



Motiv och möjligheter för vall som biogassubstrat

Motives and means of anaerobic digestion of ley crop

Carl Andås

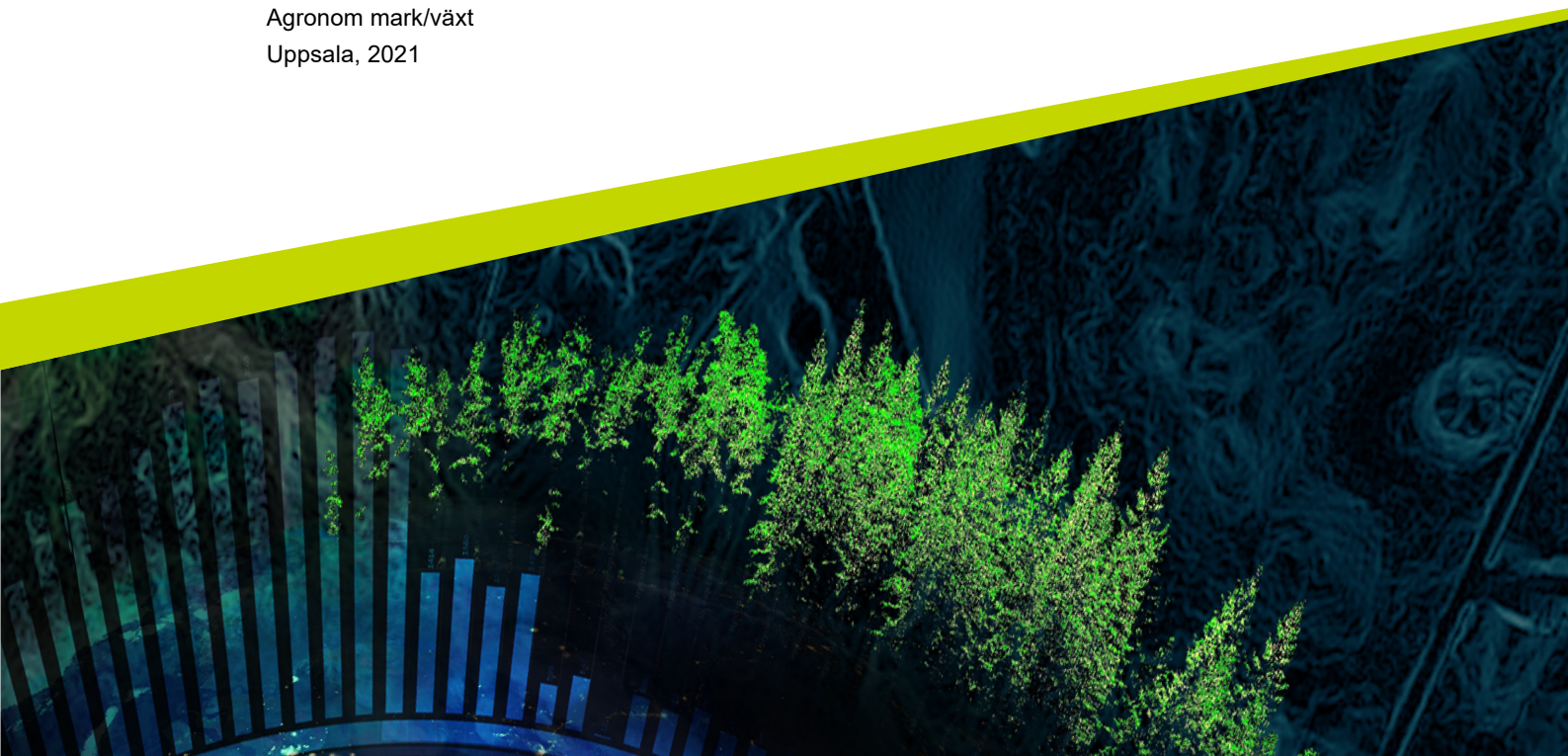
Examensarbete/Självständigt arbete • (15hp)

Sveriges lantbruksuniversitet, SLU

molekylära vetenskaper, 2020:27

Agronom mark/växt

Uppsala, 2021



Motiv och möjligheter för vall som biogassubstrat

Motives and means of anaerobic digestion of ley crop

Carl Andås

Handledare: Anna Schnürer, SLU, Institutionen för molekylära vetenskaper

Examinator: Mikael Pell, SLU, Institutionen för molekylära vetenskaper

Omfattning: 15 hp

Nivå och fördjupning: Grundnivå, G2E

Kurstitel: Självständigt arbete i Biologi

Kurskod: EX0894

Program/utbildning: Agronom – mark/växt

Kursansvarig inst.: Institutionen för molekylära vetenskaper

Serietitel: Molekylära vetenskaper

Delnummer i serien: 2020:27

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2021

Nyckelord: Vall, biogas, anaerob rötning, grass, biogas, anaerobic digestion.

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för molekylära vetenskaper

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Fulltexten kommer dock i samband med att dokumentet laddas upp arkiveras digitalt.

Om ni är fler än en person som skrivit arbetet så gäller krysset för alla författare, ni behöver alltså vara överens. Mer information om publicering och arkivering går att hitta här: <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.

Sammanfattning

Vallgröda som substrat för biogasproduktion är ovanligt i Sverige idag men återaktualiserades i och med Biogasmarknadsutredningen (SOU 2109:63). Vall odlades på ca 1 100 000 ha i Sverige år 2016 och är vår vanligaste gröda. Utöver allmän förekomst har vallen möjlighet att ta upp näring på vintern, minska behovet av insatsmedel för andra grödor och en positiv effekt på kolinlagring i jordbruksmark. Den är dessutom en s.k. Indirect Land Use Change (ILUC)-fri gröda, vilket innebär att den kan beviljas statsstöd fr.o.m. 2020, till skillnad från andra växtbaserade substrat som till exempel majs. Arbetet är en litteraturstudie med syfte att sammanfatta befintlig kunskap om rötning av vallsubstrat, med fokus på gårdsbaserad rötning i Sverige. Vetenskaplig litteratur har sökts i sökmotorerna Elsevier, Google Scholar och SLU Primo och tillämpad litteratur har hämtats från svenska aktörer såsom Hushållningssällskapens Förbund.

Som substrat är vall varierande till sin natur beroende på vallens artinblandning, tid för skörd, strållängd och förbehandlingsmetoder. Grödan är svårrotad till följd av sin svaga buffrande förmåga och samrötas därför gärna med flytgödsel, ett substrat som våra svenska gårdsanläggningar är bättre anpassade för. Mono-rötning av vall har dock också genomförts och detta genererar mer gas än vall som samrötats med nötflytgödsel. Återcirkulation av buffertämnen och tillsatts av mikronäringsämnen så som Co, Na, Ni och Fe identifierades i studien som två nyckelfaktorer för lyckad mono-rötning av vallsubstrat. Utan dessa driftstrategier har rötning av en substratblandning med upp till 30% växtsubstrat varit möjlig. Vid högre andel växtsubstrat krävs återcirkulering av mikronäringsämnen och noggrann övervakning av processen. Det finns många möjliga rötningstekniker för biogasproduktion, och valet påverkas i stor utsträckning av det tilltänkta substratets natur. En viktig parameter vid valet av teknik är substratets innehåll av torrsbstans (TS), där vall är ett substrat som har hög TS-halt, uppåt 40-50%. De flesta av dagens gårdsanläggningar använder emellertid tekniker anpassade för substrat med betydligt lägre TS-halt i s.k. våtrötning. Våtrötning bör därför inte uteslutas i framtida forskning om rötning av vall. Att beakta är att framtidens biogasvallar kan komma att ha multipla syften, ex. som foder eller fånggröda och därför inte alltid kommer att vara perfekt anpassade för rötning. Av olika viktiga parametrar framstår smältbarheten som den viktigaste faktorn för ett vallsubstrats metanutbyte, därför borde skördetidpunkt prioriteras i hanteringen av en biogasvall.

Nyckelord: Vall, biogas, anaerob rötning.

Abstract

Ley is rarely used as a substrate for anaerobic digestion in Sweden today, but it may be facing a renaissance due to the role it has been given by the Swedish public investigation of future biogas production (SOU 2019:63). In the year 2016, ley covered 1 100 000 ha of Swedish arable land and it is the most common crop in Sweden. Apart from abundance, the ley crop possesses the capability to act as a “catch crop” during winter, ability to decrease the need of fertilisers and pesticides in following crops as well as a good carbon fixing potential. Furthermore, it is not covered by the Indirect Land Use Change (ILUC) ban against subsidies for anaerobic digestion of crops, which puts ley in another situation than e.g. maize. This study is a review of current knowledge about anaerobic digestion of ley crop, with emphasis on farm-based biogas production in Sweden. Scientific literature has been searched for in the databases Elsevier, Google Scholar and SLU Primo. Practical literature has been searched for on Google and at the websites of Swedish agricultural companies and organisations such as “Hushållningssällskapens Förbund”, a national union of 17 Rural economy and agri-science societies.

Ley substrate is variable to its' nature and the composition varies depending on species composition, harvest earliness, particle size and pretreatment techniques. Ley substrates are generally difficult to digest in a stable fashion, and therefore they are often co-digested with dairy or cattle slurry. However, there are examples of successful mono-digestion of ley crop, and in those cases the digestion has produced more gas, needing less time and allowing larger loading rate than co-digestion with slurry. Recirculation of buffering substances and addition of trace elements such as Co, Na, Ni and Fe have been identified as key factors for a successful mono-digestion of ley substrate. Without recirculation or addition of trace elements, digestion of a substrate mix with a maximum of 30% of the substrate as plant material appears recommendable. There are many possible plant designs available for anaerobic digestion. The choice of design is largely dependent on the water content of the substrate and the ensiled ley crop could reach up to 40-50% dry matter (DM). Still, most of the Swedish farm-based plants apply wet digestion in co called Continuously Stirred Tank Reactors (CSTRs) which imply that wet digestion should not be overlooked in future research about biogas from ley crop. Future leys grown for anaerobic digestion is likely to have multiple applications (e.g. animal feed), and therefore they may be less adapted for maximum methane yield. In the management of those “biogas leys”, digestibility through early harvests should be prioritized.

Keywords: Grass, biogas, anaerobic digestion

Innehållsförteckning

1. Inledning.....	10
1.1. Om biogassubstrat	10
1.2. Metod.....	11
2. Resultat.....	13
2.1. Grödan.....	13
2.2. Rötningsprocessen	15
2.3. Rötningsanläggningen.....	20
2.4. Vall ur ett större perspektiv.....	21
3. Diskussion.....	24
3.1. Vallen.....	24
3.2. Rötningen	25
3.3. Slutsatser.....	27

Förkortningar

BMP	Biochemical methane potential Mått på hur mycket metan som kan bildas från ett visst substrat, mätt i volym metan per viktenhet av organiskt material. Motsvarar den mängd gas som genereras om substratet rötas ut fullständigt.
CSTR	Continuously stirred tank reactor I en kontinuerlig rötningsanläggning tillförs substratet löpande och rötningsprocessen sker under regelbunden omrörning. Det är den vanligaste tekniken av gårdsbiogasanläggning i Sverige.
HLR	Hydraulic retention time Hydraulisk uppehållstid är den genomsnittliga passagetiden för vätskefasen av substratet. HRT begränsas av hur lättnedbrutet substratet är och bakteriernas tillväxttakt.
OLR	Organic loading rate Organisk belastning avser den mängd organiskt material som matas in i röt-kammaren per tidsenhet. Mäts företrädesvis i kg VS per m ³ d ⁻¹ .
SMY	Specific methane yield Specifik metanavkastning är den volym metan som bildas från en viktenhet organiskt material i stunden. Kan jämföras med det aktuella substratets BMP för att ge en grov uppskattning av effektiviteten i processen.
UASB	Upflow anaerobic sludge blanket En avancerad typ av röt-kammare där alla steg i biogasprocessen sker fysiskt nära varandra. Beskrivs närmare i 2.3.
VFA	Volatile fatty acids Flyktiga fettsyror, ex. acetat och propionat.. produceras under fermentation och anaerob oxidation i biogasprocessen,
VS	Volatile solids (VS) VS andelen innebär innehållet av fast organiskt material, skiljer sig från TS (torrsubstans) genom att inte innefatta aska.

1. Inledning

Vallgröda är en icke fullt utnyttjad energiresurs i Sverige idag. Vall som substrat för biogas återaktualiserades emellertid i och med den statliga utredningen SOU 2019:63, i vilken det bedöms att 4-10 TWh finns outnyttjat, i form av grödor som inte klassas som möjliga för humankonsumtion enligt regelverket för ”indirect land use change” (ILUC). Därför är vall som substrat tillåtet att stödja för energiproduktionsändamål, till skillnad från exempelvis majs eller helsäd. Merparten av de uppskattade 4-10 TWh beräknas bestå i vallgröda. Vall är vår vanligaste gröda och odlingen uppgick år 2016 till strax över 1 100 000 ha (Statistiska centralbyrån 2019). Det är en anpassningsbar perenn gröda med potential att binda mer kol till marken än anueller (Bolinder *et al.* 2010, 2012). Vidare har vall potential att minska behoven av pesticider och gödningsmedel i efterföljande grödor om den införs i en spannmålsdominerad växtföljd (Andersson & Milberg 1996).

Många studier har gjorts av anaerob rötning av vall till biogas (Mussoline *et al.* 2012; McEniry & O’Kiely 2013; Feng *et al.* 2018). Dessa har varit inriktade på förbehandlings-, metanpotential hos olika gräsarter, rötningsteknik med mera men den senaste kunskapen inte sammanfattats nyligen. Studiens syfte är att sammanfatta vetenskaplig och praktisk kunskap om vall som biogassubstrat med gårdsanläggningar i Sverige som utgångspunkt. Studien omfattar rötning av vallsubstrat med olika botanisk sammansättning, mono-rötat eller blandat med gödsel, och produktionsparametrar som tillämpas vid rötning av vallsubstrat.

1.1. Om biogassubstrat

Många produkter i lantbruket kan användas som biogassubstrat, av dem dominerar idag gödsel i flytande form medan endast ett fåtal procent utgörs av energigrödor (ER 2019:23). Ett högt metanutbyte är eftersträvarsvärt för ett biogassubstrat, men stabiliteten och hastigheten hos rötningprocessen är också viktiga faktorer som hänger samman med valet av substrat (Nizami & Murphy 2010; Schnürer & Jarvis 2017). De beståndsdelar av ett substrat som blir omvandlat till metan är organiska substanser såsom kolhydrater, proteiner och fetter. Dessa beståndsdelar kan vara lättare eller svårare att bryta ned beroende på näringsämnenas biokemiska

beskaffenhet och själva materialets partikelstorlek. Tiden det tar att röta ut ett material är också avhängigt av partikelstorlek och substratets biokemi. Vidare påverkar ett substrats innehåll av enklare kemiska komponenter, spårämnen och mikronäring samt pH-värde, tillväxten av de mikroorganismer som är inblandade i rötningsprocessen och är således viktiga parametrar för processens stabilitet och effektivitet (Schnürer & Jarvis 2017). Energitäta produkter med högt innehåll av fett utgör substrat med hög metanpotential. Vall däremot är ett substrat i huvudsak bestående av lignocellulosa, vilket ger lägre metanpotential och kräver längre retentionstider vid rötning än fettrika substrat, samt bidrar med låg buffertkapacitet (Labatut *et al.* 2011; Schnürer & Jarvis 2017). Vall har dock fördelar, däribland en högre TS-halt (d.v.s. lägre andel vatten) och metanpotential än exempelvis gödsel från nöt (Wall *et al.* 2014), goda odlingsförutsättningar i Sverige och allmän förekomst (*Statistiska centralbyrån* 2019). Dessutom har vall miljömässiga fördelar i odlingen jämfört med årliga grödor (Andersson & Milberg 1996; Bolinder *et al.* 2010, 2012).

1.2. Metod

Arbetet är en litteraturstudie med syftet att sammanställa befintlig kunskap om anaerob rötning av vall, dess utförande och fördelar. Arbetet utgår från en agrar synvinkel, med gårdsbaserad rötning i fokus. Resultaten är uppdelade i fyra avsnitt. Det första berör olika skillnaderna mellan olika arter av vallväxter och hantering av grödan i fält. Det andra kapitlet avhandlar rötningsprocessen och parametrar som påverkar rötningens stabilitet. I nästa kapitel berörs olika typer av rötningsanläggningar och vilka som kan lämpa sig för rötning av vall. Det sista kapitlet innehåller resultat kring odlings- och miljömässiga motiv för att röta vall. Ämnet förbehandling av substrat är uppdelat mellan det första och andra kapitlet då vissa förbehandlingstekniker utförs i fält. Diskussionen är uppdelad i en odlings- och en rötningssdel.

De huvudsakliga söktermer som använts för insamlandet av data har varit ”grass, biogas, anaerobic digestion, silage, pretreatment, ryegrass, fescue, timothy”, eller kombinationer av dessa på svenska och engelska. Att använda ”grass” som sökord motiveras av att en sökning på ”silage” ofta ger träffar på studier där ensilerad majs undersökts, snarare än ensilerad vallgröda. Rötning av majs- eller helsädesensilage har inte berörts i arbetet då dessa grödor omfattas av ILUC. Grästyperna ”ryegrass”, ”fescue” och ”timothy” är vanliga i Sverige och norra halvan av Europa och användes som sökord för att ge träffar på studier utförda i ett liknande klimat som i Sverige. En sökning på ”grass biogas” genererar i skrivande stund 5 473 träffar

på Elsevier (www.sciencedirect.com) vilket varit den mest använda sökmotorn i det här arbetet. Även databasen SLU Epsilon och sökmotorerna Google Scholar samt SLU Bibliotek har använts. Tillämpad litteratur har sökts på Google med ovannämnda sökord på svenska och hämtats från Hushållningssällskapens Förbund, RISE och Energiforsk AB.

2. Resultat

Nedan följer resultaten av den undersökta litteraturen. Tabellen på sid. 16 innehåller resultat och driftsparametrar för rötning av vallsubstrat, enbart eller samrötat med gödsel. Energiinnehåll, smältbarhet och botanisk sammansättning används som begrepp för att beskriva vallsubstrat. Energiinnehåll mäts vanligen i MJ/kg TS och smältbarhet mäts som andel av organisk substans (VS) som är möjlig för nötkreaturs tarmflora att smälta (Krizsan & Nyholm 2012). Varken energiinnehåll eller smältbarhet är särskilt framtagna för att beskriva vall som biogassubstrat men används i flertalet studier som undersökts för det här arbetet. Botanisk sammansättning avser fördelningen av växtarter i vallen.

2.1. Grödan

Det viktigaste för en vallgröda som skall användas till biogas är i första hand energiinnehållet och smältbarheten, vilket kopplas till botanisk sammansättning och fysiologisk ålder (Amon *et al.* 2007; Nizami & Murphy 2010; Himanshu *et al.* 2018). Smältbarheten hos ett gräs beror på i mycket på förhållandet mellan fibrer och lösliga kolhydrater samt typen av fibrer. Hög smältbarhet innebär lågt fiberinnehåll och högt innehåll av lösliga kolhydrater (McEniry & O’Kiely 2013). Dessa parametrar beror i sin tur på tiden för skörd, där senare skörd har gett lägre smältbarhet samt lägre specifik metanavkastning, för både gräs- och klöverarter (Prochnow *et al.* 2009; Seppälä *et al.* 2009; McEniry & O’Kiely 2013). Växtsättet hos vallgräs varierar, de kan ge högre eller lägre avkastning över ett år, över flera år och över flera skördar samma år beroende på förmåga till återväxt (Halling & Larsson 2017). Detta gör i sin tur att vissa vallgräs ger högre avkastningar än andra arter under olika delar av säsongen och under sin livstid.

I en irländsk studie labbttestades ensilage av fem gräsarter, som är vanliga i nordvästra Europa, för metanpotential (BMP) i flaska. Engelskt rajgräs påvisades ha en något högre specifik metanavkastning än hundäxing i renbestånd, vilket man kopplade till olika nivåer av vattenlösliga kolhydrater. I övrigt var skillnaderna små mellan olika gräsarter (McEniry & O’Kiely 2013). Hundäxing är enligt Liljenberg *et al.* (1995) ett högavkastande gräs men med relativt lågt innehåll av vattenlösliga

kolhydrater, vilket överensstämmer med McEniry & O'Kiely:s (2013) resultat. En litauisk studie från 2014 jämförde en inhemsk sort av rörsvingel respektive hundäxing mot rörflen (Palaton) med avseende på metanavkastning över två vallår (Butkutė *et al.*). Rörflen framstod i den studien som den mest lämpade gräsarten. En annan studie i Finland visade på motsatt förhållande mellan den möjliga metanpotentialen (BMP) hos rörflen respektive hundäxing (Seppälä *et al.* 2009). I samma studie ingick även timotej och rörsvingel, som båda gav högre BMP än rörflen.

Himanshu *et al.* (2018) undersökte bland annat metanpotentialen (BMP) hos engelskt rajgräs och rödklöver. Engelskt rajgräs konstaterades ha högre metanpotential än rödklöver, vilket kopplades till högre sockerinnehåll och lägre ligninnehåll. Lignin är svårnedbrutet i en biogasprocess p. g. a. att dess inkapsling av hemicellulosa minskar effektiviteten med vilken hemicellulosan hydrolyseras. Det engelska rajgräset hade lägre innehåll av lignin än rödklöver vid både sen och tidig skörd. Samma skillnad i metanpotential mellan högavkastande rödklöver och högavkastande gräs har antytts av Larsen *et al.* (2012) och konstaterats av Lehtomäki (2006), då rörflen jämfördes med rödklöver. Vidare har gräs/klövervall påvisats ha högre metanpotential än ren rödklövervall (Lehtomäki *et al.* 2008; Wahid *et al.* 2015).

Strållängden och därmed partikelstorleken påverkar nedbrytningen av ett substrat, där en större specifik yta ger mer kontakt åt mikroorganismerna som ska bryta ned substratet (Weiland 2010; Prade *et al.* 2015; Feng *et al.* 2018). Vid kortare strållängd ökar chanserna för snabb pH-sänkning och därigenom en lyckad ensilering. Det är positivt då också det minskar energiförlusterna under lagringsprocessen. Något att beakta i detta avseende är att förluster av flyktiga ämnen blir högre om gräset hackas fint i fält (Prade *et al.* 2015; Teixeira Franco *et al.* 2016). Feng *et al.* (2018) uppnådde ingen signifikant skillnad i metanpotential mellan rörsvingelensilage på de reella strållängderna 24 mm och 130 mm. Dock påvisade Prade *et al.* (2015) att det i ett tvåskördesystem skiljde sig i metanavkastning mellan strållängderna 8-12 mm och 4 mm, där de längre strållängderna gav 12% högre metanpotential än den kortare. Även i treskördesystem gav de båda längre strållängderna högre metanpotential, men skillnaderna mellan ensilage av samma strållängd från två- respektive treskördesystem blev inte signifikanta. Herrmann *et al.* (2012) utförde en liknande grundlig studie där bland annat ekonomin i finhackning av grödor för biogasproduktion undersöktes. I den studien fann man en brytpunkt mellan BMP och kostnader för hackning som identifierades vid strållängden 7-8 mm. Kortare strållängder var i den studien sällan ekonomiskt lönsamma då kraven på utrustning blev högre och vinsterna i metanavkastning mindre jämfört med kortare

strållängder. Prade *et al.* (2015) antog baserat på sin litteraturöversikt att lämplig partikelstorlek med avseende på metanavkastningen troligen ligger runt 10 mm.

Skördesystem, d.v.s. antal skördar har konstaterats vara generellt viktigare för metanavkastningen per ha hos gräs än sortskillnader i ett tempererat klimat (Dickeduisberg *et al.* 2017). Prade *et al.* (2015) fann att ett treskördesystem gav 10% högre energivinst än tvåskördesystem i Sydsverige, detta trots att biomassaavkastningen var 4% högre i det senare fallet. Den botaniska sammansättningens inverkan på resultatet är oklar, artkompositionen bestod i 41, 19, 40% av gräs, klöver respektive örter. Samma författare fastslog året innan att 2-skördesystem gav mer metan än enbart en skörd på marginalmark (Prade *et al.* 2014). Även i ett danskt försök gav treskördesystem signifikant högre metanavkastning än två, i både gräs- och blandvall (Larsen *et al.* 2012). I Finland uppnådde dock Seppälä *et al.* (2009) högre metanavkastning per hektar i gräsvall med tvåskördesystem.

2.2. Rötningsprocessen

Anaerob rötning för biogasproduktion är en komplex kedja av biokemiska processer, där alla delsteg kan och kommer ske mer eller mindre simultant (Schnürer & Jarvis 2017). Processen börjar med hydrolysis, med vilket menas att en mängd bakterier bryter ned bland annat stärkelse till glukos, fett till fettsyror och glycerol och proteiner till aminosyror. I nästa steg, fermentationen, bryts produkterna från hydrolysen ned till flyktiga fettsyror med koldioxid, vätgas och svavelväte som biprodukter. Under de anaeroba oxidationer som sedan följer bryts de flyktiga fettsyrorna fortsatt ned. Oxidationen av fettsyror begränsas av halten vätgas, som också bildas under oxidationerna i detta steg. Vätgasen behöver löpande konsumeras av metanbildande arkéer i processens sista steg. Förhållandet kan beskrivas med en kemisk jämvikt, där koncentrationen av produkterna måste hållas låg för att processen inte ska avstanna. Det sista steget i processen kallas metanogenes eller metanbildning och hänger samman med det föregående steget. Under metanogenesen omvandlar de metanogena arkéerna huvudsakligen koldioxid, vätgas och acetat till metan och mer koldioxid. (Christensson *et al.* 2009; Dussadee *et al.* 2016; Schnürer & Jarvis 2017). Beroende på substratets biokemiska sammansättning och stabiliteten hos processen tillkommer restprodukter såsom svaveldioxid och ammoniak i olika koncentrationer. Exempelvis ger substrat med högt proteininnehåll mycket kväve i rötresten (Schnürer & Jarvis 2017). Slutprodukten kan innehålla mellan 55-80% CH₄ (Christensson *et al.* 2009).

Studie	Vallsubstrat (ensilage)	Gödsel- substrat	SMY _{substrat} (L CH ₄ /kg VS)	Andel växt- material av VS (%)	OLR (kg VS/m ³ d)	HRT (d)	Utröttnings- grad (%)	Anläggningstyp (samtliga mesofila)
(Wall et al. 2014)	Engelskt rajgräs	Flytgödsel nöt	349	80	4	21	n.d.	Enstegs-CSTR
"-"	Engelskt rajgräs	-	360	100	4	19	n.d.	Enstegs-CSTR
(Jagadebhi et al. 2008)	Timotej och ängssvingel	Fastgödsel nöt	180	30	2	20	n.d.	CSTR
(Lehtomäki 2006)	Timotej	Fastgödsel nöt	268	30	2	20	n.d.	Enstegs-CSTR
"-"	Blandvall		390	100	20 ^a	55	59	Torr "leach bed" UASB
(Lindorfer et al. 2008)	Majs och <i>P. virgatum</i>	Flytgödsel svin	360	96,5	4,25	75	83	Tvåstegs semi-CSTR
(Himanshu et al. 2018)	Engelskt rajgräs	Flytgödsel nöt	318	50	-	10,3 ^b	n.d.	Torr flerstegsrötning
"-"	Rödklöver	Flytgödsel nöt	287	50	-	11,8 ^b	n.d.	Torr flerstegsrötning <i>in vitro</i>
(Jarvis et al. 1997)	Blandvall	-	250-300	100	5-7	20	n.d.	Enstegs CSTR
(Nordberg et al. 2007)	Lusern	-	250-350	100	3	20	n.d.	Torr enstegs, semi-CSTR

(Thamsi riroj et al. 2012)	Engelskt rajgräs	-	455	100	2	40	n.d.	Semi CSTR
(Nizami et al. 2012)	Engelskt rajgräs	-	451	100	2,5	50	90	Två-stegs CSTR
”-	Engelskt rajgräs	-	341	100	0,1 ^c	30	75	Torr ”leach bed” UASB

Tabell: Resultat och driftparametrar från studier gjorda på mono- och samrötning av vallsubstrat

^a Avser kg COD /m³ d

^b Utrötningstid i dagar

^c Avser UV (Upstream velocity) i m/h

Effektiviteten hos processen, d.v.s. hur fort mikroberna kan bryta ned t. ex. ensilage till biogas, och i vilken utsträckning som den totala mängden tillsatt torrsbstans omvandlas, varierar mycket mellan substrat och rötningsteknik (Nizami & Murphy 2010). Temperatur är en reglerande faktor, där högre temperatur i teorin ger snabbare nedbrytning (Christensson *et al.* 2009). Man skiljer på mesofil rötning, som sker runt 37° C och termofil rötning där målet är ca 55° C. Samtliga studier sammanfattade i tabellen på sid. 16 har varit mesofila och det är också den vanligaste drifttemperaturen för svenska gårdsanläggningar (Ahlberg-Eliasson 2015). Förhållandet mellan substratets kol- och kväveinnehåll, dess C/N-kvot, är viktigt då mikroberna hämmas av en stor koncentration av NH₃ men samtidigt behöver kväve för att förökas (Schnürer & Jarvis 2017). Kvoter runt eller strax över 20 är vanliga för vallsubstrat (Lehtomäki *et al.* 2008). Rötammarmiljöns pH är en annan viktig faktor, vilken för att passa flest mikroorganismer bör ligga mellan 7-8 (Thamsi-roj *et al.* 2012; Schnürer & Jarvis 2017). Bildandet av flyktiga fettsyror (VFA) under olika steg av rötningprocessen kan påverka processen negativt om de inte konsumeras i motsvarande takt som de produceras (Thamsi-roj *et al.* 2012; Schnürer & Jarvis 2017). Processen kan då i värsta fall bli sur och avstanna. Varande protolyter påverkar fria fettsyror pH och därmed stabiliteten hos rötningen.

För att öka metanutbytet hos ett substrat kan man förbehandla det innan rötning (Prochnow *et al.* 2009; Rodriguez *et al.* 2017; Schnürer & Jarvis 2017). Förbehandlingstekniker går ofta ut på att tillgängliggöra näringsämnen i ett substrat för mikroorganismerna i röt-kammaren, vanligen på mekanisk, kemisk, eller biologisk väg (Prochnow *et al.* 2009). Kostnaden för en förbehandlingsteknik måste dock kopplas till dess nytta i ökad metanavkastning, och enligt en nyligt sammanfattning framgår att de billigare teknikerna ofta är de som ger minst skillnad i metanavkastning (Prochnow *et al.* 2009; Rodriguez *et al.* 2017). Ensilering är en förbehandlingsteknik och används främst för att bevara vallgrödan till rötning eller djurkonsumtion. Ensilering som förbehandlingsteknik har i försök visat sig vara relevant för vall som ska rötas till biogas och har dessutom visats kunna leda till ökad metanpotential för rörsvingel (Feng *et al.* 2018). I Fengs *et al.* (2018) studie påvisades inga skillnader i metanavkastning mellan ensilering med olika tillsatsmedel (homo- respektive heterofermentativa mjölksyrebakterier). Vad gäller frågan att använda eller inte använda tillsatsmedel för att underlätta ensileringen uppnådde Lehtomäki (2006) signifikant större metanavkastning för vallsubstrat som ensilerats med myrsyra, hemi-/cellulaser eller mjölksyrebakterier än om inga tillsatsmedel använts. Skillnaderna mellan olika tillsatsmedlen var dock små. Rent generellt talar resultaten för att en lyckad ensilering med minimal syreinblandning och ett snabbt sjunkande pH – precis som i fodersammanhang – är en förutsättning för att minimera förluster i energiinnehåll och sålunda även metanpotential (Prochnow *et al.* 2009; Teixeira Franco *et al.* 2016; Feng *et al.* 2018).

I jämförelse med flytgödsel så har växtbiomassa en sämre buffringsförmåga, detta beroende på att andelen lättnedbrutet kol är större i det senare fallet. Med en högre andel av substratet som växtbiomassa ökar risken för ackumulation av VFA med sjunkande pH och minskad metanproduktion som följd (Lehtomäki *et al.* 2007). Risken för ackumulation av VFA och sjunkande pH har i försök kunnat minskas med återcirkulering av rötrest. Återcirkulation återför buffrande ämnen såväl som mikronäringsämnen vilket stabiliserar processen och förlänger livslängden av en kontinuerlig rötning av vallsubstrat (Nordberg *et al.* 2007; Thamsiroj *et al.* 2012; Wall *et al.* 2014).

Vallrötningens instabilitet undersöktes närmare av Thamsiroj *et al.* (2012) och sades hänga samman med ackumulering av fria fettsyror (VFA) under rötningprocessen. Ackumuleringen är en följd av obalans mellan konsumtion hos metanogena mikroorganismer och den produktion som sker i de tidigare processerna i röt-kammaren. Munk *et al.* (2010) jämförde rötning av ensilage från majs respektive gräs och påvisade samma förhållande mellan VFA-ackumulering och processens stabilitet. Där kopplades instabiliteten till mikroorganismernas nedgång i effektivitet vid brist på spårämnen, såsom Co och Na. I studien visade

sig gräsensilage naturligt innehålla signifikant mer av spårämnen än majsensilaget. I en teoretisk modell visade Thamsiriroj *et al.* (2012) att mikroorganismerna i röttkammaren förvisso är specialiserade på nedbrytning av olika ämnen, såsom acetat och laktat, men att de konkurrerar om samma mikronäringsämnen. Om en grupp mikroorganismer förökas på bekostnad av en annan ackumuleras den svagare organismens substrat, som i fallet acetat blir till mjölksyra. Sålunda sjunker pH och till slut kollapsar rötningsprocessen (Thamsiriroj *et al.* 2012). I senare forskning har, förutom Co, även Ni och Fe konstaterats vara nyttiga för rötning av ensilage – specifikt för att oxidera acetat och propionat (FitzGerald *et al.* 2019).

Livslängden för en kontinuerlig rötning av vallsubstrat hänger också samman med den organiska belastningen (OLR) (Munk *et al.* 2010; Thamsiriroj *et al.* 2012), där en lägre OLR ger längre livslängd. I den sistnämnda studien antydde resultaten att en OLR på 3 kg VS m⁻³ d⁻¹ var möjlig efter tillsats av spårämnen men att tillsättningen av Co gynnade de metanogena arkéerna mer än de acetatbildande bakterierna. En högre belastning antogs skapa större obalans mellan nedbrytning och metanogenes och därigenom påskynda processkrasch. Vidare antydde resultaten i den studien att högre belastning inte bara medförde en risk för de biologiska processerna utan även mekaniska problem då TS-halten på substratet överskred 10-11%. Samrötning med gödselprodukter har konstaterats stabilisera processen vid rötning av växtmaterial genom sin ovannämnda buffertkapacitet (Lehtomäki *et al.*; Mussoline *et al.* 2012; Himanshu *et al.* 2018).

En hög OLR är eftersträvansvärd för att maximera produktionen av gas. Vilken OLR som är möjlig att uppnå vid rötning av vallsubstrat varierar mellan studier. Högst OLR har uppnåtts i de studier där man återcirkulerat rötrest och/eller tillsatt en mikronärings-cocktail (Nordberg *et al.* 2007). I dessa studier har man kunnat nå en OLR mellan 2-4 kg VS/m³ d, beroende på typ av teknik för återcirkulering. (Nordberg *et al.* 2007; Thamsiriroj *et al.* 2012; Wall *et al.* 2014; FitzGerald *et al.* 2019). Vid återcirkulering fyller rötresten också en funktion som utspädningsvätska för nytt substrat men förfarandet medför en risk för ackumulering av andra substanser från rötresten, vilket kan sänka effektiviteten hos rötningen på lång sikt (Nordberg *et al.* 2007).

Gräs har i allmänhet högre metanpotential än flytgödsel vilket kan kopplas till den högre andelen kolhydrater och dess låga nedbrytningsgrad. Gödsel från nöt har ofta varit just ensilage men redan genomgått en nedbrytningsprocess och blivit av med mycket av den organiska fraktionen. För samrötning av flytgödsel och vall ökar den specifika metanavkastningen närmast linjärt med andelen vall av substratet enligt (Wall *et al.* 2013, 2014). Dock är det vanskligt att jämföra med flytgödsel som substrat då flytgödsel enligt (Himanshu *et al.* 2018) kan variera betydligt i metanavkastning. Variationen kan bero på parametrar som djurslag, utfodring och

förvaring. Resultat från samrötning av vallsubstrat och gödsel är sammanställda i tabellen på sid. 16.

Rötning av ensilage på engelskt rajgräs resp. rödklöver har i 50/50-blandning med nötflytgödsel gett högre SMY än beräknat utefter enskild rötning av substraten. Synergieffekten var dessutom starkare vid senare jämfört med tidigare skördetidpunkt, och gav som mest 7,5% högre utbyte, över det man skattat (Himanshu *et al.* 2018). Detta är inte unikt för gräs utan har även konstaterats i samrötning av flytgödsel med diverse livsmedel (Labatut *et al.* 2011). Flertalet källor antyder att snabba förändringar i driftregim, t. ex. ökning av OLR kan destabilisera rötningsprocessen, med minskad gasproduktionen som följd av en ökning av VFA i röt-kammaren (Jarvis *et al.* 1997; Lindorfer *et al.* 2008; Schnürer & Jarvis 2017). Den hydrauliska uppehållstiden (HRT) vid rötning av gödsel ligger ofta runt 20 dagar, beroende på rötningsteknik (Lehtomäki 2006). I de undersökta studierna har HRT varierat mellan 19-50 dagar för rötning av enbart växtmaterial. De källor som redovisar högts SMY är också de källor i vilka man haft längst HRT (Thamsiroj *et al.* 2012; Nizami *et al.* 2012).

2.3. Röttningsanläggningen

Det finns många sätt att på mikrobiell väg röta biomassa till metan under anaeroba förhållanden. En röttningsanläggning kan designas med en eller flera röt-kamrar. De senare röt-kamrarna kallas då efterröt-kammare och uppdelningen görs för att förlänga substratets retentionstid. Vid rötning i två kammare kan man dessutom dela upp stegen i röttningsprocessen så att de sker i varsin kammare, det kallas då en tvåfasrötning. Alternativt kan man låta hela processen ske i både huvud- och efterröt-kammare under så kallad tvåstegsrötning. En anläggning med två röt-kamrar är dyrare att bygga än en enstegsanläggning. Däremot har en tvåstegsanläggning potential för en effektivare röttningsprocess med mer specifik metanavkastning per enhet tillsatt substrat, detta då substratets totala uppehållstid (HRT) ökar (Nizami & Murphy 2010).

En annan viktig parameter vid design av anläggningen är huruvida vått eller torrt substrat ska rötas. Substrat på upp till 10-12% TS kan våtrötas och för torrötning brukar TS-halten ligga mellan 20-40% (Nizami & Murphy 2010). Torrötning tillåter vanligtvis en högre organisk belastning och ställer mindre krav på förbehandling av substratet, enligt samma källa. Omrörning är viktigt för både våta och torra system för processens stabilitet och kan utföras med olika teknik och intervall (Vandevivere *et al.* 2003; Christensson *et al.* 2009; Schnürer & Jarvis 2017).

I huvudsak substratens natur avgör valet mellan kontinuerlig rötningsprocess eller satsvis rötning. I det förra fallet tillsätts nytt substrat löpande och samma kultur av mikroorganismer hålls vid liv, medan man i det senare fallet rötter ut en bestämd mängd substrat fullständigt innan man ympar in nya mikroorganismer och börjar om. Satsvis rötning passar bättre för substrat med hög TS-halt och kräver inte omrörning i samma utsträckning som en kontinuerlig, men kräver en större röttkammarvolym för effektivitetens skull (Nizami & Murphy 2010). Flytgödsel, varande ett substrat med låg TS-halt, rötas vanligen kontinuerligt och vått (Lehtomäki 2006), och de flesta av de undersökta exemplen på rötning av vall, enbart eller samrötat med gödsel, har gällt just sådana anläggningar. En annan sorts rötningsteknik är att koppla samman flera uppsamlingsbrunnar (s.k. leach beds) för substrat som kan matas sekventiellt. Från dessa leds rötvätska till en uppsamlingsbrunn varifrån det sedan pumpas till en s.k. Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), där mikroberna är aggregerade och uppslammade, eller odlade på ett bärmaterial där den huvudsakliga rötningen sker (Nizami & Murphy 2010). I och med att hela processen, från hydrolys till metanogenes kan ske fysiskt närliggande blir processen effektiv och uppehållstiden låg. Denna sorts anläggning är dock komplicerad och dyr att bygga (Vandevivere *et al.* 2003; Nizami & Murphy 2010; Schnürer & Jarvis 2017). I ett test på ensilage av engelskt rajgräs har torrrotning i ”leach bed”-system med UASB hade emellertid den producerade gasen 20 procentenheter högre metaninnehåll än en våt CSTR-anläggning. En annan skillnad var att nedbrytningsgraden av fria fettsyror var högre i CSTR-anläggningen (Nizami *et al.* 2012).

2.4. Vall ur ett större perspektiv

Vall har på europeisk nivå konstaterats vara ett tillräckligt substrat för biogasproduktion i framtiden (Meyer *et al.* 2018). Meyer *et al.* (2018) räknade med att allt odlat gräs fick lagringsförluster på 25% av TS och hade en metanavkastning på strax under 0,3 Nm³/kg VS för gräs odlat på åkermark, respektive 0,15 för gräs från ängar och naturbeten. Den mark som förväntades avsättas för vallodling till biogas skulle enligt beräkningar avkasta mellan 10–14 ton TS/ha. Totalt sett beräknades överskottet på gräs som skulle kunna användas till biogasproduktion i EU 2030 vara mellan 20-111 Mt beroende på scenario. Att få en avkastning från skyddad mark, naturreservat och ruderatmarker är av intresse då de kan bidra till ökad produktion av grön energi (*Biogasmarknadsutredningen* 2019). Flera studier har gjorts på huruvida man kan använda naturligt förekommande vegetation från sådana områden som biogassubstrat (Prade *et al.* 2014; Meserszmit *et al.* 2019). Exempelvis undersökte den senare källan effekterna av olika skördetidpunkters

påverkan på metanavkastningen hos naturligt förekommande gräs av blååtetsläktet (*Molinia*) i Polen. Metanavkastningen för gräset var relativt låg i jämförelse med andra gräs, runt 200 l CH₄/kg VS, för jämförelse med andra gräs se tabell på sid 16.

Även kasserat ensilage har testats som substrat för biogasproduktion då mögel inte innebär något större problem för rötningen (Gunnarson *et al.* 2014). Svårigheter konstaterades föreligga i förbehandlingen då det undersökta fodret ensilerats i balar och därmed var långstråigt. Partikelstorleken behövde vara 10 mm för att biogasanläggningen skulle ta emot ensilaget. Kraven som ställs på hackningsutrustningen för att uppnå jämn partikelstorlek runt 10 mm blev därmed för stora. Med anledning av förbehandlingskostnaderna kunde lantbrukarna i studien inte få betalt för ensilaget.

Det vanligaste substratet för gårdsanläggningar är idag gödsel och på nationell nivå stod energigrödor bara för 2-3% av det rötade substratet 2017-18 (*Energimyndigheten* 2019). Många andra grödor än vall, såsom majs, helsädesensilage och blast från sockerbeter, har prövats för biogasproduktion. I vissa fall har de befunnits vara mer lönsamma (Murphy *et al.* 2011; Prade *et al.* 2015). Prade *et al.* (2015) resonerar att lönsamheten idag och i framtiden i mycket kan komma att bero på vilka stöd som finns tillgängliga. I det avseendet skulle vall ha en fördel gentemot ex. helsädesensilage p.g.a. att vall inte kan användas för humankonsumtion.

I en omfattande studie om biogasproduktionens påverkan på markkol i Saxen konstaterades att spridning av rötrest, som medger att ett kretslopp av kol, var en nyckelfaktor för kolinbindning i marken. Man fann även att arealen vallodling i de undersökta produktionsområdena var en faktor med positiv påverkan på inlagringen av kol i mark (Witing *et al.* 2018). Vallodling i sig har i många fall en positiv inverkan på markens inlagring av kol och kan minska insatskostnaderna för andra grödor. Varande en perenn gröda hinner vallen anlägga ett omfattande rotsystem, kan ta upp näring även under vintern samt minska ogrästryck från anueller (Andersson & Milberg 1996). För svenska vidkommanden kopplade Poeplau *et al.* (2015) en ökning av kolinnehållet hos svenska jordar till nationellt ökad vallodling, och i annan studie har övergång till vallodling höjt kolinnehållet med 0,4 ton/ha år vid övergång från spannmålsodling, då över tre årtionden (Kätterer *et al.* 2007).

Nyttoeffekter som kolinlagring skiljer sig dock åt, bland annat beroende på vallens liggtid och den initiala mängden markkol, där längre liggtid och lägre initialmängd markkol ger större kolinbindning (Bolinder *et al.* 2010, 2012). Även införandet av en ettårig vall har påvisats öka kolinlagringen, och i kombination med ett ersättande av fossila bränslen till förmån för biogas gav införandet av en ettårig vall en

nettominskning av växthusgasutsläppen på 3 ton CO₂-eq/ha år (Prade *et al.* 2017). Dessa kunskaper användes i en rapport där försäljning till biogassubstrat som tänkbar avsättning för vall testades i spannmålsdominerade växtföljder. Införandet av vall i växtföljden befanns lönsam, främst genom att öka skördarna, minska insatskostnaderna (ogräsbekämpning och gödsling) för nästkommande grödor samt genom att ersätta grödor med dålig lönsamhet. I studien antogs priset 1,25kr/kg TS för vullen med 7 km transportväg till rötningsanläggningen, det senare enligt uppgift från Swedish Biogas International. Det pris för ensilaget som utgjorde gränsen för lönsamhet ("break-even") låg mellan 70-90 öre /kg TS beroende på plats i landet (Tidåker *et al.* 2016).

3. Diskussion

3.1. Vallen

Enligt källmaterialet är den vallgröda bäst som biogassubstrat som avkastar mest och har högst smältbarhet (Prochnow *et al.* 2009; Seppälä *et al.* 2009; McEniry & O’Kiely 2013). En aspekt som sällan tas upp i den undersökta litteraturen är valet av arter kopplat till odlingsförutsättningarna under vilken vallgrödan är producerad, eller andra behov av grödan än biogasproduktion. Vallen kan vara producerad på ett av följande sätt:

1. Enbart avsedd för biogas, odlad på åker- eller ruderatmark
2. Avsedd för foder i första hand, odlad på åker- eller ruderatmark
3. Avsedd för grüngödsling eller som mellangröda, odlad på åkermark

Valet av arter påverkas i fallen 1-2 av liggtiden, vanligen 3-5 år i Sverige, medan liggtiden i fallet 3 lär vara kort för att inte ta upp plats i växtföljden. Engelskt rajgräs och timotej är de gräs med högst sockerinnehåll som används i Sverige och särskilt timotej har en naturlig plats i svenska vallblandningar i och med sin goda vinterhärdighet (Fogelfors 2015). Båda dessa gräs har också visat mycket goda metanpotentialer varför de framstår som ytterst lämpliga för en biogasvall (McEniry & O’Kiely 2013). Rörsvingel präglas av något lägre smältbarhet än de båda ovannämnda gräsen, men har å andra sidan gett höga metanavkastningar per ha. Arten är dessutom både långlivad och härdig och skulle troligen passa väl i en långliggande vall för biogasproduktion (Nadeau & Nyemad 2016). Artblandningen i fall 2 har krav på sig med avseende på bl.a. högre proteininnehåll vilket kan uppnås antingen genom gräsvall med intensiv gödsling eller genom en större baljväxtandel (Fogelfors 2015). Om ett högt metanutbyte är prioriterat vid rötning av vallsubstrat så talar det emot baljväxter. Ett högt proteininnehåll, med ett vallfoders intervall mätt, borde vara av mindre betydelse för vallen som biogassubstrat i det fallet än om foder var huvudsyftet, så som antyds av Prochnow *et al.* (2009).

Grüngödslingvallar är vanliga inom ekologisk produktion och har som syfte att binda kväve, varför också den lär innehålla mer baljväxter. I fallen 2 och 3 kommer således baljväxter med största sannolikhet att förekomma. Rödklöver har påvisats

ha lägre BMP och SMY än gräs i allmänhet, troligen beroende på sitt lägre socker- och högre ligninnehåll (Larsen *et al.* 2012; Himanshu *et al.* 2018). SMY och BMP hos rörflen har varierat mellan källor, möjligen p.g.a. klimat- och sortskillnader mellan försöken. Då rörflen tar tid på sig att komma upp i full avkastning och är mycket ovanlig i svenska vallar torde den vara av mindre relevans för biogasvallar med foder eller kväveupptag som ursprungsändamål.

Något som inte har undersökts i källmaterialet är vilken av en välgödslad gräs- eller en ogödslad blandvall för biogasproduktion som skulle löna sig bäst på lång sikt. Baljväxter kan, genom Rhizobium-bakterier, fixera kväve och vallar med hög baljväxtandel kan uppnå god avkastning även utan kvävegödsling. Ogödslad vall användes av Prade *et al.* (2015) som biogassubstrat, i den studien beräknades istället gödslingskostnaderna i bortförsl av kväve.

Av den nya statliga rapport som rör svensk biogasproduktion framgår att alla dessa sorters vallar tillräknas för framtida verksamhet (*Biogasmarknadsutredningen* 2019), varför olika vallblandningar lär komma att behövas. Källmaterialet i det här arbetet ger i hand att hög TS-avkastning och god smältbarhet är det viktigaste för en biogasvall, vilket kan uppnås genom ett intensivt odlingssystem med tidiga skördar och sockerrika arter, som är anpassade till odlingssystemet. Framför allt betonas vikten av kvantitet av att den största andelen av det tilltänkta ILUC-fria substratet ska komma från intensifiering av den befintliga vallodlingen. (Prade *et al.* 2015) resonerar att vallens gångbarhet som substrat kan bero på hur stödförhållandena kommer att se ut i framtiden. Resonemanget har delvis besannats i det avseendet att vall, till skillnad från helsäd, som författarna jämförde med, är ”ILUC-fri” och därmed kommer kunna beviljas statsstöd även efter 2020 (*Biogasmarknadsutredningen* 2019). Dock står det medlemsländerna fritt att välja om och i vilken utsträckning de ska bevilja statsstöd för användandet av ILUC-fria substrat.

3.2. Rötningen

I Sverige var 2015 gårdsanläggningarna i huvudsak fokuserade på gödsel som substrat, vilket framgår av statistik och antyds av att man i de nordiska studier som handlat om samrötning (t. ex. Lehtomäki (2006)) utgår från gödsel snarare än växtmaterial. Gödselbaserad (vanligen flytgödsel av nöt) rötning har inneburit att gårdsanläggningarna i huvudsak är kontinuerligt matade och omrörda våtröttningsanläggningar, med låg OLR (2-3 kg VS/m³ d) och HRT runt 30 dagar och uppåt (Ahlberg-Eliasson 2015). I de studier där man uppnått högst SMY med enbart vallsubstrat har man legat i samma tämligen jämnt med avseende på OLR, men då haft längre HRT. Metan är en potent växthusgas och att uppnå en hög

utröttningsgrad är önskvärt av både ekonomiska och miljömässiga skäl. Risk finns annars för metanavgång från rötresten. I de få fall utröttningsgrad har redovisats har den varit i spannet 59-90% för mono-rötning av vallsubstrat. Ett indirekt sätt att få ett riktvärde på omvandlingens effektivitet är att jämföra processens SMY med substratets BMP (Ahlberg Eliasson 2018)

I de flesta källor har röttningsanläggningarna varit CSTR:er. Enligt Nizami & Murphy (2010), som sammanfattat resultat från andra studier än det här arbetet, har "leach bed" och UASB-anläggningar producerat mer gas på kortare tid med högre OLR jämfört med CSTR:er. I den här studien har bilden varit en annan, troligen beroende på annat urval av litteratur. Med utgång från deras resonemang skulle man kunna anta att CSTR:er, i den mån fortsatt forskning kan utröna hur en gräsmatad CSTR bör skötas mer exakt, skulle vara mer relevanta för gårdsproduktion till följd av sin enkelhet i jämförelse med UASB:er. Ett annat argument för det antagandet är att om rötningen av vall i gårdsanläggningar skulle öka så lär det sannolikt inte ske enbart i stora, nybyggda och för vallsubstrat helanpassade anläggningar. Snarare skulle samrötning i befintliga anläggningar, vilka ofta är CSTR:er, bli vanligare. Därför borde inte kontinuerlig rötning av vallsubstrat som ämne för försök och forskning förkastas även om stabilitetsproblematiken skulle tala för att satsvis rötning är ett säkrare val.

Att ensilera en vallgröda före rötning lär närmast vara ett krav då tillgången på vallen som foderresurs – om det är ett delmål – samt som substrat för en kontinuerlig rötning behöver räcka året om. Om ensileringen lyckas eller ej påverkar vilken metanpotential substratet kommer att få, och då olika gräs- och klöverblandningar har olika innehåll av vattenlösliga kolhydrater samt buffringsförmåga så kan tillsatsmedel underlätta för lantbrukaren att uppnå en tillfredställande kvalitet. Vad gäller partikelstorlek så pekar källmaterialet på att lämplig storlek ligger runt 10 mm, både i röttningsmässig och ekonomisk synvinkel (Herrmann *et al.* 2012; Prade *et al.* 2015).

Att uppnå 10 mm strållängd vid skörd har inte beskrivits som problematiskt av Prade *et al.* (2015), och det torde det heller inte vara med en exakthack. Svårigheter kan dock uppstå om vallen ensileras långstråigt, vilket ofta är fallet när rundbalar används som ensileringsmetod. Detta problem uppstod också enligt Gunnarson *et al.* (2014) när kasserade ensilagebalar skulle hackas i efterhand. Bäst resultat uppnådde man, inte med exakthack, utan med en kross – och inte ens med den blev tillräckligt stor andel av substratet i rätt partikelstorlek. Troligen kan problemet med att hacka långstråigt ensilage förväntas lösas sig i framtiden, författarna nämner själva modernare teknik och möjligheter för större partikelstorlekar att mottas av biogasanläggningar.

Vad gäller andra förbehandlingstekniker än hackning och konservering förmedlar Rodriguez *et al.* (2017), efter att ha överblickat många försök i det ämnet, bilden av att ju billigare en teknik är desto mindre skillnad gör den på substratets SMY. Av detta kan slutsatsen dras att det för en gårdsanläggning är möjligt att höja sin metanavkastning med andra förbehandlingstekniker än hackning och konservering men att de förbehandlingar som ändå måste göras för att vallen ska kunna nyttjas som foder bör prioriteras, då de i sig kan ha stort utslag på vallgrödans SMY (Herrmann *et al.* 2012; Teixeira Franco *et al.* 2016).

Det har konstaterats att tillsats av eller återcirkulation av vissa mikronäringsämnen (eller spårämnen) stabiliserar en kontinuerlig rötningsprocess med vall som enda substrat (Nordberg *et al.* 2007; Munk *et al.* 2010; Thamsiroj *et al.* 2012). Bland annat har Co, Ni och Fe bedömts vara kritiska för processtabiliteten. Även i flerstegsrötning, har en cocktail innehållande dessa och andra ämnen används för stabilitetens skull med gott resultat (McEniry & O’Kiely 2013; Himanshu *et al.* 2018). Vad gäller återcirkulation och proportioner nämner (Thamsiroj *et al.* 2012) siffran 8,2 kg rötrest för 2,2 kg färskvikt (FV) ensilage. Wall *et al.* (2014) nämner inga siffror men i båda studierna har rötresten använts som spädningvätska för att nå en torrsubstans på ca 10%. Att se dessa tekniker under längre tid än ett år, och utan ständigt ökande HLR, som i fallet Wall *et al.* (2014) vore intressant för att pröva det mot problemen med ackumulation av restprodukter som mötte Nordberg *et al.* (2007).

3.3. Slutsatser

Vallsubstrat är sammanfattningsvis ett komplicerat substrat men med nyttoeffekter i många avseenden. Av arbetet dras följande slutsatser om rötning av vallsubstrat:

- Kontinuerlig rötning med >30% växtsubstrat som andel av VS är möjlig i över ett år men kräver återcirkulation av mikronäringsämnen och troligen en noga övervakning av processen.
- Smältbarhet är en viktig parameter för en vallgröda som ska rötas och hög smältbarhet är sannolikt ett krav om HRT ska hållas så låg som möjligt.
- Att eftersträva högre smältbarhet med tidig skörd av en vall med ”sämre” arter kan enligt samma teori vara ett gott alternativ till att så om vallen med andra arter.
- Hacking till nedåt 10mm och en lyckad ensilering är bra förbehandlingsmetoder för en vallgröda som ska rötas. Bland annat för att

dessa metoder är vanliga, tekniken är relativt enkel och fodervärdet av vallen bibehålls.

Referenser

- Ahlberg Eliasson, K. (2018). *Swedish farm-scale biogas production-substrates and operating parameters*. (Doktorsavhandling). <https://pub.epsilon.slu.se/15821/> [2020-10-12]
- Ahlberg-Eliasson, K. (2015). *Slutrapport - Utvärdering av biogasanläggningar på gårdsnivå*. Stockholm: Hushållningssällskapens förbund. http://hushallningssallskapet.se/wp-content/uploads/2015/05/slutrapport_utvardering-av-biogasanlaggningar.pdf
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K. & Gruber, L. (2007). Biogas production from maize and dairy cattle manure—Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118 (1), 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.007>
- Andersson, T. & Milberg, P. (1996). Weed performance in crop rotations with and without leys and at different nitrogen levels. *Annals of Applied Biology*, 128, 505–518. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1996.tb07110.x>
- Biogasmarknadsutredningen* (2019). (Mer biogas!: För ett hållbart Sverige). SOU 2019:63 Stockholm. https://www.regeringen.se/4afa86/contentassets/19fc575360724f2492bea2cb9e25b7e8/sou_2019_63_webb.pdf
- Bolinder, M., Kätterer, T., Andrén, O. & Parent, L. (2012). Estimating carbon inputs to soil in forage-based crop rotations and modeling the effects on soil carbon dynamics in a Swedish long-term field experiment. *Canadian Journal of Soil Science*, 92, 821–833. <https://doi.org/10.4141/CJSS2012-036>
- Bolinder, M.A., Kätterer, T., Andrén, O., Ericson, L., Parent, L.-E. & Kirchmann, H. (2010). Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics in forage-based crop rotations in Northern Sweden (63–64°N). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 138 (3), 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.06.009>
- Butkutė, B., Lemežienė, N., Kanapeckas, J., Navickas, K., Dabkevičius, Z. & Venslauskas, K. (2014). Cocksfoot, tall fescue and reed canary grass: Dry matter yield, chemical composition and biomass convertibility to methane. *Biomass and Bioenergy*, 66, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.014>
- Christensson, K., Björnsson, L., Dahlgren, S., Eriksson, P., Lantz, M., Lindström, J., Mickelåker, M. & Andersson, H. (2009). *Gårdsbiogashandbok*. (SGC Rapport, 206). Stockholm: Svenskt Gastekniskt Center. <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC206.pdf>
- Dickeduisberg, M., Laser, H., Tonn, B. & Isselstein, J. (2017). Tall wheatgrass (*Agropyron elongatum*) for biogas production: Crop management more important for biomass and methane yield than grass provenance. *Industrial Crops and Products*, 97, 653–663. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.055>

- Dussadee, N., Unpaprom, Y. & Ramaraj, R. (2016). Grass Silage for Biogas Production. *Advances in Silage Production and Utilization*, <https://doi.org/10.5772/64961>
- Energimyndigheten (2019). (Produktion och användning av biogas och rötresten år 2018). Stockholm: (ER 19:23).
- Feng, L., Kristensen, E.F., Moset, V., Ward, A.J. & Møller, H.B. (2018). Ensiling of tall fescue for biogas production: Effect of storage time, additives and mechanical pretreatment. *Energy for Sustainable Development*, 47, 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.10.001>
- FitzGerald, J.A., Wall, D.M., Jackson, S.A., Murphy, J.D. & Dobson, A.D.W. (2019). Trace element supplementation is associated with increases in fermenting bacteria in biogas mono-digestion of grass silage. *Renewable Energy*, 138, 980–986. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.051>
- Fogelfors, H. (2015). *Vår mat : odling av åker- och trädgårdsgrödor : biologi, förutsättningar och historia* . 1. uppl. Lund: Studentlitteratur.
- Gunnarson, C., Gustavsson, A., Norberg, I. & Olsson, J. (2014). *Kasserat och överblivet ensilage, en outnyttjad resurs med fokus på biogas*. (Lantbruk och Industri, Rapport 422). Uppsala: Jordbrukstekniska institutet.
- Halling, M.A. & Larsson, S. (2017). *Vallväxter till slätter och bete samt grönfoderväxter*. 2017/2018. uppl. Uppsala: SLU, Inst. för växtproduktionsekologi.
- Herrmann, C., Prochnow, A., Heiermann, M. & Idler, C. (2012). Particle Size Reduction During Harvesting of Crop Feedstock for Biogas Production II: Effects on Energy Balance, Greenhouse Gas Emissions and Profitability. *BioEnergy Research*, 5 (4), 937–948. <https://doi.org/10.1007/s12155-012-9207-1>
- Himanshu, H., Murphy, J.D., Grant, J. & O’Kiely, P. (2018). Synergies from co-digesting grass or clover silages with cattle slurry in in vitro batch anaerobic digestion. *Renewable Energy*, 127, 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.086>
- Jagadabhi, P.S., Lehtomäki, A. & Rintala, J. (2008). Co-digestion of grass silage and cow manure in a cstr by re-circulation of alkali treated solids of the digestate. *Environmental Technology*, 29 (10), 1085–1093. <https://doi.org/10.1080/09593330802180385>
- Jarvis, Å., Nordberg, Å., Jarlsvik, T., Mathisen, B. & Svensson, B.H. (1997). Improvement of a grass-clover silage-fed biogas process by the addition of cobalt. *Biomass and Bioenergy*, 12 (6), 453–460. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)00015-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)00015-9)
- Krizsan, S. & Nyholm, L. (2012). Hur kan man mäta grovfodrets smältbarhet? *NYTT från Institutionen för norrländsk jordbruksvetenskap*, 2012 (1), 4
- Kätterer, T., Andersson, L., Andrén, O. & Persson, J. (2007). Long-term impact of chronosequential land use change on soil carbon stocks on a Swedish farm. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81 (2), 145. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9156-9>
- Labatut, R.A., Angenent, L.T. & Scott, N.R. (2011). Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Bioresource Technology*, 102 (3), 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.035>
- Larsen, S.U., Stefanek, K., Madsen, K.H. & Møller, H.B. (2012). Effects of Festulolium Cultivar, Red Clover, and Harvest Strategy on Yield and Methane Potential in Perennial Grass for Biogas Production. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*, 20th EU BC&E-Milan 2012, 230–233. <https://doi.org/10.5071/20thEUBCE2012-1CO.9.5>
- Lehtomäki, A. (2006). Biogas production from energy crops and crop residues. *Jyväskylä studies in biological and environmental science*, (163).

- <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/13152/9513925595.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [2020-05-11]
- Lehtomäki, A., Huttunen, S. & Rintala, J. Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production. Effect of crop to manure ratio. https://slu.primo.exlibrisgroup.com/discovery/fulldisplay?docid=elsevier_sdoi_10_1016_j_resconrec_2006_11_004&context=PC&vid=46SLUB_IN_ST:SLUB_V1&lang=sv&search_scope=MyInst_and_CI&adaptor=Primo%20Central&tab=Everything&query=any,contains,A%20Lehtom%C3%A4ki%202007&mode=Basic
- Lehtomäki, A., Viinikainen, T.A. & Rintala, J.A. (2008). Screening boreal energy crops and crop residues for methane biofuel production. *Biomass and Bioenergy*, 32 (6), 541–550. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.11.013>
- Liljenberg, R., Sundberg, M. & Thylén, A. (1995). *Datorbaserade beslutsstöd för ensilering av vallgrödor*. (JTI, 212). Uppsala: Jordbrukstekniska institutet. <http://ri.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A959653&dswid=-5321>
- Lindorfer, H., Corcoba, A., Vasilieva, V., Braun, R. & Kirchmayr, R. (2008). Doubling the organic loading rate in the co-digestion of energy crops and manure – A full scale case study. *Bioresource Technology*, 99 (5), 1148–1156. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.02.033>
- McEniry, J. & O’Kiely, P. (2013). Anaerobic methane production from five common grassland species at sequential stages of maturity. *Bioresource Technology*, 127, 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.084>
- Meserszmit, M., Chrabaszcz, M., Chylińska, M., Szymańska-Chargot, M., Trojanowska-Olichwer, A. & Kaçki, Z. (2019). The effect of harvest date and the chemical characteristics of biomass from Molinia meadows on methane yield. *Biomass and Bioenergy*, 130, 105391. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105391>
- Meyer, A.K.P., Ehimen, E.A. & Holm-Nielsen, J.B. (2018). Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. *Biomass and Bioenergy*, 111, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.05.013>
- Munk, B., Bauer, C., Gronauer, A. & Leubhn, M. (2010). Population dynamics of methanogens during acidification of biogas fermenters fed with maize silage. *Engineering in Life Sciences*, 10 (6), 496–508. <https://doi.org/10.1002/elsc.201000056>
- Murphy, J., Braun, R., Weiland, P. & Wellinger, A. (2011). *Biogas from Crop Digestion*. (IEA Bioenergy, 37). IEA. ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2011/10/Update_Energy_crop_2011.pdf
- Mussoline, W., Esposito, G., Lens, P., Garuti, G. & Giordano, A. (2012). Design considerations for a farm-scale biogas plant based on pilot-scale anaerobic digesters loaded with rice straw and piggery wastewater. *Biomass and Bioenergy*, 46, 469–478. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.07.013>
- Nadeau, E. & Nyemad, C. (2016). Rörsvingel - vad vet vi om den? *Proceedings of Djurhälso- och Utfodringskonferens 2016*, vår 2016. 72–74. https://www.vxa.se/globalassets/dokument/fordjupningar/dou/2016/nadeau-o-nyemad_rorsvingel-vad-vet-vi-om-den.pdf
- Nizami, A.-S. & Murphy, J.D. (2010). What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (6), 1558–1568. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.02.006>

- Nizami, A.S., Orozco, A., Groom, E., Dieterich, B. & Murphy, J.D. (2012). How much gas can we get from grass? *Applied Energy*, 92, 783–790. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.033>
- Nordberg, Å., Jarvis, Å., Stenberg, B., Mathisen, B. & Svensson, B.H. (2007). Anaerobic digestion of alfalfa silage with recirculation of process liquid. *Bioresource Technology*, 98 (1), 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.027>
- Poeplau, C., Bolinder, M.A., Eriksson, J., Lundblad, M. & Kätterer, T. (2015). Positive trends in organic carbon storage in Swedish agricultural soils due to unexpected socio-economic drivers. *Biogeosciences*, 12 (11), 3241–3251. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3241-2015>
- Prade, T., Kätterer, T. & Björnsson, L. (2017). Including a one-year grass ley increases soil organic carbon and decreases greenhouse gas emissions from cereal-dominated rotations – A Swedish farm case study. *Biosystems Engineering*, 164, 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.016>
- Prade, T., Svensson, S.-E., Hörndahl, T., Kreuger, E., Mattsson, J.E. & Sveriges lantbruksuniversitet. Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap (2015). *Vall och helsäd som biogassubstrat utvärdering av skördetidpunktens och snittlängdens påverkan på energiutbytet och substratkostnaden*. Alnarp: Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet. (Landskapsarkitektur trädgård växtproduktionsvetenskap; 2015)
- Prade, T., Svensson, S.-E., Kreuger, E., Mattsson, J.E., Carlsson, G., Englund, J.-E. & Sveriges lantbruksuniversitet. Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap (2014). *Vall som biogassubstrat utvärdering av skördesystemets och odlingsintensitetens påverkan på biogasutbytet*. Alnarp: Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet.
- Prochnow, A., Heiermann, M., Plöchl, M., Linke, B., Idler, C., Amon, T. & Hobbs, P.J. (2009). Bioenergy from permanent grassland – A review: 1. Biogas. *Bioresource Technology*, 100 (21), 4931–4944. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.070>
- Rodriguez, C., Alaswad, A., Benyounis, K.Y. & Olabi, A.G. (2017). Pretreatment techniques used in biogas production from grass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 1193–1204. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.022>
- Schnürer, A. & Jarvis, Å. (2017). *Biogasprocessens mikrobiologi*. Uppsala: SLU Repro 2017. <https://www.avfallsverige.se/aktuellt/nyhetsarkiv/artikel/biogasprocessens-mikrobiologi-handbok-1/>
- Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A. & Rintala, J. (2009). Biogas production from boreal herbaceous grasses – Specific methane yield and methane yield per hectare. *Bioresource Technology*, 100 (12), 2952–2958. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.044>
- Statistiska centralbyrån (2019). (Jordbruksstatistisk sammanställning). Stockholm: SCB.
- Teixeira Franco, R., Buffière, P. & Bayard, R. (2016). Ensiling for biogas production: Critical parameters. A review. *Biomass and Bioenergy*, 94, 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.014>
- Thamsiriroj, T., Nizami, A.S. & Murphy, J.D. (2012). Why does mono-digestion of grass silage fail in long term operation? *Applied Energy*, 95, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.008>

- Tidåker, P., Rosenqvist, H., Gunnarsson, C. & Bergkvist, G. (2016). *Räkna med vall*. (Lantbruk och industri, 445). JTI. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1062177/FULLTEXT01.pdf> [2020-05-15]
- Vandevivere, P., De Baere, L. & Verstraete, W. (2003). Types of anaerobic digester for solid wastes. *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. IWA Publishing, 111–140. <http://hdl.handle.net/1854/LU-210258> [2020-05-06]
- Wahid, R., Ward, A.J., Møller, H.B., Søegaard, K. & Eriksen, J. (2015). Biogas potential from forbs and grass-clover mixture with the application of near infrared spectroscopy. *Bioresource Technology*, 198, 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.154>
- Wall, D.M., Allen, E., Straccialini, B., O’Kiely, P. & Murphy, J.D. (2014). Optimisation of digester performance with increasing organic loading rate for mono- and co-digestion of grass silage and dairy slurry. *Bioresource Technology*, 173, 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.126>
- Wall, D.M., O’Kiely, P. & Murphy, J.D. (2013). The potential for biomethane from grass and slurry to satisfy renewable energy targets. *Bioresource Technology*, 149, 425–431. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.094>
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85 (4), 849–860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
- Witing, F., Prays, N., O’Keeffe, S., Gründling, R., Gebel, M., Kurzer, H.-J., Daniel-Gromke, J. & Franko, U. (2018). Biogas production and changes in soil carbon input - A regional analysis. *Geoderma*, 320, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.030>