesensilage
○ Får och lammgödsel	○ Boss och agnar	○ Sockerbeta
	○ Frukt- och grönsaksrester	

Inom den kommunala verksamheten uppstår en stor del grönavfall från landskapsvård och park- och trädgårdsskötsel. Större delen av dessa mängder komposteras i dag men lämpar sig också för torrrotning.

De restprodukter som uppstår vid livsmedels- och förädlingsindustrier har ofta en relativt låg TS-halt och används i de flesta fall som djurfoder. Detta kan omfatta restprodukter från mejeriindustrin, bryggeriindustrin, vin- och sprittillverkning, sockerindustrin, bageriindustrin samt konservindustrin. Sammantaget kan sägas att dessa produkter i första hand lämpar sig för våtrotning.

Potential – mängder och gasutbyten

I kommande beräkningar har indelning av substrat skett i följande kategorier:

1. Substrat tillgängliga på gården och som redan hanteras, dvs. *gödsel*
2. Substrat som finns tillgängliga på gården, men bara till begränsad del insamlas och hanteras, dvs. *skörde- och foderrester*
3. Substrat som uppstår i kommunal regi och som under vissa förhållanden kan ge inkomst i form av behandlingsavgift, dvs. *park- och trädgårdsavfall*
4. Substrat som måste produceras, dvs. odlas, skördas och lagras för rotning, dvs. *energigrödor*. Lagringen ska i största möjliga mån konservera energiinnehållet utan någon större energiåtgång.

Beräkningarna baseras på tillgänglig statistik och utgör en fysisk potential. Inga ekonomiska kriterier har ansatts.

Gödsel

Antalet nötdjur av kor, kvigor, kalvar, tjurar uppgick till 1 604 933 st år 2005. De flesta djur finns i Götalands skogsbygder, Götalands norra slättbygder, Götalands mellanbygder och Götalands södra slättbygder (figur 20). Den beräknade mängden fastgödsel från nötkreatur uppgår till ca 3 380 000 ton fastgödsel och ca 780 000 djupströgödsel (SCB Gödsel i jordbruket 2004/2005). Detta innebär totalt 4 160 000 ton och om den genomsnittliga stalltiden bedöms vara 7 månader blir mängden 2 412 800 ton.

Det totala antalet grisar av galtar, suggor, slaktsvin och smågrisar uppgick till 1 811 216 st. De största mängderna svingödsel genereras från anläggningar belägna i Götalands södra slättbygder och Götalands mellanbygder. Övriga områden har en liten del av totala beståndet (figur 20). Den totala mängden fastgödsel från grisar har minskat konstant genom åren och beräknas uppgå till ca 280 000 ton år 2005 (SCB Gödsel i jordbruket 2004/2005).

Det finns ca 14,9 miljoner slaktkyckling, broilers, värphöns, unghöns och kalkon i Sverige 2005. Fåglarna är ofta placerade i stora anläggningar belägna i Götalands skogsbygder, Götalands södra och norra slättbygder och Svealands slättbygd (figur 21). Mängden hönsgödsel uppgår till ca 300 000 ton år 2005 och har en relativt hög TS-halt.

Mängden hästar i Sverige har uppskattats till ca 283 100 st (SCB, Hästar och anläggningar med häst 2004). Hushållningssällskapet uppger att det rör sig om ca 270 000 st. (Line Strand, Hushållningssällskapet, pers. medd., 2007). Antalet anläggningar som har hästar uppskattas till ca 56 000 st och mängden hästar som är knuta till jordbruk beräknas till ca 95 660 st. Den största mängden hästar finns i Götalands södra slättbygder, Götalands mellanbygder, Svealands slättbygder och Götalands skogsbygder. Mängder hästgödsel beräknas uppgå till ca 25 kg per dag vilket motsvarar ca 9 ton/häst och år exklusive strö. Betestiden beräknas till ca 50 %, vilket innebär ca 1 244 000 ton per år exklusive strömedel.

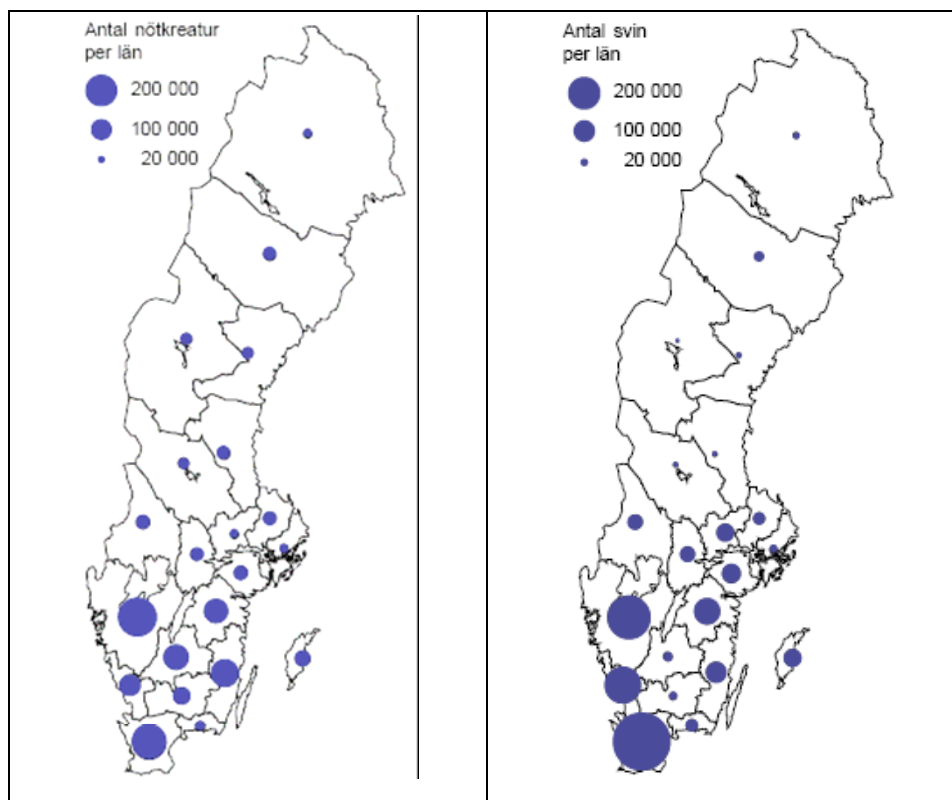
Mängden får- och lammgödsel utgör enligt SCB Gödsel i jordbruket (2004/2005) endast 566 ton, vilket är en försumbar mängd i dessa sammanhang.

Den totala mängden energi från gödsel som bedöms kunna torrötas är ca 2,1 TWh

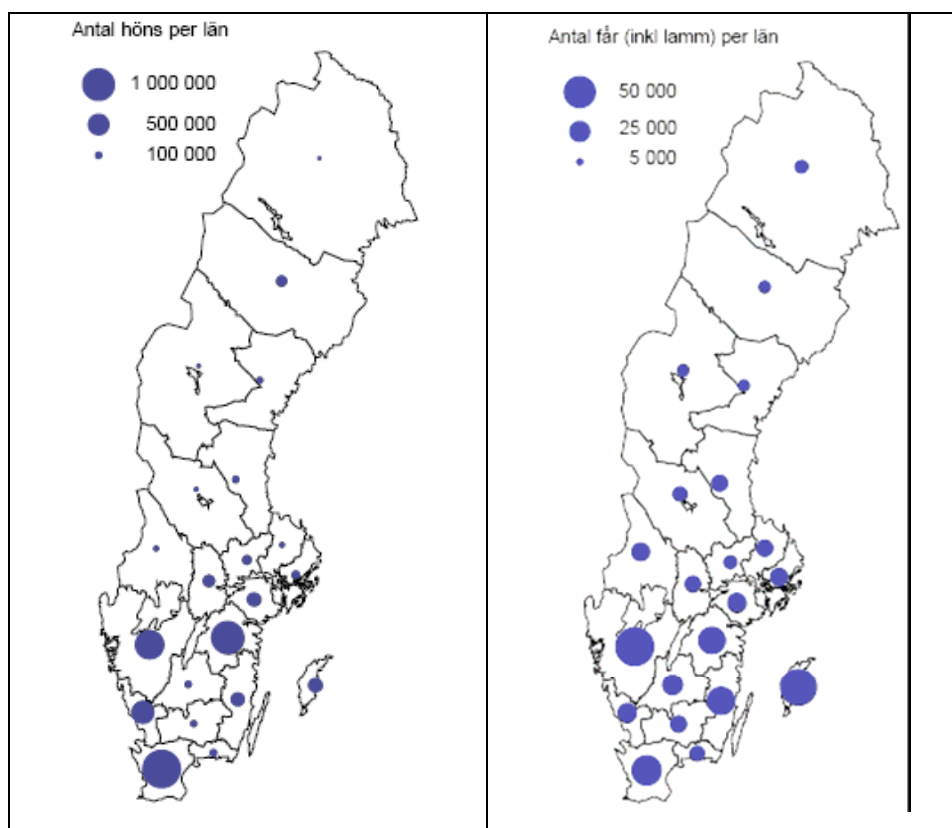
Tabell 2. Beräknade mängder energi från gödsel som lämpar sig för torrötning.

Substrat	Mängd ton	TS %	VS av TS %	VS ton	Metanutbyte m ³ CH ₄ /ton VS	Energimängd GWh
Nötkreatur mjölkkor	2 412 800	32 (25-40)	81	635 170	210	1 300
Suggor/galtar slaktsvin	280 000	23	81	52 164	250	130
Fjäderfä	300 000	45 (25-65)	80	108 000	175	190
Häst	1 244 000	30	75	280 000	160	450
Summa						2 070

Källa: Gödsel – SCB gödselmedel i jordbruket 2004/05. Metanutbyten - Handreichung – Biogasgewinnung und nutzung, 2004 samt olika JTI-rapporter och egna beräkningar.



Figur 20. Geografisk fördelning av gödsel från nötkreatur och svin. Källa: SCB



Figur 21. Geografisk fördelning av gödsel från höns och får. Källa SCB

Skörde- och foderrester

Mängden tillgänglig halm uppskattas till ca 1 000 000 ton per år förutom den mängd som plöjs ner eller används som strö och foder. Mängderna potatis- och sockerbetsblast beräknas till 947 300 respektive 1 428 720 ton per år. Större delen av dessa mängder uppkommer söder om Mälardalen. Mängden boss och agnar är ca 49 700 ton per år. Den totala mängden energi från skörde- och foderrester från jordbruket beräknas till ca 2,4 TWh.

Tabell 3. Beräknade mängder energi från skörde- och foderrester.

Substrat	Mängd ton	TS %	VS av TS %	VS ton	Metanutbyte m ³ CH ₄ /ton VS	Energi-mängd GWh
Halm	1 000 000	86	87	748 200	200	1 500
Potatisblast	947 300	15	80	113 676	300	335
Sockerbetsblast	1 428 720	14	78	156 016	297	455
Boss och agnar	49 700	87	90	38 915	250	100
Summa						2 390

Källa: Halm - Sven Bernesson & Daniel Nilsson 2005, Övriga skörderester - JTI olika rapporter och egna beräkningar samt Handreichung – Biogasgewinnung und nutzung, (2004)

Park och trädgårdsavfall

Mängden park- och trädgårdsavfall som behandlades år 2005 var ca 250 000 ton. Därutöver uppskattas ca 70 000 ton hanteras via hemkompostering (Avfall Sverige 2007). Den totala mängden energi från park- och trädgårdsavfall beräknas till ca 0,2 TWh.

Tabell 4. Beräknade mängder energi från park och trädgårdsavfall.

Substrat	Mängd ton	TS %	VS av TS %	VS ton	Metanutbyte m ³ CH ₄ /ton VS	Energi-mängd GWh
Park/trädgårdsavfall	250 000	60	60	90 000	250	230

Källa: JTI olika rapporter och egna beräkningar samt Handreichung – Biogasgewinnung und nutzung, 2004

Energigrödor

När biogaspotentialen för grödor ska beräknas måste hänsyn tas till ett flertal parametrar såsom:

- var den tillgängliga arealens finns lokaliserad i landet
- vilka grödor som går att odla i de olika områdena
- hur produktiva de tillgängliga arealerna är

En bedömning är att det totalt i landet kan finnas ca 500 000 ha åkermark som idag inte används för livsmedelsproduktion till den svenska marknaden. Av denna areal utgör träda ca 320 000 ha (SCB, 2006) och uppskattningsvis odlas det idag spannmål på 150 000 – 250 000 ha som idag exporteras.

I tabell 5 redovisas den mängd biogas som olika energigrödor kan generera i det fall att produktiv åkermark motsvarande 100 000 ha odlas, vilket endast motsvarar ca 4 % av åkerarealen. Spannet för denna gasproduktion, beroende på val av gröda, har beräknats till mellan ca 2 TWh (vete och vallgröda) och ca 4 TWh (majs och sockerbeta exklusive blast).

Tabell 5. Beräknade mängder energi från gröda motsvarande odling på 100 000 ha mark.

Substrat	Mängd ton	TS %	VS av TS %	VS ton	Metanutbyte m ³ CH ₄ /ton VS	Energimängd GWh
Vallgröda	2 142 860	35	85	637 500	300	1 880
Sockerbeter	5 000 000	24	92	1 104 000	420	4 550
Vete	660 000	86	98	556 248	400	2 180
Majs	4 333 330	30	90	1 170 000	350	4 020
Helsädesensilage	2 750 000	40	90	990 000	300	2 910

Sammanfattning av potential för torrötning

Enligt ovanstående beräkningar kan gödsel, skörderester och park- och trädgårdsavfall motsvara ungefär 4,6 TWh. Till detta kan ytterligare mellan 2 och 4 TWh komma från energigrödor vid odling av 100 000 ha för energiändamål. Detta skulle sammantaget motsvara ungefär 6 – 9 TWh.

Biogasproduktion i Sverige

Den aktuella biogasproduktionen i Sverige år 2005 har sammanställts av Svenska Biogasföreningen och avrapporterats till Energimyndigheten (Produktion och användning av biogas, 2005).

Den sammanlagda biogasproduktionen har bedömts till ca 219 miljoner normal-kubikmeter (MNm³) motsvarande 1286 GWh (tabell 6). Den största mängden produceras på reningsverk och från deponier. Samrötningsanläggningar producerar 163 GWh och gårdsanläggningar endast 12 GWh.

Samrötningsanläggningarna rötade totalt 228 167 ton substrat, varav 97 750 ton är slakteriavfall (42 %). Resterande mängd består av 68 149 ton stallgödsel (30 %), 34 700 ton livsmedelsavfall (15 %) och 27 568 ton källsorterat bioavfall (12 %). Den sammanlagda röt-kammarvolymen är 44 500 m³ och drygt hälften av gasen som produceras används till fordonsgas medan resten huvudsakligen används för värmeproduktion.

Biogasanläggningarna inom lantbruket behandlade totalt ca 34 930 ton substrat. Den största delen (87 %) består av stallgödsel, 30 430 ton. Därutöver behandlades enligt rapporten 3 500 ton slakteriavfall, 600 ton avloppsreningsslam och 400 ton

källsorterat bioavfall. Rötkammarvolymen på gårdsanläggningar uppgår till ca 5 600 m³. Gårdsanläggningarna använder ca 33 % av energin internt och ca 59 % avyttras externt varav värmeproduktion är den dominerande delen.

Drygt två tredjedelar av rötda mängd stallgödsel rötas i samrötningsanläggningar och ca en tredjedel i gårdsanläggningar inom lantbruket.

Huvuddelen av anläggningarna drivs mesofilt. De som drivs termofilt är övervägande samrötningsanläggningar.

Huvuddelen av rötresten består av flytande biogödsel. Det produceras sammantaget ca 285 400 ton flytande biogödsel och ca 300 ton fast biogödsel från lantbruk och samrötningsanläggningar.

Tabell 6. Nuläge för biogasproduktion i Sverige 2005 (Produktion och användning av biogas, 2005).

Anläggningstyp	Antal	Mängd biogas MNm ³	Mängd energi GWh
Lantbruk	7	1,9	12
Samrötning bioavfall	13	23,6	163
Avloppsreningsverk	139	88,8	559
Industriell anläggning	4	11,8	94
Deponier	70	92,6	457
Summa	233	219	1 286

Torrötningsanläggningar i Sverige

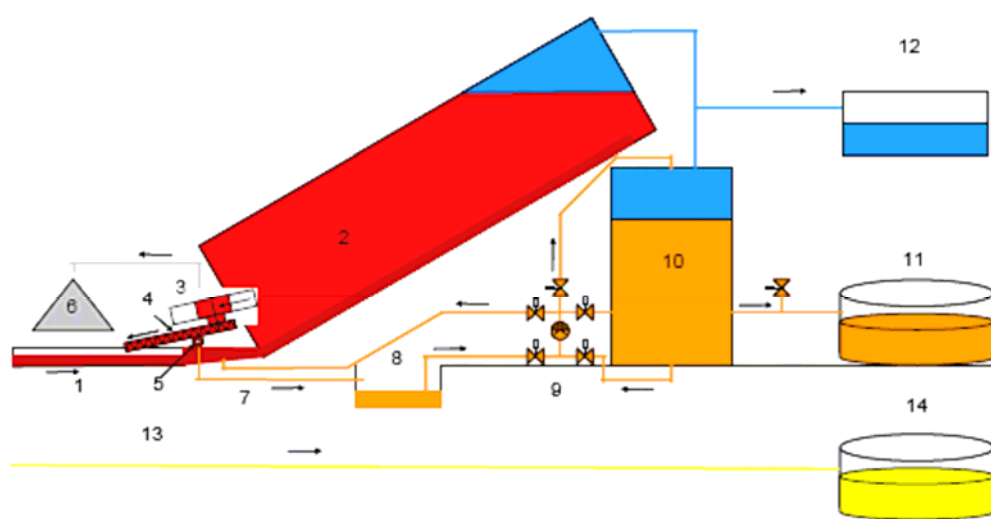
I Sverige har två torrötningsanläggningar på gårdsnivå uppförts. Dessa finns på gårdar med ekologisk produktion och processerna bygger på egna koncept.

Den ena röttningsanläggningen är uppförd i Yttereneby, Järna, och är anpassad för att ta emot gödsel från 55 mjölkkor med rekrytering. Under året produceras ca 600 ton fastgödsel varav 400 ton under stallperioden. Därutöver tillkommer organiskt material från storkök och livsmedelsförädling (Schäfer m.fl., 2005). Materialflödena framgår av figur 22.

1. Fastgödsel (17-19 % TS) bestående av djurgödsel, halm samt av halmen absorberad urin förs ut via utgödslingskanalen in i biogasanläggningen.
2. Fastgödseln matas i samband med utgödsling från ladugården in i den första reaktortuben, hydrolysreaktorn som har en volym på 53 m³ och en lutning på 30 grader och där rötning sker vid 38°C. Inmatningen sker via en kanal som mynnar ut i reaktorns övre del och gödselmassan förflyttas sedan genom sin tyngd nedåt i tuben varefter utmatningen sker från botten efter en uppehållstid på 22-25 dagar.
3. Utmatning av rötda hydrolyserad stallgödsel sker via en rörlig låda som för ut gödseln från reaktorn.
4. Den hydrolyserade gödseln matas ut vidare genom en skruv varav en del av gödseln blandas in i nytillkommen gödsel för ympning av denna.

5. Den rötade stallgödselns fasta del och den flytande delen separeras genom en skruv som pressar ut den flytande delen genom ett filter.
6. Den rötade fasta gödseln matas ut via en transportör och lagras på gödselplattan för att senare transporteras för anläggning av komposter och senare spridning på åkern.
7. Den efter separering flytande gödseln rinner till
8. en behållare för mellanlagring
9. Den flytande fraktionen pumpas till
10. reaktortub två med en volym på $17,6 \text{ m}^3$ som också kallas metangasfilter. Denna är fylld med fyllkroppar. Här sker den slutliga metanbildningen vid en temperatur på 38°C under en uppehållstid på 15-16 dagar. Den flytande och rötade gödseln pumpas till
11. en gödselbrunn för flytande rötrest
12. Biogas bildas både i steg 1 och 2 och går via gasledningar till lagringsbehållare för biogas som består av en expanderbar säck lagrad i en container.
13. I ladugården separerad urin som ej absorberats av halm transporteras till
14. en brunn för lagring av ej rötad urin.

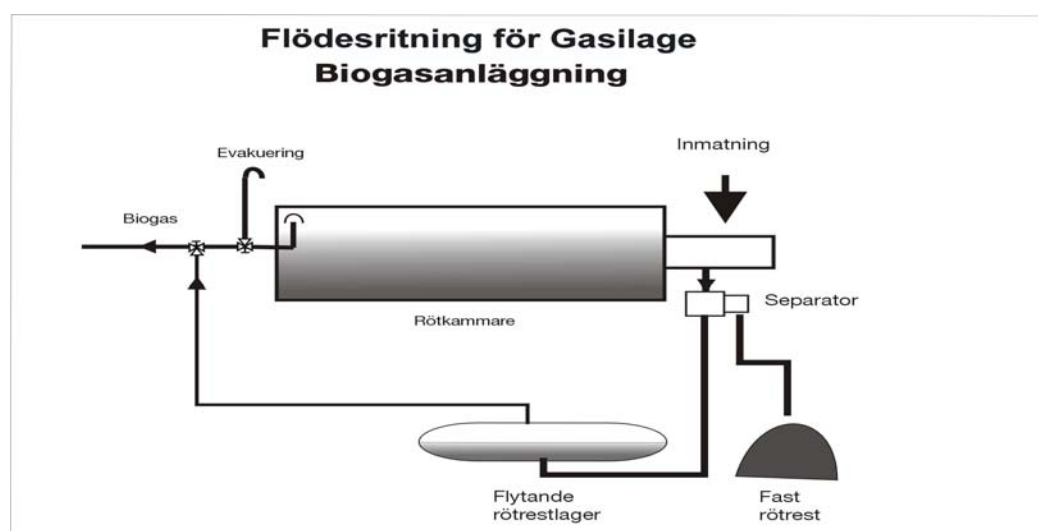
Enligt gjorda beräkningar ska anläggningen kunna producera 95 m^3 biogas per dygn vid en tillförsel på 2 ton gödsel per dag. Under första halvåret uppgick biogasproduktionen till ca 40 m^3 per dygn på grund av flera driftsavbrott (Schäfer m.fl., 2005; Schäfer m.fl. 2006). Under resterande del av år 2005 och början av 2006 uppnåddes inte heller förväntad produktion. Produktionen uppgick till ca 50 m^3 per dygn med 72 m^3 per dygn som högsta värde. Detta har huvudsakligen visat sig bero på svårigheter att vidmakthålla rätt och jämn temperatur.



Figur 22. Principskiss av torrrottningsanläggning för fastgödsel vid Yttereneby gård. Se text för beskrivning av de olika delstegen. Källa: Schäfer m.fl. (2006).

Den andra biogasanläggningen har byggts för att röta vallgröda och finns i Norrbäck, Sala. Biogasanläggningen består av en isolerad liggande cylinder på 100 m³ som ursprungligen var en komposttrumma (figur 23). Trumman har försetts med gas-täta in- och utmatningsanordningar och är provtryckt vid 400 mm vp. Trumman är placerad på 8 hjul i ett isolerat hus och roteras med en hydraulcylinder som styrs med ett paus-gångtidsrelä. Uppvärmningen sker med vattenburen värme från en gaseldad panna med elpatroner som backup för att ge en mesofil driftstemperatur. Processen är av pluggflödestyp och ensilage förs tillsammans med ymp in i inmatningsröret, som mynnar vid den andra gaveln. Materialet transporteras sedan med hjälp av medbringare på cylinderns insida tillbaka mot den gavel där den kombinerade in- och utmatningen finns. Det utrötade materialet tas ut i en skruvseparator, där den växtnäringsrika våta delen lagras i botten på den kuddtank (200 m³) som också utgör gasklocka i systemet. Uppehållstiden i processen beräknas vara ca 2-3 veckor. Panna och gasbehandlingsfilter och elstyrskåp, liksom gasfackla finns i en biogasbod jämte röt-kammaren.

Anläggningen har ympats och provkörts (Edström m.fl. 2004). Funktionen på inmatningen av rötbart material till röt-kammaren är en begränsning i systemet då motståndet i tuben blir högt och substratet kompakteras kraftigt under passagen genom tuben. Detta har gjort att driften för närvarande står stilla och om utvecklingsarbetet kommer att fortsätta är i dagsläget osäkert.



Figur 23. Principskiss av torrrottningsanläggning i Norrbäck, Sala. Källa: Gasilage AB

Jämförelse mellan torrrotning och våtrotning

En jämförelse mellan torrrotning och våtrotning kan göras utifrån olika infallsvinklar. I detta avsnitt har valts att göra en jämförelse mellan torrrotning i form av satsvis rotning med perkolationsbädd och våtrotning. Jämförelsen gör i första hand utifrån biologiska, tekniska och hanteringsmässiga aspekter. Den satsvisa torrrotningen med perkolationsbädd, som även benämns garagekoncept, är det torrrottningskoncept som mest tillämpas i Tyskland (P. Weiland, pers. komm., 2007) och som tillåter en flexibilitet i anläggningsstorlek jämfört med kontinuerliga torrrottningskoncept som ofta uppförs för mycket stora mängder material (> 10 000 ton per år). Vid jämförelse av de ekonomiska aspekterna ingår även kontinuerlig torrrotning.

Substrat

Utrustning för substrathantering vid *torrötning* är lätt att integrera i befintligt hanteringssystem på gården. Utrustning för att hantera fastgödsel, skörderester, energigrödor och andra stapelbara substrat finns på de flesta gårdar. Substraten kräver bearbetning före såväl som efter rötning, t.ex. homogenisering, blandning, flyttning, samt hantering av avvattnat processvätska (Jewell m.fl., 1985). Inlastning med traktor, hjullastare eller annan liknande maskinell utrustning kräver att substratet är stapelbart d.v.s. går att fånga upp i skopa eller dylikt utan att flyta ut över en större yta. Vid homogenisering av substrat och inblandning av ympmaterial används blandningsskopa eller blandar-/mixervagn.

Vid torra tekniker med satsvis rötning sker ingen materialtransport i röt-kammaren och i torra kontinuerliga rötningssystemer sker en långsamgående mekanisk materialtransport. Därigenom kan material som halm, hö, vallensilage och andra energigrödor och jordbruksrester samt blandningar därav rötas utan risk för stopp i pumpar, sedimentering eller bildning av svämtäcken. Inslag av eventuella störande ämnen som jord, sand, sten, glas, plast, trä m.m. har ingen processtekniskt avgörande betydelse i ett torrötningssystem men kan vara ett mycket stort problem i ett våtrötningssystem. Synliga föroreningar kan tas bort före eller efter rötning genom siktning.

Våtrötning kräver lättflytande substrat, låg TS-halt med liten partikelstorlek och korta fibrer för att möjliggöra en kontinuerligt fungerande materialtransport i pumpar och rör. Flertalet förekommande substrat kan användas eftersom våtrötningstekniken lämpar sig både för flytgödsel och flytande restprodukter från livsmedelsindustrin samt för utspädda material med högre torrsbstanshalt (Nordberg m.fl., 1997). Viskositeten på materialet ökar vid inblandning av fiberrika material och lämplig pump måste väljas efter dessa egenskaper. Det finns även system för att trycka eller skruva in ensilage i en våtrötningssystem. Ett flertal anläggningar i Tyskland använder energigrödor (majsensilage) med TS-halter kring 30-35 % TS som inmatas direkt i röt-kammare med ca 10-12 % TS. Detta fungerar med substrat som har en relativt hög nedbrytningsgrad som majs men inte med andra substrat med lägre nedbrytningsgrad.

Substrat – jämförelser mellan torrötning och våtrötning

- Vid torrötning kan ofta befintlig maskinpark/hanteringssystem på gården användas för hantering av stapelbara substrat.
- Inslag av eventuella störande ämnen som jord, sand, sten, glas, plast, trä m.m. påverkar inte hantering och materialtransport på samma sätt som vid våtrötning.
- Rötning av stapelbara substrat kräver omsorgsfull sönderdelning och homogenisering om de ska rötas i en våtrötningssystem.
- Vid våtrötning av stapelbara substrat krävs utspädning. Fiberrika material ger en högre viskositet vilket ställer speciella krav på val av pumpar och omrörare.

Lagring, förbehandling och inblandning samt ympning

Lagring av substrat

Vid *torrötning* används material som har en volymvikt kring ca 100 kg/m³ – 900 kg per m³ beroende av substratslag. Lagringen sker lämpligast i nära anslutning till gården alternativt anläggningen. Korttidslagring sker direkt på marken som täckta högar, i täckta containers, växelflak, betongfickor etc. Långtidslagring sker i liggande alternativt stående silos eller genom slangensilering eller planensilering. I samband med att aktuella lagringsutrymmen vid anläggningen friställs kan de utnyttjas för lagring av fasta rötrester. Externa leverantörer kan lagra en viss mängd substrat vid sina gårdar. Växelflaksystem där lastningen av containrarna sker direkt i samband med utgödsling eller kontinuerligt vid fortlöpande utgödsling är lämplig i samband med gemensam rötningsanläggning.

Vid *våtrötning* har materialet som regel volymvikt kring 1000 kg/m³. Gårdsanläggningar nyttjar om möjligt befintliga gödselbehållare för lagring av pumpbara substrat. Om det finns tillgång till flera gödselbehållare kan en eller flera av dessa behållare användas som rötrestlager. Om torrare material används som substrat vid våtrötning kan lagringen ske på samma sätt som för torrötning innan sönderdelning och uppblandning med vatten eller rötrest sker. Lagringsutrymmen för stapelbara material kan inte användas för lagring av flytande rötrest utom i de fall då en fas-separation av rötrest sker. Den fasta fasen kan då lagras i utrymme för stapelbara substrat. Lager för flytande substrat kräver omrörning för att förhindra sedimenteringsproblem.

Lagring av substrat – jämförelser mellan torrötning och våtrötning

- Substrat för torrötning kan lagras i direkt anslutning till gården eller biogas-anläggningen. Friställda lagringsutrymmen kan användas för fasta rötrest.
- Transport- och lagringsekonomiskt är torrötning att föredra före våtrötning.
- Vid våtrötning av flytande material krävs större lagringsvolym och mer kostnadskrävande lagringsutrymmen för substratet än vid torrötning.

Förbehandling

Vid behandling i satsvisa *torrötningssystem* är det fördelaktigt om substratet inte är sönderdelat i alltför hög grad. Materialstrukturen i substratet underlättar cirkulation och genomströmning av perkolationsvätska. Minskad partikelstorlek innebär minskad porositet i substratet vilket får till följd att genomsläppligheten av gas och vätska går långsamt eller i det närmaste helt förhindras. Zoner med substrat som inte genomfuktas riskerar att inte vara helt nedbrutna efter behandling (Bengtsson & Mathisen, 1993; Nordberg & Mathisen, 1994; Kreuger & Björnsson, 2006). Den torra rötningstekniken ger därför möjlighet att behandla material som innehåller ohackad halm, t.ex. djupströgödsel och som inte kan hanteras i andra tekniker.

Torrötning med kontinuerligt pluggflöde kräver högre sönderdelningsgrad än satsvis behandling. Substratet blandas i reaktorn med hjälp av paddlar/skovlar eller medbringare vilket medför att vätska ges möjlighet att komma i kontakt med så stor del av partiklarnas ytor som möjligt. Genom intermittent omrörning i rötkammaren ges möjlighet för den bildade gasen att lämna substratet.

Vid *våtrötning* är det viktigt att skapa så hög specifik partikelyta som möjligt genom finfördelning. Därigenom förbättras pumpningsegenskaperna och mikroorganismerna får en stor angreppsyta vilket bidrar till en kortare nedbrytningstid och kortare uppehållstid i rötkammaren, vilket ökar anläggningskapaciteten. Finfördelningen av substratet kan ske i samband med skörd (t.ex. exakthackning), i kvarnar eller genom skärande pumpar beroende på substrat. Detta kräver en större energiinsats samt ett stort slitage på utrustningen för sönderdelning än vid torrötning.

Förbehandling av rötmaterial – jämförelser mellan torrötning och våtrötning

- Den satsvisa torrötningstekniken kräver ingen omfattande förbehandling i form av sönderdelning av stapelbara material.
- Vid våtrötning måste rötningmaterialet vara mera finfördelat än vid torrötning, vilket ger ett ökat investerings- och energibehov.
- Slitaget på utrustning för sönderdelning av material vid våtrötning kan bli stort.

Inblandning av ympmaterial och inmatning av substrat

Vid satsvis *torrötning* fylls den tomma rötkammaren med nytt rötmaterial för varje ny rötningssomgång ungefär var 4:e till 6:e vecka. En viss mängd av rötresten används som ymp och blandas med färskt substrat. Blandningen utförs med t.ex. hjullastare eller stallgödselspridare med blandningsskopa. Särskild blandningsutrustning bör användas då större noggrannhet eftersträvas, t.ex. fodervagn, fast foderblandare eller mixervagn. Utlastning, blandningsförfarande och inlastning tar ca 4 – 8 h per rötkammare i anspråk beroende på rötkammarstorlek och maskinutrustning. Arbetsinsatsen är förhållandevis stor vid varje tillfälle för materialhantering och in- och utlastning, medan arbetsinsatsen för materialhantering under uppehållstiden i rötkammaren är låg.

Mängden av ympmaterial avgörs helt av typen av substrat som ska behandlas. Nötgödsel kräver ingen eller en måttlig mängd ymp. Hästgödsel kräver mellan 10 och 20 % ymp och vallensilage och majsensilage kräver uppemot 70 % ymp (Kusch, 2005). En måttlig inblandning av ymp tillåter att pH-värdet sjunker initialt men stiger relativt snabbt igen. Kraftig inympning förhindrar en större pH-sänkning och metanbildningen kommer i gång snabbare samtidigt som en stor inblandning av ymp minskar behandlingskapaciteten. Vid rötning med energigrödor i en av Firma LOOCKs anläggning blandas 60 % majsensilage, 13 % kalkongödsel och 27 % ymp i form av rötrest från anläggningen. Andelen ymp har provats fram och kan skilja från gång till annan beroende på substratets sammansättning (LOOCK, 2007). Kusch (2005) anger att satsvis rötning med perkolation av majsensilage fungerar bra om ympning sker med utrotat material motsvarande 70 % av TS i blandningen.

Lägre ympmängd ledde till låga pH-värden och lång återhämtningstid. Vid satsvis rötning av hushållsavfall med behandling av processvätska har ympinblandning med rötrest motsvarande 15-20 % av vikten resulterat i goda nedbrytningsgrader (Mathisen m.fl., 1992).

Vid inläggning i röt-kammaren läggs materialet upp med en höjd av 1,5 – 3 m vilket gör att materialet närmast golvet pressas samman av det överliggande materialet. Vid användning av energigrödor kommer fri vätska och vätska från söndertryckta växtceller pressas ut. Mängden vätska beror främst på torrsubstanshalten, utvecklingsstadiet hos grödan, sönderdelningsgraden av grödan, packningsgrad och röt-kammarens storlek (Nash, 1978). Pressvätskebildningen avtar med stigande TS-halt och upphör generellt helt vid TS-halter över 30 % (Mc Donald & Withenbury, 1973). Vid höga stående röt-kammare kan pressvätskan uppkomma på grund av höga tryck på substratet. Det är i huvudsak de mest lättlösliga näringsämnen socker, organiska syror och mineraler som finns i pressvattnet. Pressvattnets TS-halt varierar mellan 2 och 10 % med medelvärde ca 6 % (Zimmer & Wilkins, 1974).

Vätska som pressas ut vid satsvis rötning med perkolationsbädd uppsamlas i en särskild tank. Uppsamlingsstanken är ofta är gemensam för samtliga röt-kammare. Ett rörsystem förbinder röt-kammarna så att vätska kan genom pumpning återföras till röt-kammare och med hjälp av dysor i taket sprids över substratet. Vätskan sprayas över substratet för att återfukta och förbättra nedbrytningen.

Uppsamlad pressvätska från röt-kammaren kan från uppsamlingsbehållaren även ledas till en separat röt-kammare, t.ex. utformad som ett anaerobt filter (röt-kammare anpassad för vätskor och med bärarmaterial som mikroorganismerna koloniserar) för produktion av biogas. Därigenom sker nedbrytning av organiskt material i både röt-kammaren och i det anaeroba filtret. Recirkulation av perkolerad vätska innebär att substratet återfuktas med innehåll av metanbildande mikroorganismer och anaerobfiltret tillförs kontinuerligt med lättomsatt organiskt material.

Strävan är att endast sprida vätska på substratet och inte på röt-kammarens väggar. I annat fall leds vätskan som hamnar på väggarna direkt via golvet tillbaka till uppsamlingsstanken. Det finns även en risk att vätskan inte fördelas jämnt över hela ytan och därmed inte perkolerar igenom hela substratmassan på ett likartat sätt. Inblandning av halm och andra stråliknande material samt och kanalbildning förhindrar en jämn perkolation av vätska. Ojämn perkolation medför att vissa delar av substratmassan får lägre nedbrytningsgrad medan andra partier bryts ned snabbare. Nedbrutna substratet har sämre permeabilitet än det opåverkade substratet vilket kan medföra att både gas- och väsketransport i substratbädden försvåras ju mer materialet bryts ned. (Nordberg & Mathisen, 1994; Kruger & Björnsson, 2007).

Vid *våtrötning* blandas färskt substrat kontinuerligt eller i mindre satser med korta intervaller in i en aktiv pågående biologisk process. Belastningen anpassas så att pH-värdet i processen inte ska sjunka under pH 7. Det förbehandlade substratet mellanlagras i en särskild lagringstank som är utrustad med omrörning. Storleken på lagringstanken avgörs av frekvensen på inmatningen. Lagringsstanken kan vara dimensionerad för kortare tids lagring med daglig inmatning eller för längre tids lagring. Investerings- och värmebehovet blir lägre vid en mindre blandningstank än vid en större.

Inblandning av rötmaterial – jämförelser mellan torrötning och våtrötning

- Vid torrötning sker inblandningen av nytt rötmaterial i varje rötkammare ca en gång per månad. Befintliga gårdsmaskiner kan användas för denna inblandning.
- Vid torrötning måste ymp blandas in i samband med inläggning av nytt material i rötkammaren. Mängden beror på materialets egenskaper och omsättbarhet och kräver en väl fungerande mixning av ymp och substrat. Vid stora mängder ymp nyttjas inte rötkammarvolymen lika effektivt. Ympning kan även ske vid cirkulation av vätska via en separat rötkammare, t.ex. ett anaerobt filter.
- Vid torrötning krävs en större arbetsinsats vid de tillfällen rötkammaren ska fyllas. Vid våtrötning krävs en viss daglig arbetsinsats om inte automatiseringen är hög.
- Vid våtrötning måste det finnas en särskild omrörningsbar blandningstank för inblandning.

Uppvärmning

Rötkamrarna vid torrötning är rektangulärt utformade placerade intill varandra med avskiljande mellanväggar. Isoleringen är relativt lätt att applicera och kräver inte samma tjocklek (LOOCK, 2007) som vid fristående cirkulära rötkammare. Rötkamrarna ofta är inbyggda i ett byggnadsskal.

Det homogeniserade och preparerade fasta substratet ska så fort som möjligt värmas upp till optimal temperatur, ca 35 - 40°C. Temperaturnivån hålls konstant genom uppvärmning av perkolationsvätska i lagringstanken och/eller genom golvvärme, rörslingor ingjutna i golvet. Alternativt kan en inledande aerob nedbrytning som alstrat egenvärme med fritt lufttillträde i rötkammaren minska energiförbrukningen. Den senare metoden, aerob förvärmning, som används i vissa torröttningsanläggningar kan ge en jämn uppvärmning av substratet. Behovet av värmeenergi för processen kan begränsas dels genom en bra isolering, dels genom värmeåtervinning. Energiåtervinningen sker i första hand genom värmeväxling av rötresten, som därigenom kyls ner. Detta reducerar den biologiska aktiviteten. I en torröttningsanläggning bör värmeåtervinningen kunna lösas genom värmeväxling av eventuell flytande rötrest, som tillåts cirkulera genom nyligen uttagen fast och varm rötrest (Litorell, 2007).

Då aerob förbehandling tillämpas förbrukas en del av det lätt nedbrytbara materialet. Detta minskar risken för hög produktion av organiska syror vid uppstarten av det anaeroba steget. Det finns även en möjlighet att aerob förbehandling kan öka tillgängligheten för anaerob nedbrytning hos substratet eftersom komplexa strukturer i substratet kan lösas upp (Mshandete m.fl., 2005). Trots en viss förbrukning av organiskt material vid aerob förvärmning har inte någon signifikant lägre gasproduktion kunnat påvisas i jämförelse med konventionellt värmd gödsel (Bernesson m.fl., 1999). Beräkningar har visat att aerob förvärmning kan ge ett ökat nettoenergiutbyte med omkring 30-35 % vid torrötning med substrat med ca 25 % TS-halt jämfört med en konventionell våtröttningsprocess med ca 10 % TS-halt (Bernesson m.fl., 1999).

Nackdelar med aerob förvärmning före rötning är att behandlingssystemet blir mer komplicerat och kräver större kontroll för att rätt temperatur ska erhållas. Vidare måste förlust av metanproduktion vägas mot den värme som genereras. Det är också möjligt att initialt bedriva en aktiv luftning för att bättre styra värmeutvecklingen. Enligt Mshandete m.fl. (2005) gav luftning under 2 dygn en minskning av metanpotentialen med 50 %, medan 9 timmars luftning gav en högre metanbildning pga. en ökad hydrolysaktivitet.

Vid *våtrötning* i gårdsanläggningar åtgår ofta ca 20-30 % av den producerade energin till anläggningarnas drift. 90 % av denna energi åtgår för värmning av substratet. Fördelarna vid våtrötning är dock att drift och uppvärmning bygger på känd teknik och att substratets TS-halt möjliggör värmeväxling, dvs. återtagning av värme från rötrest som överförs till nytt substrat. Nackdelarna är givetvis den stora mängd vätska som ska värmas upp. Uppvärmningen av substratet i rötkammaren sker genom inmonterade rörslingor som är placerade i direktkontakt med substratet och är därmed mer effektivt än vid torrötning.

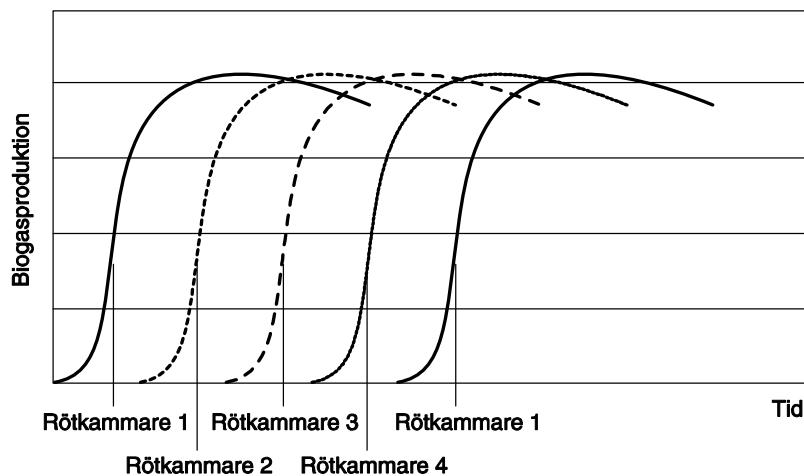
Uppvärmning – jämförelser mellan torrötning och våtrötning

- En jämn uppvärmning vid satsvis utrötning är beroende av en jämn fördelning av perkolationsvätska. Med aerob förbehandling finns möjligheter att initialt skapa en jämn fördelning av värme i rötkammaren.
- Relativt små mängder vätska cirkuleras vid torrötning vilket ger mindre dimensioner på rör och pumpar och lägre elåtgång.
- Vid våtrötning åtgår mer el för att driva omrörare för omblandning.
- Vid våtrötning måste stora mängder vätska värmas upp och cirkuleras vilket kan motsvara 20-30 % av den producerade energin.
- Våtrötningssystemet bygger dock på känd teknik med lång erfarenhet och möjliggör värmeväxling.

Den biologiska processen och gasproduktion

Biogasproduktionen vid enstegs *torrötning* sker huvudsakligen i rötkammaren. Vid tvåstegs torrötning delas nedbrytningsprocessen upp i två steg. I det första steget i rötkammaren, hydrolys- och syra-steget, sker en separat syrabildning. I nästa steg, metan-steget, sker metanbildningen från den syra- och energirika processvätskan som överförs från rötkammaren. I både enstegs- och tvåstegssystemet sker en återcirkulering av processvätskan. Återcirkuleringen (frekvens och mängd) styrs av behovet och sker genom relativt små cirkulationspumpar.

Vid satsvis torrötning i flera moduler kan inläggning och uttag läggas i sekvens efter varandra så att ett relativt jämnt gasuttag kan ske över tiden (figur 24). Vid omgångsvis tillförsel av t.ex. 50 ton TS rötmaterial med 30 % TS och 20 % inblandning av ympmaterial krävs en rötkammarvolym på drygt 300 m³. Om en störning inträffar kommer metanproduktionen från den enskilda satsen att reduceras, men behöver inte innebära att hela gasproduktionen avstannar, vilket är risken vid processtörningar i en våt process. Detta gör att störningar i en satsvis torrötningssystem får mindre allvarliga konsekvenser än en störning i en våtrötningssystem.



Figur 24. Biogasproduktionens utveckling vid satsvis sekventiell rötning.

Vid torrötning av kväverika substrat, dvs. material med låg C/N-kvot, t.ex. fjäderfä-gödsel och baljväxter, finns ökad risk för ammoniumförgiftning (Jewell m.fl., 1993). Det är mycket viktigt att den totala ammoniumhalten hålls på en låg nivå för att förhindra ammoniaktoxicitet pga. det höga pH som lätt erhålls vid torrötning.

Rötning av enbart energigrödor har visat sig vara mer komplicerat än samrötning med gödsel eftersom processen är mycket känslig för små förändringar vad gäller organisk belastning. Det kan även uppstå brist på mikronäringsämnen som kan ge upphov till höga halter av flyktiga syror. I de flesta fall upptäcks fel i processen efter några månaders drifttid efter uppstart. Våtröttningsanläggningar med endast en slags energigröda som substrat kan belastas med ca 2,5 – 3 kg VS/m³ och d medan belastningen i röttningsanläggningar som behandlar flera olika typer av substrat kan belastas med upp till 4 kg VS/m³ och dygn (FNR Resultat av Biogas-Messprogrammet, 2005)

Svenska erfarenheter från pilotstudier visar att det ibland kan vara svårt att nå en hög och jämn genomrötning av bädden vid satsvis torrötning. Bengtsson & Mathisen (1993) har i ett pilotprojekt studerat tvåfasrötning av ensilage i plansilo på en gård (Logården). Hydrolys och syrabildning skedde i ensilagebädden och processvätskan pumpades därefter till ett anaerobt filter (metanreaktor) och återfördes till lakbädden via perforerade slangar på ytan av bädden. Under drifttiden bildades kanaler i ensilagebädden där processvätska fördelades. De uppkomna kanalerna innebar att processvätskan fördelades över en mindre del av bädden. Totalt utgjorde kanalerna ca 15 % av bäddens totala volym. Endast 20 % av den utvinnbara metanmängden erhöles.

Ett fullskaleförsök med en s.k. ”energiligpa” har genomförts i Isätra, Västmanland, med 385 ton helsädesskördad grön havre och 55 ton vallgröda (Nordberg & Mathisen, 1994). Mindre än 10 m³ rötslam tillfördes som ymp och blandades in i den nedre delen av limpan. Lera användes som täckskikt och isolerades med halm. Pressvätska samlades via en dränering upp i en uppvärmd tank (40°C) och pumpades via 11 injektionsspett tillbaka ut i limpan. Uppvärmningen av injektionsvattnet kunde till viss del bidra till temperaturreglering i limpan. Den bildade metangasen

fläktades ut ur gasrör, som anlagts i lakbädden. Endast 8 % av den utvinnbara metanmängden erhöles beroende på en ojämn spridning av vätskan, vilket orsakade en ojämn nedbrytning nära injektionspunkterna.

Kreuger & Björnsson (2006) undersökte satsvis torrötning av hästgödsel i en 10 m³ gallerförsedd kassett med perkolation utan inledande ympning. 2 m³ vatten tillsattes och värmdes upp innan cirkulation över kassetten. Försöket pågick i 37 dagar och gav ett metanutbyte på 0,05 Nm³/kg VS. Vid försökets avslutning konstaterades att genomströmningen var heterogen och att endast 37 % av hästgödseln omsatts. Motsvarande hästgödsel rötades i laboratorieförsök och gav då 0,12 Nm³/kg VS. Även blandning med 70 % hästgödsel och 30 % ensilage gav en heterogen utrötning.

Richards m.fl. 1991 uppnådde vid kontinuerliga laboratorieförsök med sorghum under termofila förhållanden en belastning på 24 g VS/L och d, vilket är bland de högsta belastningarna som rapporterats i litteraturen. I försöken blandades sorghum med cellulosa för att därmed minska risken för ammoniumhämmning. Det finns dock ingen rapportering om fortsatta försök i pilotskala. Vid jämförelse mellan mesofila och termofila processer brukar nedbrytningshastigheten kunna vara 1,5 till 2 ggr så hög för termofila som för mesofila processer (Wiegant, 1986).

Jewell m.fl. (1993) anger att metanbildningshastigheten avtar med ökad TS-halt i substratet. Detta anges bero på flera variabler, t.ex. vattens inverkan på diffusionsförmågan med resultatet att SRT (Solids Residence Time) måste vara större för röt-kammare som arbetar med hög TS-halt för att en given omvandlingsgrad till metan skall uppnås. SRT blir betydligt större än HRT (Hydraulic Retention Time, definierad av den våta lasten) då en stor andel av substratet omvandlas till biogas och då lämnar systemet som biogas.

Vid kontinuerliga torrötningsförsök vid 37°C av vallgrödor samt blandningar av vallgrödor med gödsel kunde stabila processer erhållas vid belastningar upp till 12 g VS/L och vid en uppehållstid på ca 30 dagar (Levin & Nordberg, 1998). Detta är ungefär dubbelt så hög belastning som kunde nås i totalomblandade våta processer med identiska substrat (Nordberg & Edström, 1997; Nordberg m.fl. 1997). Metanutbytet var dock lägre i torrötningsprocesserna. Vid rötning av vallgröda var metanutbytet 0,24-0,26 L/g VS, vilket kan jämföras med 0,32 L/g VS som erhöles i en totalomblandad process vid 2,5 g VS/L och d. Ingen anrikning av lättflyktiga fettsyror kunde detekteras, vilket tyder på att begränsningen kan ligga i tillgängligheten för bakterierna att komma åt substratet.

Erfarenheter från Agrigas 2002 visar dock att metangasutbytet i enstegs fastbäddsrötning och stratifierad bädd är jämförbara med gasutbytet vid våtrötning (tabell 7). I slurryrötning var den högsta temperaturen 30°C som undersöktes med substrat från samma skörd i alla försök. Metanutbytet för en två-stegsprocess blev lite lägre men hade en något snabbare nedbrytningstid. En stratifierad bädd ger möjlighet att driva processen kontinuerligt. Teknikerna bedömdes fungera väl och kunna nyttjas i gårds-skala.

Tabell 7. Energiutbyte vid enstegs fastbäddsrotning, stratifierad bädd och våtrotning (Källa Agrigas 2002)

Processtyp	Temperatur °C	Metanutbyte m ³ /kg VS	Fördelar	Nackdelar
Slurryrotning	30	0,34	Väl etablerad teknik	Inte anpassat för rotning av substrat med hög TS-halt
Enstegs fastbädd	37	0,35	Lågt arbetsbehov, enkel utformning	Få erfarenheter
Tvåstegs fastbädd	35	0,27	Stabilt system ger snabb nedbrytning	Metanpotential förloras, mer avancerad processteknik
Enstegs stratifierad bädd	35	0,33	Stabilt system	Få erfarenheter

Vid *våtrotning* används i regel en kontinuerlig enstegsprocess där rötmaterialen tillförs i ett jämnt flöde eller i mindre satsar. All biogasproduktion sker i röt-kammaren, som är försedd med kontinuerlig omrörning eller ett recirkulations-system. I vissa anläggningar finns en huvudrötkammare och en efterrötkammare där huvuddelen av gasproduktionen, troligen minst 2/3, sker i huvudrötkammaren.

Biogasproduktion i röt-kammare – jämförelser mellan torrrotning och våtrotning

- I torrrottningsanläggningar med flera moduler kan olika material rötas sekventiellt. En störning av processen i en satsvis torrrottningsanläggning får mindre allvarliga konsekvenser än en störning i en våtrottningsanläggning.
- Vid rotning av enbart energigrödor kan brist på mikronäringsämnen uppstå.
- Vid satsvis torrrotning med perkolation är bäddens struktur viktig för att man ska få en god utrötning. Kanalbildning kan orsaka begränsad nedbrytning och därmed lägre gasutbyte.
- Försök visar att biogasproduktionen kan bli lika stor vid torrrotning som vid våtrotning med samma material.
- Vid våtrotning ökar utspädningen och det blir därför möjligt att använda kväverikare rötmaterial än vid torrrotning.

Efterbehandling, rötrestlagring och spridning

Efter avslutad rotning i box/garagerötkammare lastas allt material ut och röt-kammaren töms helt efter varje röttningsomgång. Av rötresten används en viss mängd som ympmaterial och återinblandas med färskt substrat. Resterande del kan lagras och då helst i ett gastätt utrymme där resterande biogasproduktion genom efterrotning kan tas tillvara och en komposteringsprocess förhindras. Alternativt kan rötresten komposteras och lagras i tömda rötsubstratlager. Hygienisering kan ske genom att tillåta ett fritt lufttillträde som startar en komposteringsprocess som driver upp temperaturen i rötmassan till minst + 70°C innan det utrötade materialet

lastas ut ur röt-kammaren. Den flytande rötresten i form av perkolatväska tappas av vid behov och sprids som flytgödsel.

Efter avslutad våtrötning lagras rötresten i ett gastätt rötrestlager där resterande gasproduktion tas tillvara. Genom värmväxlare kan energin i den flytande rötresten återvinnas. Energibalansen förbättras och temperaturen i rötresten sjunker vilket medför att den mikrobiella aktiviteten avtar.

Fasseparering av den flytande rötresten kan ske genom centrifugering eller pressning. Den fasta fraktionen kan lagras och transporteras för sig och den flytande för sig. Spridning av de två faserna kan ske med ordinarie utrustning på gården/lantbruket.

Efterrötning, hygienisering och rötrestlagring – jämförelser mellan torrötning och våtrötning

- Efter behandling lagras rötresten helst i gastäta rötrestlager. Rötrestlagren anpassas till rötrestens konsistens dvs. flytande eller stapelbart.
- Slutlagringen av rötrester från torrötning kan göras mindre än för våtrötning.
- Eventuella behov av hygienisering kan genomföras genom kompostering vilket bedöms mindre energikrävande än för våtrötning.
- Vid torrötning erhålls två fraktioner som kan spridas på odlingsmark. Efter våtröttningsprocess krävs särskild fasseparering för att erhålla en fast fas och en flytande fas.

Säkerhet, emissioner och lukt

Huvuddelen av nyanlagda flytgödsellagren i Tyskland täcks för att minska emissionsrisken av metan (P. Weiland, pers. medd., 2007). Hantering vid inläggning bör ur omgivningshygienisk synpunkt ske så att risken för nedskräpning och spridning av lukt minskas. En vindskyddad plats är att föredra i synnerhet om substrat används som har inslag av lättflyktigt material eller lagrats en längre tid.

Innan utlastning av rötrest måste röt-kammaren evakueras från biogas. Särskild försiktighet måste iakttas så att inte blandningsförhållanden mellan luft och metan skapas som innebär explosionsrisk. Under nedbrytningsförloppet sker i vissa fall att röt-kammaren innehåll lastas ut, omblandas och återförs till röt-kammaren (Andre Boeck, anläggningsägare, pers. komm., 2006). Under dessa tillfällen ökar risken för metanläckage och luktspridning.

Ekonomiska kalkyler

Förutom de processtekniska aspekterna är givetvis de ekonomiska aspekterna viktiga när man bedömer biogasproduktionens möjligheter. En rimlig ekonomisk bedömning är svår att göra utan ett större antal driftsatta anläggningar att hämta uppgifter och erfarenheter från. Investeringskostnaden är även avhängig möjligheten att tillverka och leverera likartade anläggningar av standardiserad karaktär som ger lägre styckepris. Nyuppförandet av röttningsanläggningar i Sverige,

oavsett våt- eller torrrotning, är relativt begränsad och varje anläggning har hittills varit unik och anpassad efter kundens behov. Det går därför inte att göra rimliga ekonomiska bedömningar utifrån svenska uppgifter, speciellt när det gäller torrrotning.

I Tyskland har den höga utbyggnadstakten av anläggningar de senaste åren lett till att ett flertal standardiserade lösningar tagits fram. Huvuddelen av dessa anläggningar är våta rötningstekniker, men även ett flertal torra tekniker har utvecklats och antalet under uppförande ökar stadigt. Dokumentation av de torra teknikerna har hittills tyvärr varit knapphändig, men från och med april 2007 kommer även 15 torrrottningsanläggningar att ingå i det tyska uppföljningsprogrammet (P. Weiland, pers. medd.)

Avsaknaden av uppföljning gör att tillförlitliga ekonomiska uppgifter om torrrotning är svåra att få tag i. De firmor som marknadsför torrrottningsanläggningar lämnar inte gärna ifrån sig kostnadsuppgifter av konkurrensskäl. Mot betalning kan de utföra en förstudie där de räknar på de specifika förutsättningarna i ett konkret fall för att därefter kunna lämna en offert.

Det underlag som används i de ekonomiska beräkningarna i denna studie kommer från en modellkalkyl som erhållits från Mark Richard Paterson, FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V, Tyskland. Underlaget har ursprungligen tagits fram för att jämföra biogasproduktion från majsensilage med torrrotningsteknik eller våtrötningsteknik.

Vi har valt att i kalkylerna nedan huvudsakligen göra en bedömning av produktionskostnaden för rågas när *fastgödsel* används som substrat. Utgångspunkten har varit de tyska modellkalkylerna som modifierats med egna beräkningar och bedömningar med anledning av att substratet ändrats. Vidare görs en jämförelse med produktionskostnad för rågas från majsensilage. I kalkylerna ingår inte mervärdet av rötrestens växtnäringseffekt.

Beskrivning av de tekniker som jämförs

I underlaget från FNR utgår man från fyra olika modellanläggningar i tre olika storlekar (tabell 8).

1. Garagekoncept: Satsvis mesofil torrrottningsprocess med recirkulation av perkolatvätska i garageliknande rötchammare. Antalet rötchammare är minst 4 stycken och ökar i antal med stigande behandlingskapacitet. Substratet läggs in med hjullastare. För att säkerställa den biologiska stabiliteten återförs ca två tredjedelar av rötchammarennehållet då nytt material läggs in. Perkolatvätskan samlas upp i en tank och temperaturregleras innan den återförs till rötchammarna. Fyllnadshöjden är ca 2,5 m och uppehållstiden är 4-6 veckor. Kostnaden för anläggningstypen beräknas i tre storlekar.
2. Garagekoncept med aerob förbehandling: Satsvis mesofil torrrottningsprocess med recirkulation av perkolatvätska och aerob förvärmning. Antalet rötchammare är minst 4 stycken. Substratet läggs in med hjullastare. Mellan 10 och 20 % av rötresten blandas in som ympmaterial vid inläggning av nytt substrat. Inledningsvis startas en aerob process i syfte att få en temperaturstegring som är jämn genom hela substratbädden. Perkolatvätskan samlas upp i tanken och

temperaturregleras innan den återförs till rötkamrarna. Fyllnadshöjden är ca 2,6 m och uppehållstiden är 3-4 veckor. Kostnaden för anläggningstypen beräknas i två storlekar.

3. **Pluggflöde:** Kontinuerlig halvtorr termofil pluggflödesprocess med recirkulation av perkolatväska och aerob förvärmning. Anläggningen består av en liggande rökammare. Substratet tillförs rökammaren kontinuerligt. Perkolatväska samlas upp i tank och temperaturregleras innan det återförs till rökammaren. Substratet förflyttas i rökammaren med hjälp av medbringare monterade på en horisontellt liggande axel som är infästad i rökammarens gaveländar. Omrörningen är långsamgående så att substratet inte ska blandas i axiell riktning utan enbart i radiell riktning. Detta medger en bra gasavgång från substratet. Processen drivs vid termofil temperatur med uppehållstid 3-4 veckor. Kostnaden för anläggningstypen görs endast för större substratmängder, dvs. den största storleken.
4. **Våtrötning:** Kontinuerlig totalomblandad mesofil våtröttningsprocess med stående rökammare. Traditionell våtröttningsanläggning med i höjddled reglerbar omrörning. Uppvärmning sker med hjälp av rörslingor monterade på rökammarens insida. Taket är kombinerat gaslager av dubbelmembran. Processen är utformad med avvattning och cirkulation av processväska så att en fast rötrest motsvarande rötrest från torrötning erhålls. Kostnaden för anläggningstypen beräknas i tre storlekar.

Tabell 8. Basdata för de tre torröttningskoncepten samt ett våtröttningskoncept som använts vid de ekonomiska beräkningarna.

Anläggning	Kapacitet ton/år	Antal rökammare st	Vol/rötk m ³	Tot vol m ³	Fyllnadshöjd m	Upphållstid
Garagekoncept	3 600	4	360	1 440	2,50	4-6 v
	5 700	5	420	2 100	2,60	4-6 v
	11 000	8	460	3 680	2,55	4-6 v
Garagekoncept aerob förbehandling	5 700	4	420	1 680	2,60	3-4 v
	11 000	8	460	3 680	2,55	3-4 v
Pluggflöde	11 000	1	1 500	1 500	–	3-4 v
Våtrötning	3 600	1	890	890	–	35 d
	5 700	1	1 450	1 450	–	35 d
	11 000	1	2 300	2 300	–	35 d

De valda storlekarna baseras på tillgängliga koncept i Tyskland och är relativt stora om man betraktar det ur ett gårdsperspektiv. För majsensilage omfattar de tre storleksnivåerna ungefär 80, 130 respektive 250 ha. I de kalkyler som vi räknat fram används samma storlek på anläggningarna för fastgödsel och vi har antagit att mängden material som hanteras är densamma som för majsensilage. Detta innebär att anläggningarna för gödsel omfattar någonstans i storleksordningen 800-2 000 kor och därmed i första hand bör betraktas som samverkansanläggningar.

Investeringar

Den investering som görs indelas i följande poster:

Byggnad

Omfattar byggnad, markarbeten, fundament, röt-kammare med uppvärmnings-system och isolering samt lagring för perkolatväska, gaslager (gasklocka, ballong eller dubbelmembran) och biofilter. Garagekonceptet utgörs av rektangulära tunnelliknande röt-kammare med gastäta portar samt en lagringsbassäng för perkolatorväska som är gemensam för samtliga röt-kammare. Biofilter ingår för evakueringsluft vid tömning. Pluggflödesanläggningen består av en liggande röt-kammare med medbringare. Vårtrötningsanläggningen består av en cirkulär stående röt-kammare med omrörare där taket utgör gaslager av dubbelmembran.

Teknik inklusive el- och gasteknik

Denna post omfattar databaserad utrustning, maskinkomponenter såsom skruvar, pumpar, sönderdelare för gödsel och avvattare (vårtrötning), uppvärmning, reglering och gasteknik. Kostnaderna för inlastning i de torra systemen ingår under driftskostnader. Övervakning, styrning och reglering är relativt lika för de båda systemen.

Substrat- och rötrestlager

I anslutning till röttningsanläggningen krävs en hårdgjord yta tillräckligt stor för att hantera och blanda substrat som ska rötas samt hantera rötrest. Vid rötning av fastgödsel är utgångspunkten att lager för fastgödsel finns där anläggningen uppförs samt att fastgödsel som transporteras till och från anläggningen gör det i containrar med växelflak. Vid vårtrötning med avvattning bedöms överskotts-väska motsvara den mängd som erhålls vid torrtrötning och den extra lagerkapacitet som byggs motsvarar lagring av den mängden i 8-9 mån.

Planering, tillstånd och igångsättning

I den tyska ursprungskalkylen ligger planering, tillstånd och igångsättning under investering. Vidare ingår i den tyska ursprungskalkylen även investering för kraftvärme, men i den här föreliggande kalkylen har den investeringen borträknats för att erhålla en produktionskostnad av rågasen.

Kapital- och driftskostnader

Kapitalkostnaderna omfattar årliga kostnader på investeringskostnaderna beräknade med annuitetsmetoden.

Driftkostnaderna består av:

- Reparations- och underhållskostnader
- Personal för förbehandling av substrat, övervakning och drift av röttningsanläggningen
- Hjulastare för in- och utlastning vid torrtrötning
- Substratkostnad
- Analyskostnader
- Elkostnad för drift av maskinutrustning
- Processenergi för uppvärmning av röt-kammaren och perkolationsväska
- Transport av substrat och rötrest
- Försäkrings- och förvaltningskostnader

Grundförutsättningar för de ekonomiska kalkylerna

Grundförutsättningarna för de ekonomiska kalkylerna samt producerade mängder rågas och motsvarande energiinnehåll presenteras i tabell 9 och 10.

Tabell 9. Grundförutsättningarna för de ekonomiska kalkylerna.

Ränta	4,5 %
Nyttjandetid biogasanläggning	20 år
– Byggnad	20 år
– Teknik	10 år
Reparation och underhåll	1,5 % av investering på torrrotning 2,5 % av investering på våtrötning
Försäkring av biogasanläggning	4 promille av investering på byggnader 2 promille av investeringen på lager
Elförbrukning	0,05 kWh per kWh rågas
Värmeförbrukning	0,10 kWh per kWh rågas
Elkostnad	0,7 kr/kWh
Värmekostnad	0,4 kr/kWh
Personalkostnad	230 kr/h
Tidsåtgång personal	800 h/år
Hjullastarkostnad	345 kr/h
Substratkostnad	0 kr/ton TS för gödsel 670 kr/ton TS för majsensilage
Transportkostnad gödsel	3 öre/kWh rågas

I tabell 10 redovisas den mängd rågas och energimängd som erhålls för fastgödsel vid de olika anläggningsstorlekarna. Även motsvarande mängder redovisas när majsensilage används som substrat. Beräkningarna för fastgödsel baseras på TS-halten 32 %, halten VS av TS 81 % och metanutbytet 210 m³/ton VS. För majsensilage är beräkningarna baserade på TS-halten 30 %, halten VS av TS 90 % och metanutbytet 350 m³/ton VS.

Tabell 10. Erhållen mängd rågas och energi relativt anläggningsstorlek.

Substratmängd ton	Fastgödsel		Majsensilage	
	Metanproduktion m ³ /år	Energimängd MWh	Metanproduktion m ³ /år	Energimängd MWh
3 600	198 000	1 940	340 200	3 330
5 700	313 500	3 070	538 600	5 280
11 000	605 000	5 930	1 039 500	10 190

För fastgödsel blir produktionen ca 2-6 GWh per år och motsvarar metanflöden på ca 20-70 m³/h medan för majsensilage blir produktionen 3-10 GWh per år med metanflöden på ca 40-120 m³/h.

Resultat av ekonomiska beräkningar

Fastgödsel

Investeringskostnaderna för rötning av fastgödsel vid en anläggningskapacitet på 3600 t/år redovisas i tabell 11.

Tabell 11. Investeringskostnader i SEK för torrrotning med garagekoncept respektive våtrotning motsvarande en anläggningsstorlek på 3 600 ton fastgödsel

	Garagekoncept	Våtrotning
Rötkammarvolym, m ³	1 440	890
Energimängd, kWh/år	1 942 400	1 942 400
Byggnad	2 900 000	1 170 000
Teknik inkl el och gasteknik	2 000 000	1 020 000
Avvattare och sönderdelare	–	368 000
Lager för substrat och rötrest	60 000	60 000
Planering och tillstånd	250 000	140 000
Igångsättning	55 000	30 000
Summa	5 265 000	2 788 000
Specifik inv. kostnad, kr/m³_{rk}	3 656	3 133

Den totala investeringsnivån är avsevärt högre (närmare 90 %) för torrrotning än för våtrotning. Den större rötkammarvolymen och den högre materialåtgången vid uppförande av rätblockiga rötkammare jämfört med cirkulär rötkammare vid uppförande av motsvarande volym bidrar till det (A-Betong, 2007). Detta bekräftar även de uppgifter som erhållits från leverantörer av anläggningar i Tyskland (LOOCK Biogasystem GmbH, Bioferm, Linde) om att investeringskostnaden för satsvis torrrottningsanläggning är dyrare än för motsvarande våtrottningsanläggning. Valet av material för våtrottningskonceptet påverkar dock kostnaderna mycket. En anläggning med rötkammare av betong kostar ca 3 700 kr/m³ och en anläggning med rötkammare av stål kostar ca 5 700 kr/m³ (FNR Erbgénisse des Biogas-Messprogramms 2005, A-Betong 2007).

Investeringsnivån per reaktorvolym är dock endast 17 % högre för torrrottningsanläggningen på grund av den större reaktorvolymen. Vidare är teknikdelen närmare dubbelt så dyr för torrrotning bl.a. beroende på att rör och ledningsdragning, mätare och kontrollutrustning blir betydligt mer omfattande för fyra rötkammare än för en rötkammare.

De specifika produktionskostnaderna per år för de två koncepten redovisas i tabell 12.

Tabell 12. Resultat av ekonomisk jämförelse (SEK) mellan satsvis torrötningsanläggning och kontinuerlig totalomblandad våtrötningsanläggning för 3 600 t/år av fast nötgödsel.

		Garagekoncept	Våtrötning
Rötkammarvolym	m ³	1 440	890
Mängd energi	kWh/år	1 942 400	1 942 400
Kapital-	Byggnad (avskr. 20 år)	220 800	92 000
Kostnader	Teknik (avskr. 10 år)	304 000	156 400
	Avvattn. och sönderdel. (avskr. 10 år)	–	56 000
	Lager (avskr. 20 år)	5 000	5 000
	Planering, tillstånd och igångsättning	37 000	28 000
	Summa Kapitalkostnader	566 800	337 400
Drift- och	Underhåll och reparationer	79 000	70 000
underhållskostnader	Personal	184 000	184 000
	Hjullastare	143 000	62 000
	Analysverksamhet	37 000	37 000
	Delsumma	443 000	353 000
	Substratkostnad	–	–
	Elkostnad	9 000	68 000
	Värmekostnad	78 000	78 000
	Transport gödsel	58 000	58 000
	Delsumma	145 000	204 000
	Försäkring	21 000	12 000
	Förvaltning	18 000	18 000
	Summa	39 000	30 000
	Summa drift- och underhållskostn.	627 000	587 000
	Total årskostnad	1 193 800	924 400
	Specifik prod.kostnad, kr/kWh	0,61	0,48

Kapitalkostnaderna utgör 47 % av totalkostnaderna för torrötning och 36 % för våtrötning. Bland driftskostnaderna skiljer framförallt den högre hjullastarkostnaden vid torrötning och vid våtrötning är elkostnaden betydligt högre pga. omrörare och pumpar. Den specifika produktionskostnaden blir ca 13 öre högre per kWh producerad biogas för torrötning med garagemodellen.

För att kunna jämföra den specifika investeringskostnaden per reaktorvolm och den specifika produktionskostnaden i kr per kWh för de andra torrötningskoncepten samt vid olika anläggningsstorlekar har en sammanställning gjorts i tabell 13. Förutom en jämförbar grundkalkyl har även en känslighetsanalys med beräkningar gjorts som omfattar ett investeringsstöd på 30 %, vilket motsvarar det förslag som framfördes i den statliga utredningen ”Bioenergi från jordbruket – en växande resurs (SOU 2007:36)”. Vidare görs en beräkning som bygger på ett antagande att framtida utvecklingsinsatser eller annan värdering av eget arbete och användning av begagnade och billigare utrustning skulle kunna minska investeringskostnaderna för torrötning med 25 %. Eftersom metanutbyte kan variera beroende på sammansättning och hur väl materialet rötas ur görs även en jämförelse om metanutbyten minskar eller ökar med 20 %.

Tabell 13. Jämförelse av specifik investeringskostnad ($\text{kr}/\text{m}^3_{\text{rk}}$) och specifik produktionskostnad (kr/kWh) för biogasproduktion med olika rötningskoncept och anläggningsstorlekar för rötning av fastgödsel.

	Kapacitet ton/år	Spec. inv.kost. $\text{kr}/\text{m}^3_{\text{rk}}$	Spec. produktionskostnad, kr/kWh				
			Grund- kalkyl	30% invest. stöd	30% invest. stöd+25% lägre invest. Torrötning	30% invest. stöd+20% lägre metan- utbyte	30% invest. stöd+20% högre metan- utbyte
Garagekoncept	3 600	3656	0,61	0,53	0,48	0,66	0,44
	5 700	3344	0,54	0,46	0,42	0,58	0,39
	11 000	3202	0,48	0,42	0,38	0,52	0,35
Garagekoncept aerob förbeh.	5 700	3769	0,44	0,38	0,35	0,47	0,32
	11 000	2965	0,40	0,34	0,31	0,43	0,29
Pluggflöde	11 000	8132	0,43	0,37	0,37	0,46	0,31
Våtrötning	3 600	3133	0,48	0,42	0,42	0,53	0,35
	5 700	2477	0,39	0,35	0,35	0,44	0,29
	11 000	2116	0,31	0,28	0,28	0,36	0,25

Den specifika investeringskostnaden varierar mellan 2 116 och 3 769 kr/m^3 röttkamare om man bortser från kontinuerlig torrötning. Generellt är specifika investeringskostnaden lägre för våtrötningkonceptet än för samtliga torrötningkoncept. Kontinuerlig pluggflödesanläggning har ca tre gånger så hög investeringskostnad per reaktorvolym jämfört med övriga anläggningskoncept. Detta beror på en låg reaktorvolym i förhållande till mängden material som processas, vilket innebär att reaktorvolymen utnyttjas effektivt med korta uppehållstider.

Produktionskostnaden sjunker generellt med större anläggningar och högre produktionskapacitet. För garagemodellen minskar produktionskostnaden med ca 13 öre från den minsta (3 600 t/år) till den största (11 000 t/år) i grundkalkylen, medan produktionskostnaden för våtrötning med motsvarande anläggningsstorlek minskar med 17 öre och når 31 öre/kWh, vilket är den lägsta produktionskostnaden i grundkalkylen. Produktionskostnaderna vid våtrötninganläggningarna ligger 5-17 öre/kWh lägre än för torrötning beroende på storlek och jämförande koncept.

Produktionskostnaden vid satsvis torrötninganläggning med aerob förvärmning är 8-10 öre lägre än för satsvis torrötning utan aerob förvärmning vid samma anläggningsstorlek. Produktionskostnaden vid den kontinuerliga pluggflödesanläggningen (11 000 t/år) är ca 5 öre lägre än motsvarande satsvisa torrötninganläggning utan aerob förvärmning, medan den har 3 öre högre produktionskostnad än motsvarande satsvisa torrötninganläggning med aerob förvärmning

Majsensilage

Eftersom den ursprungliga tyska kalkylen är utformad som en jämförelse för rötning av majsensilage presenteras även beräkningar för hur produktionskostnaden skulle se ut i fall majsensilage rötades (tabell 14). I detta fall finns substratkostnader med i form av majsensilage samt också en ökad kostnad för investering i substrat och rötrestlager. Substratlagerkapacitet och investeringskostnader beräknas med utgångspunkt från substratmängden. Kostnaden för plansilo är ca 230 kr/m^3 för mindre än

10 000 m³ och 184 kr/m³ för mängder större än 10 000 m³. Omräknat ger detta ca 690 kr/m² respektive 552 kr/m². För lagring under 8 månader av majsensilage med lagringshöjd 3 meter krävs ca 2 500 m² för 3 600 t/år, 3 950 m² för 5 700 t/år och 7 620 m² för 11 000 t/år. Lagerkostnaden för substrat blir 1 725 000 kr, 2 725 500 kr respektive 4 206 240 kr.

Tabell 14. Jämförelse av specifik investeringskostnad (kr/m³_{rk}) och specifik produktionskostnad för biogasproduktion med olika rötningskoncept och anläggningsstorlekar för rötning av majsensilage.

	Kapacitet ton/år	Spec. inv.kost. kr/m ³ _{rk}	Spec. produktionskostnad, kr/kWh				
			Grund- kalkyl	30% invest. stöd	30% invest. stöd+25% lägre invest. Torrötning	30% invest. stöd+20% lägre metan- utbyte	30% invest. stöd+20% högre metan- utbyte
Garagekoncept	3 600	4939	0,62	0,56	0,53	0,70	0,47
	5 700	4455	0,56	0,51	0,48	0,64	0,42
	11 000	4403	0,51	0,46	0,44	0,58	0,37
Garagekoncept aerob förbeh.	5 700	5153	0,53	0,49	0,47	0,61	0,41
	11 000	4160	0,49	0,45	0,43	0,56	0,37
Pluggflöde	11 000	11242	0,53	0,48	0,46	0,60	0,40
Våtrötning	3 600	4993	0,57	0,53	0,52	0,66	0,44
	5 700	3573	0,52	0,49	0,48	0,61	0,41
	11 000	3972	0,47	0,44	0,43	0,55	0,37

Den specifika investeringskostnaden är generellt högre vid majsensilagerötning än vid fastgödselrötning (jämför tabell 13) eftersom investeringskostnaderna för substrat- och rötrestlager är högre. Variationen är mellan 3 573 och 4 939 kr/m³ röttkammare om man bortser från kontinuerlig torrötning.

Produktionskostnaderna är generellt något högre än för fastgödsel. I grundkalkylen för majsensilage är produktionskostnaden för den minsta anläggningen 0,62 kr/kWh medan den för fastgödsel är 0,61 kr/kWh. De högre kostnaderna i form av kostnad för substrat samt substrat- och rötrestlager uppvägs till stor del av ett högre metanutbyte. Det är inte heller lika stor skillnad i produktionskostnad mellan de olika rötningskoncepten. I fallet med 30 % investeringsstöd och den största anläggningen varierar priset endast mellan 44 öre och 48 öre per kWh rågas. Effekten av ett höjt eller sänkt metanutbyte visar sig, liksom för fastgödsel, vara viktigt för produktionskostnaderna. Med ett ökat metanutbyte på 20 % och ett investeringsstöd på 30 % skulle produktionskostnaden i den största anläggningen vara lika stor för garagekonceptet, garagekonceptet med aerob värmning och våtrötningen, dvs. 0,37 kr/kWh.

Diskussion ekonomiska kalkyler

Våtrötning ger lägre produktionskostnader än torrötning både för fastgödsel och för majsensilage. Delar av orsaken är att våtrötningstekniken har utvecklats under en betydligt längre tid jämfört med torrötning. Generellt gäller även att produktionskostnaden minskar med ökad produktionskapacitet samt att skillnaden mellan de olika koncepten minskar.

För fastgödsel och den största anläggningen visar grundkalkylen ett spann på 0,31-0,48 kr/kWh. Med ett investeringsstöd på 30 % blir produktionskostnaden 0,28- 0,42 öre/kWh och om man dessutom förutsätter en potential i att minska investeringskostnaden med 25 % för torrötning så blir produktionskostnaden 0,28-0,38 kr/kWh.

För majsensilage och den största anläggningen blir produktionskostnaden 0,47-0,53 kr/kWh . Enligt beräkningar baserat på uppgifter från FNR Resultat av Biogas-Messprogrammet (2005) är produktionskostnaden i spannet 0,15-0,52 kr/kWh. I detta fall finns även betydligt större anläggningar med vilket ger lägre produktionskostnader. I ett examensarbete utfört vid Institutionen för växtproduktion och ekologi vid SLU (Eriksson m.fl., 2007) redovisas en något lägre produktionskostnad på 0,40 kr/kWh vid rötning av majsensilage i en våtröttningsanläggning på 10 GWh, vilket motsvarar den största anläggningen i föreliggande studie.

De tyska kalkylerna som varit utgångspunkt för de kalkyler som redovisas i denna studie förutsätter genomgående nyinvesteringar och att anläggningsarbete och byggnation utförs av entreprenörer. Kalkylen kommer givetvis att påverkas av hur den egna tiden värdesätts för en investerare i biogasteknik och om det finns möjlighet att utföra delar av arbetet själv samt möjligheten att införskaffa billigare utrustning. Vidare har i dessa beräkningar inte förbättrade växtnäringseffekter i rötresten värdesatts. Med en ökad anläggningsstorlek ökar möjligheterna att avsätta gasen till fordonsgas, och därmed erhålla en högre betalningsvillighet för gasen. I Tyskland innebär bonusen för torrötning att man kan acceptera en något högre produktionskostnad vid torrötning än vid våtrötning eftersom intäkterna från levererad el ökar. Dessa förutsättningar finns inte i Sverige.

Utvecklingsbehov

Grunden för framtida forsknings-, utvecklings- och demonstrationsbehov och insatser ligger i att åstadkomma en tillfredställande ekonomi för torrötning. Förutom enkel, robust, användarvänlig, processsäker och kostnadseffektiv rötningsteknik hänger en god ekonomi även samman med rationell hantering av materialet som ska rötas, anläggningsstorleken, ett effektivt utnyttjande av rötresten i växtodlingen samt en säkerställd avsättning av producerad biogas alternativt i form av förädlad energi (el, värme, fordonsgas). Denna studie omfattar inte avsättningen av biogas/energi eftersom det är en gemensam frågeställning oavsett rötningsteknik.

I dagsläget finns osäkerheter kring lönsamheten att investera i biogas oavsett om det är våtrötning eller torrötning. I den nyligen presenterade statliga utredningen ”Bioenergi från jordbruket – en växande resurs (SOU 2007:36) föreslås ett investeringsstöd på 30 % av investeringskostnaderna för att påskynda utvecklingen av gödselbaserad biogasproduktion. Stödet föreslås även för samrötning med andra substrat upp till 50 %, eftersom det förbättrar metanutbytet. Skulle ett sådant stöd komma tillstånd skulle det innebära betydligt bättre ekonomiska förutsättningar för investering i både våta och torra rötningstekniker.

Stapelbara substrat medger större transportavstånd från uppkomstkällan till biogas-anläggningen än för utspädda substrat med låg torrsustanshalt. Motsvarande gäller för transport av stapelbar rötrest. Detta ger goda förutsättningar för torrötning när det gäller etablering av gemensamhetsanläggningar. Det finns stora ekonomiska skalfördelar i allt från hantering, röttningsanläggning och förädling av biogas

(framförallt till fordonsgas). Vidareutveckling av ekonomiska beräkningsmodeller där hänsyn kan tas till lokala förutsättningar för att finna möjligheter till ökad lönsamhet är nödvändig. Förutsättningar för samverkansanläggningar är ett område där fortsatt utrednings- och utvecklingsarbete bör ske. För att öka erfarenhetsbasen i Sverige skulle en samverkansanläggning för demonstration av torrötning vara mycket värdefullt. Arbetet bör även omfatta ägande- och organisationsformer (aktiebolag, handelsbolag, ekonomisk förening). Nätverkande bland aktörer inom området är viktigt och bör gynnas för att sprida kunskap och dela erfarenheter.

Utveckling och implementering av torrötning förutses fortsätta i en hög takt i Tyskland under de närmaste åren, framförallt beroende på den teknikbonus som ges. En kontinuerlig bevakning av utvecklingen i Tyskland är därför viktig ur ett svenskt perspektiv. Översättning av de utvärderingar och rapporter som produceras till svenskt informationsmaterial är en betydelsefull del i kunskapsspridningen om tillgänglig teknik.

Utöver de ovan angivna övergripande insatserna har behov av ett antal process-specifika utvecklingsinsatser identifierats nedan. Beroende på problemets karaktär är detta frågeställningar som belyses i antingen laboratorie-, pilot- eller demonstrationsskala. Generellt kan biologiska problemställningar med fördel studeras i laboratorieskala medan processtekniska problemställningar studeras i pilotskala.

I Tyskland har torrötning framförallt tillämpats med energigrödor (t.ex. majsensilage) eftersom detta ger det bästa ekonomiska utbytet. Med de förhållanden som för närvarande råder i Sverige framstår torrötning huvudsakligen baserad på fastgödsel (djupströ, hästgödsel, fjäderfä mm), som redan finns och hanteras på gårdar, ge ett något bättre ekonomiskt resultat. Ett investeringsstöd för gödselbaserad biogasproduktion skulle förbättra förutsättningarna ytterligare.

Utveckling av effektiva berednings- och inblandningstekniker för gödsel och andra substrat (skörderester och energigrödor) i syfte att åstadkomma en textur och struktur med goda perkolationsegenskaper är ett viktigt moment för att få en jämn utrötning i satsvisa system.

Inblandning av ymp (utrötat material) kräver en omfattande hantering och alltför stora volymer gör att reaktorvolymen utnyttjas dåligt, medan en för låg inblandning kan orsaka processtörningar och lågt metanutbyte. Det finns ett behov av studier kring optimala mängder ymp för olika substrat och substratblandningar. Vidare är även här en effektiv inblandningsteknik av yttersta vikt för en säkerställd processfunktion och att undvika störningar.

En lämplig och jämn temperatur utgör en viktig parameter för den mikrobiella aktiviteten. Vid perkolation fördelas värmen med perkolationsvätskan genom bädden. För att åstadkomma en bra temperaturfördelning krävs därför en jämn genomströmning. Aerob förbehandling är ett sätt att initialt skapa en jämn värme-fördelning samt att undvika en kraftig pH-sänkning då lättomsättbara substanser omsätts. Utveckling av aerob förbehandling med fokus på lämplig lufttillförsel och kontrollerbar temperaturökning bör därför ske.

Flexibla koncept som medger låga investeringskostnader, t.ex. torrötning i plastslangar (motsvarande system för slangensilering) är av stort intresse för att sänka produktionskostnaden. Viktiga frågeställningar i utvecklingen av denna typ av koncept är uppvärmningssystem, isolering, gasuppsamling samt hantering av pressvätska.

Dränkta bäddar är ett system som skapar en jämn fördelning av ymp och värme men tillåter samtidigt en hög torrsbstanshalt i röt-kammaren. Studier kring detta koncept kan t.ex. omfatta substrat med sämre perkolationsegenskaper samt system baserade på uppflöde av processvätska genom bädden.

Tvästegsrötning som omfattar flera torrötningskammare och en separat röt-kammare för metanproduktion (t.ex. anaerobt filter) är ett intressant koncept att vidareutveckla eftersom inympning i torrötningen snabbas på samt att hydrolysen kan optimeras. Därmed minskar inblandningsbehov av ymp och ett effektivare nyttjande av investerad torrötningsvolym kan ske.

Utveckling av system och driftsstrategier för att styra gasproduktionen till tider med högt behov av energi kan ge ekonomiska fördelar. Vid satsvis rötning sker rötningen sekventiellt för att åstadkomma en så jämn gasproduktion som möjligt. Beroende på vilken form av avsättning gasen har bör olika driftsstrategier kunna utvecklas för att på så sätt optimera inkomsten vid försäljning av el, värme eller gas.

Vid rötning av kväverika material (t.ex. fjäderfägödsel samt kväverika grödor som gräs/klöver) finns risk att ammoniumhalten blir hög och därmed hämmar processen. Driftsstrategier för substratblandningar samt tekniker för att avskilja ammonium från processvätskan till en lämplig form för spridning på åkern bör utvecklas.

Vid rötning av ensartade material, t.ex. enbart energigrödor, visar erfarenheten att processtörningar kan uppkomma efter en längre tids drift. Detta beror ofta på brister i näringsammansättningen och studier för att kartlägga och kunna tillföra essentiella näringsämnen är viktiga i dessa fall.

Efterbehandling av den utrötade massan kan behövas för att för att nå hygieniserings effekter samt en bra lagringsbarhet. Olika tekniker för att åstadkomma bästa miljömässiga och ekonomiska teknik för rötrestlagring bör studeras och hur hantering och spridning av rötrest sker på bästa sätt.

Kartläggning av emissioner av ammoniak, metan och lustgas i samband med hantering och lagring i framförallt satsvisa system bör göras. Vidare bör åtgärder för att minimera emissioner av växthusgaser studeras.

Orienterande fältförsök för bedömning av växtnäringsvärde och effekter av röt-rester från torrötning bör utföras.

Litteratur

- Agrigas 2002, Agrigas – Utveckling av teknik för att utnyttja biogaspotentialen i restprodukter med höga torrhalter. Lägesrapport 2002, www.agrigas.lu.se
- Angeledaki, I & Ahring BK (1994). Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: effects of temperature. *Water Research*, vil 28, no 3, pp. 559-565.
- Avfall Sverige, 2007. www.avfallsverige.se
- Baere, L.A. de, Verdonck, O. & Verstraete, W. (1986). High rate dry anaerobic composting process for the organic fraction of solid wastes. In: *Biotechnology and Bioengineering Symp. No. 15*. Wiley & Sons, 321-330.
- Begouen, O., Thiebaut, E., Pavia, A. & Pellex, J.P. (1988). Thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste by the VALORGA process. In: Tilche, A. & Rossi, A. (eds) *Anaerobic digestion 1988*. Bologna, 789-792.
- Bengtsson P & Mathisen B. (1993). Pilotprojekt BioLog - Framställning av biogas ur vallgröda genom tvåfasrötning. Pilotförsök på Logården i Gråstorp. Skaraborgs läns hushållningssällskap och Jordbrukstekniska institutet.
- Bernesson, S. & Nilsson, D. (2005). Halm som energikälla – översikt av existerande kunskap. Institutionen för biometri och teknik, SLU, Uppsala 2005
- Bernesson, S., Hansson, K., Robertsson, M. och Thyselius, L. (1999). Torr biogasprocess för lantbruksgrödor – studier av aerob förbehandling, torrsubstans och ympningsförutsättningar. Litteratur genomgång och inledande försök. JTI-rapport Kretslopp och avfall nr 19, JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik, Uppsala.
- Bohn, I. (2006). *Anaerobic digestion of Crop Residues at Low Temperatures*. Doktoralt dissertaion. Department of Biotechnology, Lund University, Sweden. ISBN: 91-89627-46-6.
- Edström, M., Nordberg, Å., Hansson, K. (2004). Utvärdering av gårdsanläggning för torrrotning av vallgröda. JTI uppdragsrapport för Statens Energimyndighet (Projnr P 11810-1)
- Eriksson, E, Karlsson, E & Thorstensson, A. (2007). Biogasproduktion från energigröda – Energi och ekonomi. Projektarbete vid Institutionen för växtproduktion och ekologi, projekt nr 25, SLU, Uppsala
- FNR Ergebnisse des Biogas-Messprogramms, (2005) Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) www.fnr.de
- Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung, (2004). Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) www.fnr.de
- Hawkes DL. (1980). Factors affecting net energy production from mesophilic anaerobic digestion. In *Anaerobic Digestion*, eds Stratford DA., Wheatly BI. And Hughes DE. pp. 131-150. ISBN 0-85334-904-5
- Jarvis, Å., Nordberg, Å., Jarlsvik, T., Mathisen, B. and Svensson, B.H. (1997). Improvement of a grass-clover silage-fed biogas process by the addition of cobalt. *Biomass and Bioenergy*, vol. 12, No. 6 . 453-460.
- Jewell, W.J., Dell'orto, S., Fanfoni, K.J., Jackson, D. & Kabrick, R.M. (1981). Dry anaerobic methane fermentation. *Biogas alcohol fuels prod.* Vol. II, 2, 159-78.
- Jewell WJ, Cummings RJ, Foster AM & Richards BK. (1985). *Engineering Design Considerations for Methane Fermentation of Energy Crops*, Annual Report second year. Vol. 1 och 2 . Gas Research institute. Report nr GRI-86/0131. 511 sidor.

- Jewell, W.J., Cummings, R.J. and Richards, B.K. (1993). Methane fermentation of energy crops: maximum conversion kinetics and in situ biogas purification. *Biomass & Bioenergy* 5, 261-278.
- Jäkel, K. (2004). Wirtschaftlichkeit der Trockenfermentation. I: Gülzower Fachgespräch "Trockenfermentation – Evaluierung der Forschungs- und Entwicklungsbedarf", 49-61.
http://www.fnr.de/pdf/literatur/pdf_127gfg23_trockenfermentation.pdf
- Kreuger, E. & Björnsson, L. (2006). Anaerobic digestion of horse manure with and without co-digestion with grass-clover silage in a batch loaded reactor with percolation. Report, Department of Biotechnology, Lund University.
- Kusch S. (2005) Biogas production with agricultural substrates in simple solid-phase batch digestion systems. Proceedings from the seminar on dry fermentation on-farm, 14 feb. 2005. Vihti, Finland.
- Lay, JJ, Li, YY, Noike, T., Endo, J. And Ishimoto, S. (1997). Analysis of environmental factors affecting methane production from high solids organic waste. *Water Science and Technology*, vol. 36, no 6-7, pp 493-500
- Levin, A. och Nordberg, Å. (1998). Torrötning av vallgrödor. JTI, Uppsala, SLF projekt nr 9776001.
- Linne, M. & Jönsson, O. (2005) Sammanställning och analys av potentialen för produktion av förnyelsebar metan (biogas och SNG) i Sverige.). *Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC)*
- Litrell, O. (2007). Produktion av biogas från fjäderfä gödsel. Gemensam slutrapport från projekten "Produktion av gårdsbaserad energi genom torrötning av fjäderfä gödsel" och "Samverkansmöjligheter kring biogas från gårdsanläggningar (fjäderfä). Slutrapport 2007-01-26. Fjäderfä centrum, Skara. <http://www.fjaderfacentrum.se/filer/Slutrapportbiogas20070126.pdf>
- Liu, K., Sun, G., Wu, X. & Wu, Y. (1987). Research and application of technology for dry-wet biogas fermentation. *Biol. Wastes* 20:303-308.
- Mathisen B., Thyselius L., Brundin H., Svensson B. (1992). Satsvis rötning av hushållsavfall med lakvattenbehandling JTI uppdragsrapport
- Mc Donald P. & Whittenbury R. (1973). The ensilage process. Ur: *Chemistry and biochemistry of Herbage*, 3 (red. G.W Butter & R.W Baily), 33-60. London: Academic Press.
- Mladenovska, Z. & Ahring, BK. (2000). Growth kinetics of thermophilic *Methanosarcina* spp. Isolated from full-scale biogas plants treating animal manures. *FEMS Microbiology Ecology*, vol. 31, no 3, pp 225-229
- Mshandete, A., Björnsson, L., Kivaisi, AK, Rubindamayugi, ST. and Mattiasson, B. (2005). Enhancement of anaerobic batch digestion of sisal pulp waste by mesophilic aerobic pre-treatment. *Water Research* 39, 1569-1575.
- Nash M. (1978). Crop conservation and storage in cool temperature climates. Pergamon Press.
- Nordberg Å & Mathisen B. (1994). Pilotförsök med energilimpa för grönmassa vid Isätra avfallsupplag i Sala. Slutrapport 1994. SLF Dnr. 386/93 Projektnr. 937602. Jordbrukstekniska Institutet.
- Nordberg, Å & Edström, M. (1997). Optimering av biogasprocess för lantbruksrelaterade biomassor. JTI-rapport *Kretslopp & Avfall* nr 11. Jordbrukstekniska institutet, Uppsala.
- Nordberg, Å., Edström, M., Pettersson, C-M. & Thyselius, L. (1997). Samrötning av vallgrödor och källsorterat hushållsavfall. JTI-rapport. *Kretslopp & Avfall* nr 13. Jordbrukstekniska institutet, Uppsala.

- Nordberg, Å., Lindberg, A., Gruvberger, C., Lilja, T. och Edström, M. (1998). Biogaspotential och framtida anläggningar i Sverige. JTI-rapport, Kretslopp & Avfall nr 17.
- Produktion och användning av biogas (2005), ER2007:05, Energimyndigheten 2007.
- Richards, BK., Cummings, RJ., Jewell, WJ. and Herndon, FG. (1991). High solids anaerobic methane fermentation of sorghum and cellulose. *Biomass and Bioenergy*, 1(1): 47-53
- SCB, Hästar och anläggningar med häst (2004)
- SCB Gödsel i jordbruket 2004/2005
- SCB, (2006) Jordbruksstatistisk årsbok
- Schäfer, W., Evers, L., Letho, M., Sorvala, S., Teye, F. and Grantedt A. (2005). Two phase continuous digestion of solid manure on-farm: Plant design, mass, energy, and nutrient balance. In *Proceedings from the 7th FAO/SREN-workshop: The future of biogas for sustainable energy production in Europe*, 30 Nov-2 Dec 2005, Uppsala, Sweden
- Schäfer m.fl. (2006). Dry anaerobic digestion residues on-farm – a feasibility study (www.mtt.fi/met/pdf/met77.pdf)
- SOU 2007:36. "Bioenergi från jordbruket – en växande resurs.
- Sun, C., Wu, Y., Sha, S. & Liu, K. (1987). Dry digestion of crop wastes: studies on dry anaerobic digestion with agricultural wastes. *Biol. Wastes* 20:291-302.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*, McGraw Hill, New York. ISBN 0-07-112865-4 .Weiland, Rieger, Schöder, Kissel, Plogies och Vogtherr 2007.
- Wellinger, A., Wyder, K. & Metzler, A.E. (1992). Kompogas - a new system for the anaerobic treatment of source separated waste. In: Checchi, F., Mata-Alvarez, J. & Pohland, F.G. (eds) *Anaerobic digestion of solid waste*. Venice Stamperia di Venezia, 207-214.
- Wiegant, W.M. (1986). Thermophilic anaerobic digestion of waste and wastewater. PhD. thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Holland.
- Zinder, S.H. (1984). Microbiology of anaerobic conversion of organic wastes to methane: recent developments. *ASM News* 50: 294-298.
- Zimmer E. & Wilkins RJ. (1974). Efficiency of silage systems: a comparison between unwilled and willed silages. Sonderheft 69. *Landbauforschung Völkenrode*.

Personliga meddelanden

Peter Weiland, FAL
 Line Strand, Hushållningssällskapet
 André Boeck, anläggningsägare, Tyskland
 Mark Richard Paterson, FNR

Kommunikation med firmor

LOOCK Biogas-systems GmbH
 Linde-KCA-Dresden GmbH
 BEKON GmbH
 A-betong

Exempel på kommersiella torrötningskoncept och leverantörer

Leverantör	Internetadress
Bioferm	http://www.bioferm.de/
Bio Energy Biogas	http://www.bioenergy.de/
BEKON Energy	http://www.bekon-energy.de/
Biowatt Energy	http://www.biowatt.de/
Cowatec	http://www.cowatec.com/
Eisenmann Maschinenbau	http://www.eisenmann.de/
Haase Energietechnik Gruppe	http://www.haase-energietechnik.de/de/Products_and_Services/Energy_Systems/Compact_Chp_Units/
ISKA	http://www.iska-gmbh.de
Kompogas	http://www.kompogas.ch/
Lehmann Umwelttechnik	http://www.lehmann-maschinenbau.de/
Linde AG	http://www.linde.com
Loock biobassysteme	http://www.tns-loock.de/
OWS Organic Waste systems	http://www.ows.be/
Valorga	http://anaerobicsystems.com/valorga.htm

JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik...

... är ett industriforskningsinstitut som forskar, utvecklar och informerar inom områdena jordbruks- och miljöteknik samt arbetsmaskiner. Vårt arbete ger dig bättre beslutsunderlag, stärkt konkurrenskraft och klokare hushållning med naturresurserna.

Vi publicerar regelbundet notiser på vår webbplats om aktuell forskning och utveckling vid JTI. Du får notiserna hemskickade gratis om du anmäler dig på www.jti.se

På webbplatsen finns även publikationer som kan läsas och laddas hem gratis, t.ex.:

JTI-informerar, som kortfattat beskriver ny teknik, nya rön och nya metoder inom jordbruk och miljö (4-5 teman/år).

JTI-rapporter, som är vetenskapliga sammanställningar över olika projekt.

Samtliga publikationer kan beställas i tryckt form. JTI-rapporterna och JTI-informerar kan beställas som lösnummer. Du kan också prenumerera på JTI-informerar.

*För trycksaksbeställningar, prenumerationsärenden m.m.,
kontakta vår publikationstjänst (SLU Service Publikationer):*

tfn 018 - 67 11 00, fax 018 - 67 35 00

e-post: bestallning@jti.se



JTI – Institutet för jordbruks- och miljöteknik

JTI – Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering

Box 7033, 750 07 UPPSALA

Telefon: 018 - 30 33 00

Besöksadress: Ultunaallén 4

Telefax: 018 - 30 09 56

Webbplats: www.jti.se