

Vall och helsäd som biogassubstrat

– Utvärdering av skördetidpunktens och snittlängdens påverkan på energiutbytet och substratkostnaden

Grass-clover ley and whole-crop cereals as biogas substrate
 – Evaluation of influence of harvest date and cutting length on energy yield and substrate costs

**Thomas Prade, Sven-Erik Svensson, Torsten Hörndahl,
 Emma Kreuger, Jan Erik Mattsson**

Institutionen för Biosystem och teknologi

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap

Rapport 2015:22

ISBN 978-91-576-8912-2

Alnarp 2015



LANDSKAPSARKITEKTUR
TRÄDGÅRD VÄXTPRODUKTIONSVETENSKAP
Rapportserie

Vall och helsäd som biogassubstrat

– Utvärdering av skördetidpunktens och snittlängdens påverkan på energiutbytet och substratkostnaden

Grass-clover ley and whole-crop cereals as biogas substrate

– Evaluation of influence of harvest date and cutting length on energy yield and substrate costs

**Thomas Prade, Sven-Erik Svensson, Torsten Hörndahl,
Emma Kreuger, Jan Erik Mattsson**

Institutionen för Biosystem och teknologi

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds- och växtproduktionsvetenskap

Rapport 2015:22

ISBN 978-91-576-8912-2

Alnarp 2015

Landskap, trädgård och växtproduktionsvetenskap – rapportserie, 2015:22 •

Alnarp 2015

Vall och helsäd som biogassubstrat

Grass-clover crops and whole-crop cereals as biogas substrate

*Thomas Prade, Sven-Erik Svensson, Torsten Hörndahl, Emma Kreuger,
Jan Erik Mattsson*

thomas.prade@slu.se

Utgivningsort: Alnarp

Utgivningsår 2015

Omslagsbild: Thomas Prade

Serietitel: Landskap, trädgård och växtproduktionsvetenskap – rapportserie

Delnummer i serien: 2015:22

ISBN: 978-91-576-8912-2

Elektronisk publicering: <http://epsilon.slu.se>

Bibliografisk referens:

Prade, T., Svensson, S.-E., Hörndahl, T., Kreuger, E., Mattsson, J.E. (2015). Vall och helsäd som biogassubstrat - Utvärdering av skördetidpunktens och snittlängdens påverkan på energiutbytet och substratkostnaden. Alnarp: Sveriges lantbruksuniversitet. (Landskap, trädgård och växtproduktionsvetenskap – rapportserie, 2015:22).

Nyckelord: skördestrategi, biomassaavkastning, biogas, energiavkastning, metanpotential, kostnad, tekno-ekonomisk analys



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för Biosystem och teknologi

Förord

Detta forskningsprojekt har genomförts i ett samarbete mellan forskare vid Sveriges lantbruksuniversitet i Alnarp (SLU) och Lunds universitet (LU) samt Bioskördarna syd, Swedish Biogas International (SBI) och Skånska biobränslebolaget (SB3).

Thomas Prade har varit projektledare efter Jan Erik Mattsson. Övriga forskare som ingick i projektet var Sven-Erik Svensson och Torsten Hörndahl (Inst. för biosystem och teknologi, SLU Alnarp) samt Emma Kreuger (Bioteknik, LU).

Projektet har finansierats av Stiftelsen lantbruksforskning.

Forskarna tackar Håkan Larsson, Långaröds gård, och Göran Persson, Hättorna Ljungbyhed, för kompetent hjälp vid strängläggning och exakthackning av vall. Vi tackar speciellt Tomas Andersen, Joachim Grahn och Johan Magnusson vid Bioskördarna syd för datainsamlingen i samband med skörd av helsäd.

Vi författare hoppas att den här rapporten kan komma till nytta för jordbrukare och biogasanläggningsägare som själva vill räkna på sina specifika kostnader vid produktion av såväl biogassubstrat som biogas baserad på vall eller helsäd. Vi hoppas även att rapporten kan komma att användas som underlag för beslutsfattare vid framtida satsningar inom biogasområdet.

Alnarp, juni 2015

Thomas Prade^{a,b}, Sven-Erik Svensson^a, Torsten Hörndahl^a, Emma Kreuger^c, Jan Erik Mattsson^a

^a Institutionen för biosystem och teknologi, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Alnarp

^b Avdelningen för Miljö- och energisystem, Lunds Tekniska Högskola (LTH), Lund

^c Avdelningen för Bioteknik, Lunds Tekniska Högskola (LTH), Lund

Sammanfattning

Vall samt råg och vete skördad som helsäd används idag som biogasråvara i Sverige. Tidigare studier har visat att metanpotentialen, energiutbytet och även substratkostnaderna skiljer sig beroende på när grödorna skördas samt hur fint materialet hackas. Målet med detta projekt var därför att undersöka hur vall och helsäd effektivare kan utnyttjas som biogassubstrat genom att optimera skördetidpunkt och snittlängd. Andra forskningsfrågor var hur biomassaavkastning i fält samt snittlängdsinställningar hos exakthacken påverkar dieselförbrukning och skördekapacitet vid skörd av vall och helsäd.

Med hjälp av dynamiska skörde- och transportlogistikmodeller som, baserat på uppgifter om dieselförbrukning och tidsåtgång från ett skördeexperiment, gav dieselförbrukning och skördekapacitet vid olika snittlängdsinställningar, skördetidpunkter och val av grödor. Resultaten visade att när snittlängden ökade från 3,5 till 9 mm, minskade diesel- och tidsåtgången med 17 respektive 33 %.

Snittlängdsinställningar påverkar även metanpotentialen som bestämdes i labbttest. Sambandet är dock mer komplext än tidigare väntat. I våra studier har det visat sig att det inte alltid är lönt att hacka fint – tvärtom kan det både leda till minskat energiutbyte och kosta mer. För vall och vete ledde en finare hackning (4 istället för 12 mm) till att metanpotentialen minskade med 9 respektive 13 %, medan den ökade med 12 % när råg hackades finare. Det behövs fler detaljstudier som undersöker mekanismerna bakom de resultat som presenterats här samt sätter det i samband med skördetidpunkten, t.ex. med grödans mognadsgrad och TS-halt som faktorer.

Potentiella energivinster och substratkostnader beräknades med hjälp av livscykelmetodologi. Energivinsten för råg och vete var mycket hög, 36 respektive 33 MWh/ha. Detta motsvarar en energiuppväxling på drygt 5 gånger den insatta energin. Energivinsten från vall blev 24 % lägre än för råg, 28 MWh/ha. Detta baserades på de skördenivåer för vall, råg och vete på 12,2, 12,1 och 12,1 ton torrsbstans per hektar och år, vilka mättes i fältexperiment. Siffrorna har justerats för förluster vid skörd, transport och lagring, som också mättes i projektet.

Energivinsten för råg och vete kan vara ännu större, eftersom andra studier, som gjorts i samarbete mellan SB3 och SLU Alnarp, har visat att skördeökningar på 25-30 % är möjliga. Däremot förväntas biomassaavkastningen av vall inte utvecklas på samma sätt, tvärtom, så visar tidigare studier att andra årets skördar av vall kan vara upp till 30 % lägre än första årets.

De undersökta biogassubstraten hade lägre kostnader än betalningsförmågan från en potentiell biogasanläggning. Under de bästa förutsättningarna hade råg och vete de lägsta totalkostnaderna (514 respektive 521 kr/MWh) för produktion av fordonsgas. Fordonsgas från vall i 3-skördesystem hamnade ca 10 % högre, på 570 kr/MWh.

Vallens funktion som avbrottsgröda och dess goda egenskaper vad gäller markkolsuppsyggning bidrar med att koldioxid binds i marken samtidigt som markens bördighet höjs potentiellt. Dessutom kommer fordonsbränsle producerad av vall förmodligen att räknas som andra generationens *avancerade biobränslen*, som är berättigat till skattereduktion, samt vars produktion, enligt EU-regler under förhandling 2015, får räknas dubbelt i den nationella statistiken för produktion av förnybar energi.

Summary

Grass-clover ley as well as rye and wheat harvested as whole-crop silage (WCS) are used as biogas substrate in Sweden today. Earlier studies have shown that the specific methane potential, the energy yield and consequently also the substrate costs differ depending on when crops are harvested and how finely the material is chopped. The goal of this project was therefore to investigate how grass-clover ley and cereals can be used more efficiently as biogas substrates by optimizing harvesting dates and chopping length. Other research questions were how biomass yield and chopping length settings affect diesel consumption and harvest capacity.

Diesel consumption and harvest capacity for different cutting lengths, harvest dates and choices of crop were computed using dynamic harvest- and transport logistic models employing data for diesel consumption and machinery hours derived from a machinery harvest experiment. The results show that increasing cutting length from 3,5 to 9 mm reduced diesel consumption and machinery hours by 17 and 33 %, respectively.

Cutting length settings affected also the specific methane potential which was assessed in lab test. However, the relation is more complex than expected earlier. Our studies show that did not always pay off to chop finely – on the contrary, a too small cutting length setting can reduce energy yield and increase costs. For ley and wheat a reduced cutting length (4 instead of 12 mm) lead to a reduction in specific methane potential with 9 and 13 %, respectively, while for rye the specific methane potential increased by 12 %. Additional studies are needed to investigate the mechanisms behind these results as well as the role of crop maturity and dry matter content as an influencing factors.

Potential energy yields and substrate costs were computed following life cycle methodology. Energy yields of rye and wheat were high, 36 and 33 MWh/ha, respectively. This represents an energy factor of 5 times the energy used in the production. Energy yield for ley was 24 % lower than for rye, 28 MWh/ha. These results are based on biomass yields for wheat, rye and ley crops of 12,2, 12,1 and 12,1 tonnes dry matter per hectare and year, respectively, as measured in the field experiments. Values have been adjusted for losses during harvest, transport and storage according to project results.

The energy yield for rye and wheat could be further increased, since other studies in cooperation between SB3 and SLU Alnarp have presented up 25-30 % larger biomass yields. The biomass yield of ley crops are not expected to increase, on the contrary, as other studies have shown that second year biomass yields of ley crops can be up to 30 % lower than these of the first year.

All potential biogas substrates had lower production costs than the ability to pay of a potential biogas plant. Under the best circumstances, rye and wheat had the lowest total costs (514 and 521 SEK/MWh, respectively) for production of vehicle gas. Vehicle gas from ley crops harvested 3 times per year resulted in a ca 10 % higher cost, 570 SEK/MWh.

The function of ley crops as break crop or its positive properties concerning soil carbon add to the sequestration of carbon dioxide in the soil and potentially increases soil fertility. According to a current suggestion for EU rules, vehicle fuel from ley crops will be counted as a second generation *advanced biofuel*, which entitles to tax reductions and allows double accounting in national statistics on production of renewable energy.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
2	Fältförsök - metod och material	5
2.1	Valförsök	5
2.1.1	Försöksupplägg	5
2.1.2	Biomassaavkastning och torrsubstanshalt	5
2.1.3	Maskinskörd	5
2.2	Helsädesförsök.....	6
2.2.1	Försöksupplägg	6
2.2.2	Provtagning	6
2.2.3	Biomassaavkastning och torrsubstanshalt	7
2.2.4	Maskinskörd	7
2.3	Analyser.....	7
2.3.1	Ensileringsförsök.....	8
2.3.2	Metanpotentialbestämning	8
2.4	Maskinstudie om hackningskapacitet och dieselförbrukning.....	9
2.5	Beräkningar	9
2.5.1	Skördeförluster	9
2.5.2	Skördekapacitet	9
2.5.3	Dieselförbrukning.....	10
2.5.4	Transportdensitet.....	10
2.5.5	Ensileringsförluster	10
2.6	Statistisk.....	10
3	Fältförsök – resultat och diskussion	11
3.1	Biomassaavkastning	11
3.1.1	Vall.....	11
3.1.2	Råg	11
3.1.3	Vete	12
3.2	Torrsubstanshalt.....	12
3.2.1	Vall.....	12
3.2.2	Helsäd.....	13
3.3	Askhalt.....	14
3.3.1	Vall.....	14
3.3.2	Helsäd.....	15
3.4	Skördeförluster	15
3.5	Relativ skördekapacitet.....	16

3.6	Relativ dieselförbrukning	17
3.7	Transportdensitet	18
3.8	Ensileringsförluster.....	18
3.9	Metanpotential	18
3.9.1	Snittlängd i vall	18
3.9.2	Snittlängd i helsäd	20
3.9.3	Antal skördar i vall.....	21
3.9.4	Skördetidpunkter i helsäd.....	22
4	Systemstudie – metodik	25
4.1	Odling av vall och helsäd	25
4.1.1	Odlingsmoment	25
4.1.2	Utsädesmängd	25
4.1.3	Gödselmedel.....	26
4.2	Skörd av biomassa	26
4.2.1	Strängläggning av vall - Arealkapacitet.....	27
4.2.2	Strängläggning av vall - Dieselförbrukning.....	28
4.2.3	Hackning av vall – Arealkapacitet	29
4.2.4	Hackning av vall – Dieselförbrukning	30
4.2.5	Hackning av helsäd - Arealkapacitet.....	31
4.2.6	Hackning av helsäd - Dieselförbrukning.....	32
4.2.7	Biomassavkastning efter skördeförluster	33
4.3	Transport av biomassa	34
4.4	Övriga maskinarbetsmoment.....	35
4.5	Lagring av biomassa.....	36
4.6	Askhalt.....	36
4.7	Metanpotential	37
4.8	Energibalans	37
4.8.1	Energiinsatser i biomassaproduktion	37
4.8.2	Energiinsatser i biogasproduktion.....	38
4.8.3	Energipotential	39
4.8.4	Nettoenergiavkastning.....	40
4.9	Substratkostnader.....	40
4.9.1	Gödselmedel.....	40
4.9.2	Maskiner.....	40
4.9.3	Utsäde, kalkning och pesticidanvändning.....	40
4.9.4	Lagring i plansilo	40

4.10	Processkostnader	41
4.10.1	Biogasproduktion	41
4.10.2	Uppgradering.....	41
4.10.3	Rörestlagring	41
4.11	Betalningsförmåga.....	41
5	Systemstudie – resultat och diskussion	42
5.1	Energibalans	42
5.1.1	Dieselförbrukning.....	42
5.1.2	Energiinsatser i biomassaproduktion	44
5.1.3	Energipotential	46
5.1.4	Energibalans	48
5.1.5	Känslighetsanalys - Energibalans.....	49
5.2	Kostnader.....	50
5.2.1	Skördekostnader	50
5.2.2	Transportkostnader.....	51
5.2.3	Substratkostnader	53
5.2.4	Processkostnader	55
5.2.5	Produktionskostnader	55
5.2.6	Känslighetsanalys – Kostnader	56
5.2.7	Betalningsförmåga	59
6	Övergripande diskussion och slutsatser	61
6.1	Lämplighet som biogassubstrat	61
6.2	Odlingsrelaterade aspekter	62
6.3	Slutsatser.....	62
7	Referenser.....	63

Bilaga

1 Inledning

Vall som biogassubstrat

Vallar på både högavkastande åkermark och lägre avkastande marginalmarker har en stor potential för hållbar odling av biomassa för biogasproduktion, samtidigt som landskapet kan bevaras öppet. Enligt officiell statistik finns för närvarande ca 130 000 ha åkermark i träda (SCB, 2015). Det kan enligt andra bedömningar vara så mycket som 800 000 hektar, eller 30 procent, av Sveriges samlade åkerareal som inte används effektivt (Davidson, 2011).

Fleråriga biogasvallar har flera fördelar ur ett hållbarhetsperspektiv, jämfört med ettåriga biogasgrödor som spannmål, sockerbetor och majs. De viktigaste skillnaderna är att de fleråriga vallarna kan utnyttja hela växtsäsongen, även tidig vår och sen höst, samt att man inte behöver jordbearbeta varje år. Detta leder till minskad energianvändning i odlingen och potential för högre kolinlagring i rötter och mark. Vidare kan samodling mellan vallgräs och kvävefixerande växter genomföras på ett praktiskt sätt, där effektiviteten i kvävefixeringen blir hög när biomassan bortförs från fältet (Carlsson and Huss-Danell, 2003).

Användning av vall till produktion av biogas är positivt med hänsyn till utsläpp av växthusgaser enligt Börjesson och Berglund (2003). Vidare visades det att vall har den bästa energibalansen jämfört med sockerbetor, oljeväxter och vete vid biogasproduktion (Edström *m.fl.*, 2007).

Helsäd som biogassubstrat

Andra studier visar dock att vetebaserad biogas har en bättre energibalans och ett bättre drivmedelutbyte per hektar jämfört med vallbaserad biogas, baserat på relativ låga skördenivåer på 7,5, 64 och 2 ton TS/ha för vall, vetekärnor respektive vetehalm (Börjesson, 2004). Lika låga värden för biomassaavkastningen användes i flera andra utvärderingar av vall som biogassubstrat (Dalemo *m.fl.*, 1993, Johansson and Fellin, 1995, Vågström, 2005). Nyare studier över biogasproduktion från kväverika vallar, genomförda på ett par olika lokaler i Skåne och Västergötland, av SLU Alnarp, anger en biogasproduktion på 14-18 ton TS per år, beroende på jordart och årsmån samt om vallen skördats i två- eller treskördssystem (Berglund *m.fl.*, 2012, Rosenqvist *m.fl.*, 2014). För helsäd av råg, rågvete och vete rapporterades dock ännu högre skördenivåer på 18-22 ton TS/ha (Olanders, 2014).

I Formas-projektet "Crops4Biogas", som har genomförts i ett samarbete mellan LTH och SLU Alnarp, har det visat sig att rågvete, skördad som helsäd, är den gröda som ur hållbarhetssynpunkt klarar sig bäst, i jämförelse med de andra ettåriga grödorna som ingick i studien (Gissén *m.fl.*, 2014, Börjesson *m.fl.*, 2015). Räknar man in markkollsekffekten är det dock vall som leder till störst miljönytta (Börjesson *m.fl.*).

Biogassubstratets partikelstorlek - snittlängdens betydelse

Vall används idag som biogassubstrat bland annat i biogasanläggningarna i Örebro (8 GWh) och Lidköping (3 GWh). Helsäd av vete och råg används som biogassubstrat i större utsträckning bland annat i SBI Jordberga Biogasanläggning utanför Trelleborg. Strategin vid skörden är oftast att hacka biogasgrödan fin i fält, bland annat för att öka nedbrytningshastigheten vid rötningen och för att öka gasutbytet.

För kontinuerlig substratförsörjning av större biogasanläggningar krävs det att grödorna kan tillhandahållas under hela året. Detta kräver att grödorna kan lagras mellan skörd och inmatning, när direktinmatning av färskt skördat material inte kan ske, t.ex. under vinterhalvåret. Lagring av biomassan under en längre tid sker bäst som ensilage, vilket minskar

förlusterna av biomassa och energi. För att få igång en stabil ensileringsprocess krävs det att det frigörs intracellulära substanser, främst socker. Detta sker enklast genom en minskning av partikelstorleken (McDonald *m fl.*, 1991, Palmowski and Müller, 2000).

Partikelstorleken i biomassan kan påverkas vid skörden, t.ex. genom exakthackning, eller vid senare moment i hanteringskedjan alternativt vid själva biogasproduktionen. Vid exakthackning är det tekniskt okomplicerat att variera snittlängden, för att på så sätt få en mindre eller en större partikelstorlek. I praktiken görs detta sällan vid hackning av gräs till biogas, om samma exakthack används omväxlande för hackning av gräs som djurfoder och som biogassubstrat, eftersom det tar relativt lång tid att montera in och ur knivarna i knivtrumman.

Förutom att förbättra förutsättningar för ensileringen, har det visats att en kortare snittlängd också resulterar i ett högre metanutbyte, genom en ökning av reaktionsytan (Palmowski and Müller, 2000) och i bättre hanterbarhet av substratet, t.ex. vid pumpning och omrörning i biogasanläggningens rötkammare. Användning av fiberrika substrat, t.ex. vall och spannmålshalm, i biogasprocessen ökar risken för bildning av svämtäcke i rötkammaren (Nordberg and Edström, 1997). Denna risk kan dock minskas genom en förhöjd TS-halt (Nordberg and Edström, 1997), genom en minskning av partikelstorleken (Nordberg and Edström, 1997) eller genom andra förbehandlingsmetoder, t ex ångexplosion (Bauer *m fl.*, 2008). En annan metod är att termo-mekaniskt finfördela materialet via bio-extrudering, vilket resulterar i snabbare biogasproduktion och mindre energibehov vid omrörningen i rötkammaren (Lehmann and Friedrich, 2012).

Det finns dock en undre gräns för lämplig snittlängd, under vilken en ytterligare minskning av snittlängden inte leder till nämnvärda förbättringar av ensileringsegenskaperna, metanutbytet eller hanterbarheten. En alltför liten snittlängd kan därför bli oekonomisk (Chynoweth *m fl.*, 1993). En minsta optimal snittlängd verkar ligga mellan några millimeter till någon cm beroende på substratet och dess egenskaper (Lehtomäki, 2006).

Biomassan skall alltså fortfarande kunna ensileras när den är finhackad och vidare så får kostnaden för substratet inte öka nämnvärt, i varje fall inte mer än att en eventuell ökad hack- och ensileringskostnad mer än väl kan balanseras av ett ökat metanutbyte från det finhackade materialet (Bioenergiportalen, 2011).

Det saknas undersökningar på snittlängdens betydelse vid exakthackning och ensilering av vall och helsäd för biogasproduktion i våta omrörda rötningsprocesser som även är kopplat till biogasutbytet, substratkostnaden och metangaskostnaden.

Skördetidpunktens / växtens utvecklingsstadiums påverkan på metanutbytet

Metanskörden (energiskörden) per hektar (normalkubikmeter metan per hektar (Nm^3/ha)) från en biogasgröda påverkas både av det specifika metanutbytet (volym metan per massenhet av substratet, mätt i t.ex. torrsbstans (TS) eller organisk torrsbstans (VS)) och biomassaavkastningen hos grödan per hektar. När det gäller betydelsen av skördedatum eller snarare växtens utvecklingsstadium, så finns det två processer som påverkar energiavkastningen: a) andelen strukturella kolhydrater (t.ex. lignin) ökar i växten med växtens ålder, vilket minskar metanutbytet och b) tillväxten som ökar biomassaavkastningen per ytenhet. Det har dock visats att betydelsen av de två processerna varierar för olika grödor.

När det gäller det specifika metanutbytet har det t.ex. visats att smältbarheten hos vall minskar när ligninhalten i vallen ökar (Bryant, 1973), dvs. vid senare skördedatum (utvecklingsstadium). Det här återspeglas i att ett ökat antal skördar av vall per år leder till ett ökat specifikt metanutbyte hos vallen (Amon *m fl.*, 2005, Amon *m fl.*, 2007), pga. av att ligninhalten är lägre vid fler skördar per år, dvs. med korta tillväxtperioder mellan skördarna.

För rågvete har det rapporterats en minskning av det specifika metanutbytet, med 11 respektive 30 % för skörd vid mjölk- respektive degmognad i jämförelse med skörd vid blomning (Heiermann *m fl.*, 2009). För råg och korn hittades dock ett 4-40 % högre metanutbyte per massenhet för skörd vid mjölk- respektive degmognad jämfört med skörd vid blomning respektive degmognad (Heiermann *m fl.*, 2009).

Biomassaavkastningen i vall beror på många parametrar, dock har gödslingsnivån, vattentillgången och antalet skördar per år mest inflytande. Fler än 2 skördar per år i extensiva vallodlingar och fler än 3 skördar i intensiva (välgödslade) vallodlingar gav inga nämnvärda energivinsten per ha (Amon *m fl.*, 2005). En senarelagd första skörd i en intensiv odlad vall höjde energiavkastningen med ca 18 % per ha och år (Amon *m fl.*, 2005).

Det behöver tas fram tidskorrelerade data för biomassaavkastning och specifikt metanutbyte för biogasvallar i två- respektive treskördssystem samt för helsädesgrödor, dvs. uppgifter om metanskörden per hektar, så att optimal skördetidpunkt för dessa biogassubstrat kan bestämmas.

Energibalans

För att minimera påverkan på miljön vid användning av odlade grödor för biogasproduktion och för att minska konkurrensen om åkermark för foder- och livsmedelsproduktion är det väsentligt att den använda åkermarken kan utnyttjas så effektivt som möjligt eller att biogasgrödorna skördas på marginalmarker som normalt inte används för foder- eller livsmedelsproduktion. Odlas grödorna på åkermark krävs det att grödorna levererar en hög energiavkastning per hektar för att vara hållbara (Prade *m fl.*, 2013).

Energibalansberäkningar för vall vid biogasproduktion har visat att energiinsatser vid odlingen av biomassa kan motsvara över 40 % av den totala energiinsatsen (Berglund and Börjesson, 2006, Börjesson *m fl.*, 2015). Detta betyder att en ändring av energiinsatser, t.ex. vid en förändrad snittlängd, påverkar vallens energibalans och troligen även produktionskostnaden i hög grad.

För att kunna jämföra olika biogasgrödor och olika odlingssystem för biogasproduktion med avseende på deras energieffektivitet behövs det beräkningar av energibalansen, dvs. beräkning av energitillförsel och metanskörden, för att värdera systemens effektivitet.

Kostnader

Vid valet av substrat till en biogasanläggning är ekonomiska aspekter oftast avgörande. De två viktigaste aspekterna är kostnader för produktionen av substrat samt det förväntade energiutbytet i form av metangas. Förutom skördetidpunkt i helsäd respektive antal skördar per år i vall som påverkar metanpotentialen och biomassaavkastningen, spelar skörde- och transportlogistiken en viktig roll ur ekonomisk synpunkt. Men även biogasprocessen och dess kostnader påverkas av substratets egenskaper, såsom metanpotential och vattenhalt.

För att kunna jämföra olika biogasgrödor och olika odlingssystem för biogasproduktion med avseende på deras kostnadseffektivitet behövs det beräkningar av totalkostnaden, dvs. beräkning av substratkostnad samt processkostnad i relation till förväntade inkomster.

Syfte

Syftet med denna studie har varit att studera hur skördetidpunkt och snittlängd påverkar metangasutbytet och kostnaden för biogassubstraten vall och helsäd, för att på sikt kunna stärka den svenska biogasmarknaden. Dagens låga oljepris och en hög produktion av biogas ger inte de ekonomiska förutsättningarna för en ökad biogasproduktion i Sverige, vilket behövs med hänsyn till de framtidsvisioner om fossilfri transportsektor som målats upp de senaste åren inom

olika samhällssektorer. För att höja biogasproduktionen till nivåer som krävs för att uppfylla dessa mål behövs det en bred kunskapsbas kring potentiellt hållbara biogassubstrat, där odlade grödor kan spela en viktig roll för en hållbar samhällsutveckling.

När det gäller odlade grödor så finns det många möjligheter att optimera grödval samt energiutbyten och ekonomin av biogasproduktion. Målet i detta projekt har varit att optimera energiutbytet och kostnaderna för två intressanta grupper av biogasgrödor, vallväxter och helsäd av spannmål. För att kunna studera snittlängdens betydelse för energibalansen och ekonomin har ett delmål i studien varit att utarbeta en dynamisk modell för simulering av olika snittlängder vid skörd av vall och helsäd till biogas.

Rapportens struktur

Rapporten är skriven i tre delar:

Del A - Fältförsök (Kapitel 2 och 3)

Del B - Systemstudie. (Kapitel 4 och 5)

Del C - En gemensam diskussion och slutsatser dras sedan för del A och B (Kapitel 6).

2 Fältförsök - metod och material

2.1 Vallförsök

2.1.1 Försöksupplägg

2012 anlades ett fältförsök med vall på Wrams Gunnarstorps gods (56°05'N, 12°57'Ö), nordvästra Skåne på tung lerjord med en lerhalt > 40 % och en mullhalt på ca 4 %. Vallen i försöket etablerades 2011 med en blandning av gräs/klöver/ört (41 %/19 %/40 %; Tabell 1).

Tabell 1. Sammanställning av växter som ingår i vallblandningen.

Växtart		Sort	Viktsandel [%]
Blålusern	Medicago sativa	CRENO	20,3
Cikoria	Cichorium intybus	PUNA	19,8
Rödklöver	Trifolium pratense	SARA	9,5
Rödklöver	Trifolium pratense	TAIFUN	9,5
Rörsvingel	Festuca arundinacea	KORA	12,2
Timotej	Phleum pratense	COMER	28,6

Försöket anlades som ett randomiserat blockförsök enligt Figur 1. Faktorer som undersöktes var snittlängden vid skörden (4, 8 och 12 mm) samt antal skördar per år (2 resp. 3). Snittlängderna benämns i fortsättningen som *fin* (4 mm), *mellan* (8 mm) och *grov* (12 mm). Alla behandlingar upprepades 5 gånger (=5 block). Varje försöksparcell var 10,5 m bredd och 15 m lång. Parcellens bredd delades upp i 3 lika breda drag som stränglades med en traktorburen rotorslättermaskin och sedan hackades vallen med en självgående exakthack i olika snittlängder.

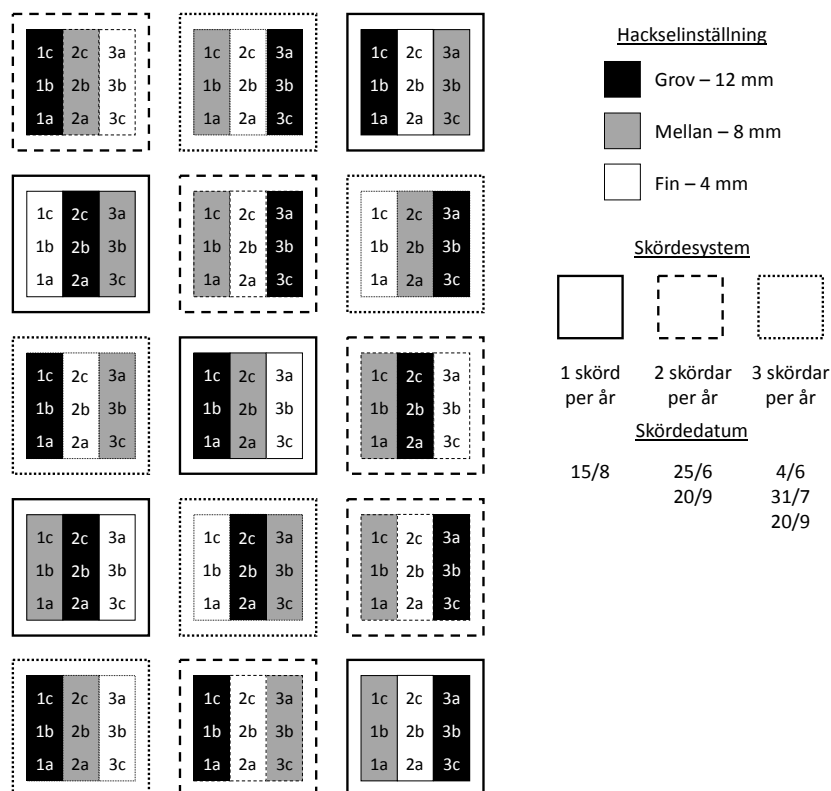
Hela försöket gödslades med 35 m³ rötrest från Söderåsens Bioenergi 2012-04-06. Detta medförde en giva på 105, 21 och 39 kg/ha av ammoniumkväve, fosfor respektive kalium. I 2- och 3-skördesystemet gödslades med ytterligare 60 kg N/ha efter första skörden (2012-06-25 respektive 2012-06-05). Vallen skördades 1, 2 respektive 3 gånger i försöket (Figur 1).

2.1.2 Biomassaavkastning och torrsbstanshalt

För bestämning av biomassaavkastning och torrsbstanshalt (TS-halt) handklippes vallen 3-4 cm över markytan. Tre skörderutor (0,5 m x 0,5 m = 0,25 m²) klipptes i varje försöksruta. Provvikten bestämdes som färskvikt direkt efter provtagningen samt som torrsvikt efter ugnstorkning i 24 timmar vid 105 °C.

2.1.3 Maskinskörd

Skörden av vall utfördes genom att slå gräset med en rotorslättermaskin som stränglade vallen. Strängen plockades upp (bärgades) med en exakthack med pick-up och hackades i olika snittlängder (4, 8 och 12 mm). Det hackade materialet blåstes till en traktordragen fodervagn med vågfunktion för att bestämma skördevikten per försöksruta. Prover togs för bestämning av TS-halt. Biomassaavkastningen (ton TS/ha) vid maskinskörd beräknades sedan genom att dividera TS-skördevikten med ytan av försöksrutan som maskinskördats.



Figur 1. Fältförsökets design för vallodling till biogas på Wrams Gunnarstorp, nordvästra Skåne.

2.2 Helsädesförsök

2.2.1 Försöksupplägg

År 2013 genomfördes liknade undersökningar i helsäd som för vall under 2012. Två fältförsök anlades i två produktionsfält. På Skabersjö (55°31'N 13°08'Ö) undersöktes råg som helsäd och på Näsbyholm (55°28'N 13°26'Ö) undersöktes vete som helsäd. Gödsling utfördes enligt Tabell 2.

Tabell 2. Gödsling av fältförsöken

Gröda	Fält	Datum	N [kg/ha]	P [kg/ha]	K [kg/ha]	S [kg/ha]
Råg	Skabersjö	2012-10-01	14	15	-	-
		2013-04-05	82	-	-	12
		2013-04-28	35	-	-	5
		Total	131	15	-	17
Vete	Näsbyholm	2012-10-16	14	15	-	-
		2013-04-06	81	-	-	12
		2013-05-02	64	-	-	9
		Total	159	15	-	21

Fältet som användes för försöket med råg hade ursprungligen varit avsett för tröskning och hade behandlats med stråforkortningsmedel.

2.2.2 Provtagning

Biomassaavkastningen och TS-halt bestämdes vid 3 olika skördedatum och vid olika snittlängder (Tabell 3).

Tabell 3. Schema för provtagning i helsädesförsöket

Gröda	Fält	Studie	1:a skörd (<i>tidigt</i>)	2:a skörd (<i>medium</i>)	3:e skörd (<i>sent</i>)
Råg	Skabersjö		2013-07-08	2013-07-15	2013-07-22
		Skördetidpunkt	manuellt 12,5 mm	manuellt 12,5 mm	manuellt 12,5 mm
		Snittlängd		maskinellt 3,5; 5,5; 12,5 mm	
Vete	Näsbyholm		2013-07-17	2013-07-22	2013-07-29
		Skördetidpunkt	manuellt 12,5 mm	manuellt 12,5 mm	manuellt 12,5 mm
		Snittlängd		maskinellt 3,5; 5,5; 12,5 mm	

3,5 mm=*fin*; 5,5 mm = *mellan*; 12,5 mm = *grov*

I fortsättningen benämns snittlängderna som *fin* (3,5 mm), *mellan* (5,5 mm) och *grov* (12,5 mm). Skördetidpunkterna *tidigt*, *medium* och *sent* motsvarade utvecklingsstadierna sen mjölkmodnad, tidig degmodnad och sen degmodnad i råg respektive tidig mjölkmodnad, sen mjölkmodnad och tidig degmodnad i vete.

2.2.3 Biomassaavkastning och torrsubstanshalt

För bestämning av biomassaavkastning handklippes helsäd 3-4 cm över markytan. Tre skörderutor (0,5x0,5=0,25 m²) klipptes i totalt 5 parceller per gröda. För bestämning av TS-halten bestämdes provvikten som färskvikt direkt efter provtagningen samt som torrsvikt efter ugnstorkning i 24 timmar vid 105 °C.

2.2.4 Maskinskörd

Skörden av helsäd genomfördes med en exakthack utrustad med ett helsädesbord. Prover till undersökningen av snittlängden togs direkt efter maskinskörd (vid de olika snittlängdsinställningarna). Prover till undersökning av skördetidpunkt i helsäd handklippes i fält och hackades manuellt till ca 12,5 mm snittlängd och benämns som *grov*.

2.3 Analyser

Prover för ensilering och metanpotentialbestämning av vall respektive helsäd togs i samband med maskinskörd. Tabell 4 visar antalet prover som analyserades i ensileringsförsöket och metanpotentialbestämningen.

Tabell 4. Behandlingar och provtagning i fältförsöken med vall och helsäd

Gröda	Vall	Helsäd
Behandlingar	<ul style="list-style-type: none"> Tre olika snittlängder (maskinskörd) Fem olika skördar (två och tre skördar i 2- respektive 3-skördesystemet) 	<ul style="list-style-type: none"> Tre olika snittlängder (maskinskörd) <ul style="list-style-type: none"> Tre olika skördetidpunkter (handskörd) Två grödor (vete och råg)
Ensileringförsök	3*5=15 prover i 3 upprepningar	2*(3+3)=12 prover i 3 upprepningar
Metanpotentialbestämning	Tre delprover av en upprepning per ensileringsprov	

2.3.1 Ensileringsförsök

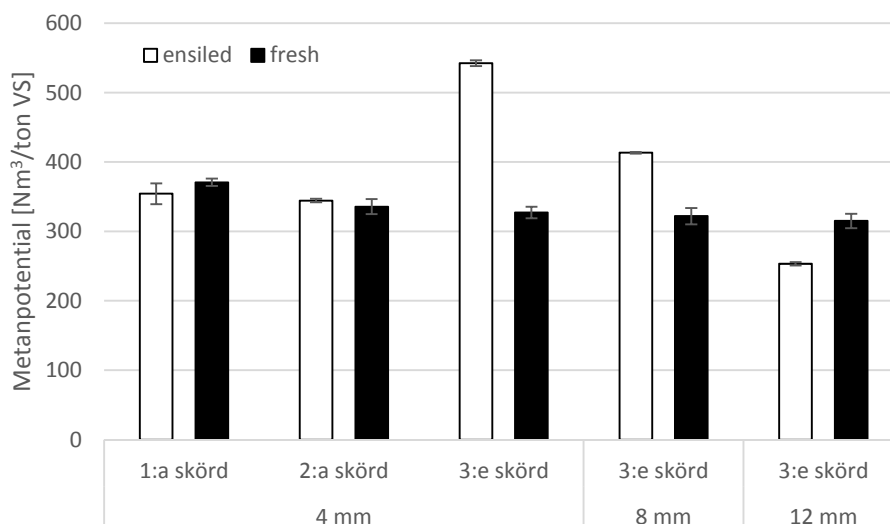
Prover för ensilering och efterföljande metanpotentialbestämning av vall respektive helsäd hackad vid olika snittlängder togs i samband med maskinskördarna. Alla prover ensilerades under labbförhållande i lufttäta hinkar (4,8 L) med tillkopplad gaspåse (Kreuger *m fl.*, 2011). Prover för varje behandling ensilerades i tre upprepningar. Den totala gasvolymen som hade bildats under tre månader bestämdes med hjälp av en gasspruta. Gasens sammansättning (koldioxid och metan) bestämdes i en gaskromatograf.

2.3.2 Metanpotentialbestämning

För bestämning av metanpotentialen togs tre delprover från en av upprepningarna av varje ensilerat prov. Dessa delprover blandades med en ymp som innehåller mikroorganismer som ska bryta ned provet under rötningen i laboratorieskala. Som ymp användes rötslam från röt-kammaren vid Källby avloppsreningsverk. Eftersom ympen också innehåller röttningsbara substanser, produceras metan även från själva ympen. För att kunna skilja mellan metan producerad från ympen och metan producerad från vall- respektive helsädesprovet beräknades provets metanutbyte genom att subtrahera mängden metan producerad från ympen. Ympen rötades i separata provflaskor som bara innehåller ymp (negativa kontroller). Tre negativa och tre positiva kontroller användes i första metanpotentialtestomgången och fyra av varje i den andra. I de positiva kontrollerna rötades cellulospulver. Genom dessa kontrolleras att det finns både cellulosanedbrytande (cellulosa är en av huvudbeståndsdelarna i vall och helsäd) och metanproducerande mikroorganismer i ympen.

Utröttningsförsöken utfördes i AMPTS (*automatic methane potential test systems*) tillverkade av Bioprocess control AB, Lund. I varje testflaska användes 300 mL ymp och substrat motsvarande hälften så mycket organiskt material mätt som volatile solids (VS) som i ympen i samma flaska. Mängden substrat som tillsattes baserades på TS och VS som mätts på färskt material eftersom det är svårt att mäta den totala mängden organiskt material i ensilage (Kreuger et al. 2011). Värden för TS och VS korrigerades dock enligt den producerade gasens massa för förluster av TS och VS som skedde under ensileringen inför beräkningen av metanpotentialen. Röttningsförsöken utfördes under 30 dagar vid 37°C. Vid beräkning av standardavvikelse för proven inkluderades både standardavvikelse för proven och för kontrollerna som subtraherades från ympen på samma sätt som beskrivs i Kreuger et al. (2011).

Vid metanpotentialbestämningarna för vall som hackats enligt benämningen *fin* respektive *mellan* i 3-skördesystemet hittades mycket höga värden för 3:e skördetillfället. För att undersöka om det kunde vara ett systematiskt fel bakom de höga värdena analyserades även ett urval av ”färska” (frysta, ej ensilerade) biomassaprover (Figur 2). Analysresultaten från dessa färska prov kunde inte bekräfta den höga metanpotentialen för de ensilerade proven i detta fall. Därför har resultaten från analyserna av färskt material använts vid vidare resultatredovisning.



Figur 2. Metanpotential av ett urval av färska biomassprover från 3-skördesystemets olika skördar och olika snittlängder för vall som biogassubstrat.

2.4 Maskinstudie om hackningskapacitet och dieselförbrukning

Under 2014 genomfördes en maskinstudie kring snittlängd vid skörd av helsäd. Studien genomfördes den 9 juli 2014 med hjälp av en exakthack (Claas Jaguar 980, helsädesbord) på ett 37 ha stort fält med rågvete beläget på Stora Markie Gård, Anderslöv (55°26' N 13°16' Ö). Avkastningen över hela fältet var 18,5 ton TS/ha i medeltal enligt vågsedlar från SBI Jordberga Biogasanläggning. Snittlängderna som ingick i undersökningen var 3,5 mm, 5 mm och 9 mm. Dessa benämns som *fin*, *mellan* respektive *grov* i fortsättningen. Data som registrerades var bl.a. körsträcka och bränsleförbrukning (från exakthackens datorsystem) och lassvikter, enligt vågsedlar, för de traktordragna följevagnarna som fylldes med biomassan av exakthacken.

2.5 Beräkningar

2.5.1 Skördeförluster

Biomassaavkastning som bestäms genom handskördade provrutor överskattar normalt den tekniskt möjliga biomassaavkastningen vid maskinell skörd, eftersom det alltid sker skördeförluster i form av högre stubb, material som inte kan plockas upp av maskinens pick-up, med mera. Därför har en bärgningskoefficient för vallskörd beräknats från kvoten mellan biomassaavkastningen (TS) enligt maskinskörden (2.1.3) och biomassaavkastning (TS) enligt handskördade rutor (2.1.2):

$$\text{Bärgningskoefficient}[\%] = \frac{\text{Biomassaavkastning}_{\text{maskinell}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{ha}} \right]}{\text{Biomassaavkastning}_{\text{manuell}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{ha}} \right]} \cdot 100$$

2.5.2 Skördekapacitet

Kapaciteten vid hackning av helsäd beräknades enligt:

$$\text{Skördekapacitet} \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] = \frac{\text{Skördad grönmassa} [\text{ton}]}{\text{Arbetstid} [\text{h}]}$$

Uppgifter på arbetstid hämtades ur exakthackens datorsystem. Arbetstiden omfattar hackning och vändning på vändtegen, dock inga eventuella väntetider på följevagnar. Eftersom exakthackens datorsystem inte kalibrerades vid skörd av helsäd, används inte uppgifterna från maskinens dator som den absoluta skördekapaciteten. Istället beräknades en korrigeringsfaktor för kapaciteten vid längre snittlängder (9 mm och 5 mm) från uppgifterna om skördad areal och arbetstid. Kapaciteten vid hackning med 3,5 mm snittlängd antogs vara 100 %. För systemstudien användes litteraturuppgifter för kapaciteten vid normal drift som medel, som sedan justerades med korrigeringsfaktorn.

2.5.3 Dieselförbrukning

Dieselförbrukningen av exakthacken vid skörd av helsäd beräknades enligt:

$$\text{Bränsleförbrukning} \left[\frac{L}{ha} \right] = \frac{\text{Förbrukad bränsle [L]}}{\text{Areal [ha]}}$$

Uppgifter på förbrukad mängd diesel hämtades ur exakthackens datorsystem. Eftersom exakthackens datorsystem inte kalibrerades vid skörd av helsäd, används inte uppgifterna från maskinens dator som den absoluta dieselförbrukningen. Istället beräknades en korrigeringsfaktor för förbrukningen av diesel vid längre snittlängder (9 mm och 5 mm) från uppgifterna om dieselförbrukning och skördad areal. Dieselförbrukningen vid hackning med 3,5 mm snittlängd antogs vara 100 %. För systemstudien användes litteraturuppgifter för dieselförbrukning vid normal drift som medel, som sedan justerades med korrigeringsfaktorn.

2.5.4 Transportdensitet

Densiteten av hackad helsäd vid transport till biogasanläggningen beräknades från följevagnarnas DIN-volym (DIN, 1991) och lassvikterna som har registrerats på fordonsvågen (vågsedeln) vid SBI Jordberga biogasanläggning.

$$\text{Transportdensitet} \left[\frac{ton}{m^3} \right] = \frac{\text{Lassvikt [ton]}}{\text{Vagnsvolym [m}^3\text{]} \cdot 0,95}$$

Fyllnadsgraden blev maximalt 100 % av vagnsvolymer enligt DIN 11741, eftersom vagnarna övertäcktes vid vägtransport. För beräkningarna antogs att fyllnadsgraden var 95 %.

2.5.5 Ensileringsförluster

Ensileringsförluster har beräknats som relativ energiförlust enligt:

$$\frac{\text{Energiförlust}_{\text{Ensilering}}}{\text{Energiförlust}_{\text{Uppsamlad metangas}}} = \frac{\text{Energiförlust}_{\text{Uppsamlad metangas}}}{\left(\text{Energiförlust}_{\text{Uppsamlad metangas}} + \text{Energipotential}_{\text{BMP av ensilerad biomassa}} \right)}$$

2.6 Statistisk

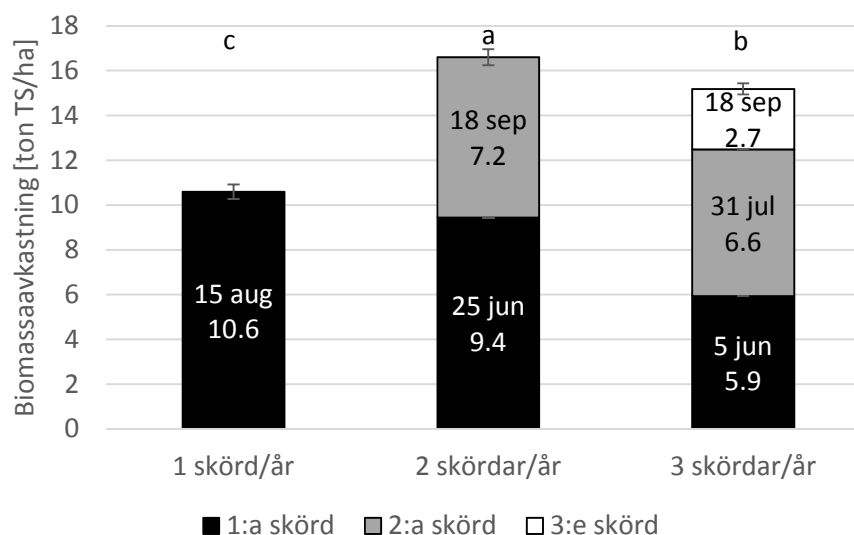
Statistiska analyser genomfördes med hjälp av mjukvarupaketet ”R” (R Development Core Team, 2011). Datahantering gjordes med hjälp av Excel och R-paketet *XLSX* (Dragulescu, 2011). Statistiska skillnader undersöktes med hjälp av ANOVA och Tukeys post-hoc test i R-paketet *multcompView* (Graves *m.fl.*, 2011) för $p < 0,05$.

3 Fältförsök – resultat och diskussion

3.1 Biomassaavkastning

3.1.1 Vall

Fältförsöket med vall visade signifikanta skillnader i biomassaavkastning för systemen med olika antal skördar per år (Figur 3). Den högsta avkastningen, med i snitt 16,6 ton TS/ha erhöles i 2-skördesystemet, som låg 9 % över avkastningen i 3-skördesystemet (15,2 ton TS/ha). Avkastningen i 1-skördesystemet, med skörd i mitten av augusti, var endast 10,6 ton TS/ha.



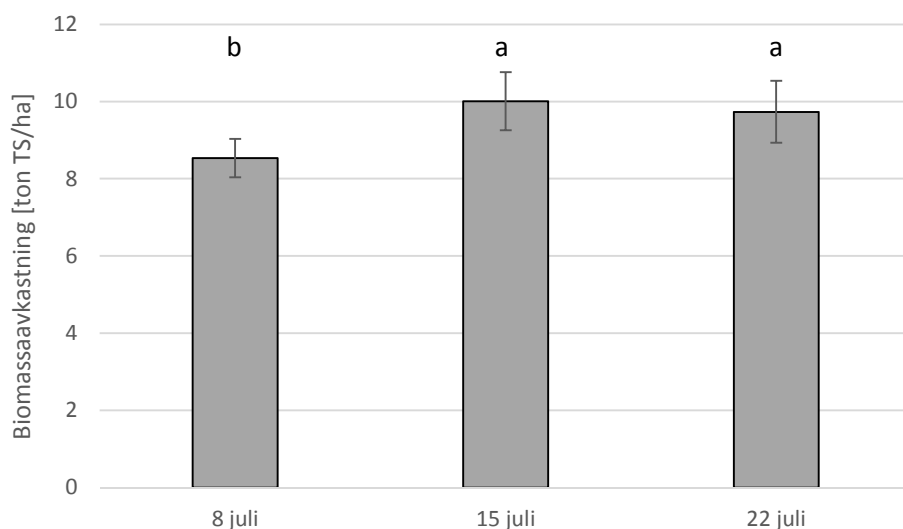
Figur 3. Ackumulerad biomassaavkastning av vall i ton TS per hektar för de olika skördesystemen. Staplar med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0,05$). Datumet avser skördetidpunkt. Felstaplar visar medelfelet.

Efter andra skörden i 3-skördesystemet gödslades vallen inte, vilket gjordes efter första skörden. Denna gödslingsstrategi resulterar i en relativt låg återväxt, bara 2,7 ton TS/ha. Hade gödsling skett även efter andra skörden, hade avkastningen i tredje skörden förmodligen varit något större. Biomassaavkastningen för vallen skördad 2 resp. 3 gånger per år var i samma nivå som en tidigare studie i södra Sverige som undersökte gräs-baljväxtvallar med en avkastning på 15,7-16,7 ton TS/ha (Frankow-Lindberg, 2013). Gunnarsson *et al.* (2014) visade dock att medelavkastningen i andra studier i hela Sverige var 9,8 ton TS/ha för 2-skördesystem och 9,6 ton TS/ha för 3-skördesystem. Vall från intensiv odlad permanent gräsmark i Österrike har producerat biomassaavkastningar på 11,7-14,2 ton TS/ha, dock är det oklart om värdena inkluderar förluster vid maskinell skörd (Amon *m fl.*, 2007).

3.1.2 Råg

Biomassaavkastningen för råg skördad som helsäd vid tre olika tillfällen visas i Figur 4. Avkastningen steg från runt 8 ton TS/ha den 8 juli signifikant till runt 10 ton TS/ha bara en vecka senare. Ytterligare en vecka senare hade avkastningen inte förändrats signifikant.

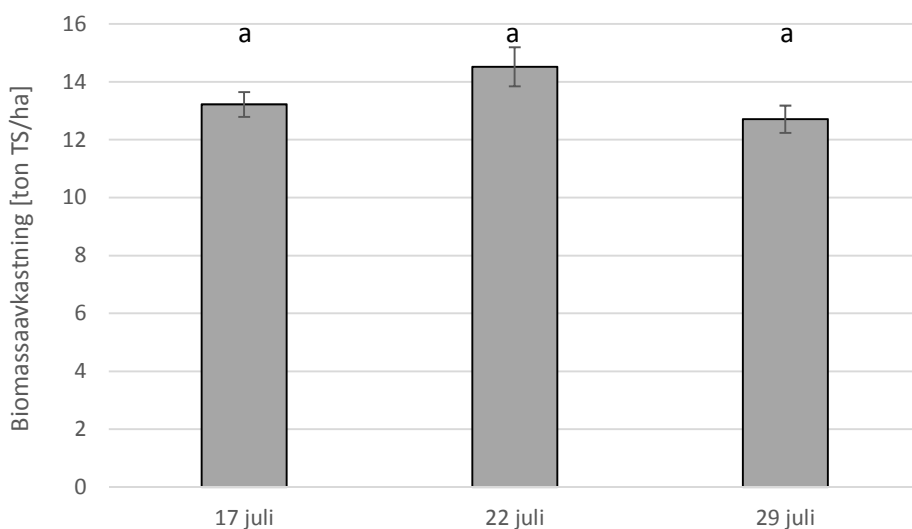
Fältet som användes för detta försök hade ursprungligen varit avsedd för tröskning och hade behandlats med stråförkortningsmedel. Därför blev biomassaavkastningen hos råg relativt liten. Andra studier har visat att skördar upp till 22 ton TS/ha är möjliga (Amon *m fl.*, 2007, FNR, 2013, Olanders, 2014).



Figur 4. Biomassaavkastning för råg som helsäd vid tre olika skördetidpunkter. Staplar med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0,05$). Datumet avser skördetidpunkt. Felstaplar visar medelfelet.

3.1.3 Vete

Biomassaavkastningen för vete skördad som helsäd var relativt hög (Figur 5). Avkastningen förändrades inte signifikant mellan den 17 juli och den 29 juli och låg i genomsnitt på 13,5 ton TS/ha. Andra studier har visat att skördar upp till 20 ton TS/ha är möjliga (Amon *m fl.*, 2007, FNR, 2013, Olanders, 2014).



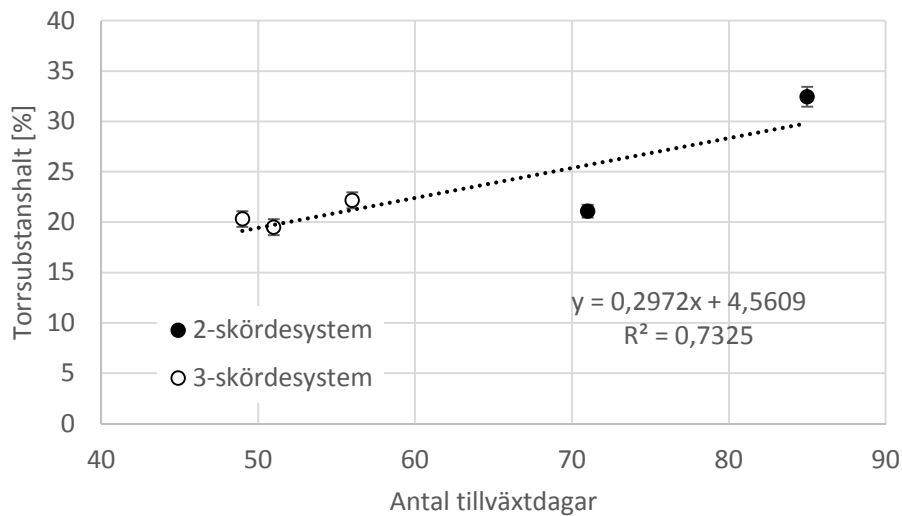
Figur 5. Biomassaavkastning för vete som helsäd vid tre olika skördetidpunkter. Staplar med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0,05$). Datumet avser skördetidpunkt. Felstaplar visar medelfelet.

3.2 Torrsubstanshalt

3.2.1 Vall

Torrsubstanshalten i handskördad vall var genomgående låg i 3-skördesystemet, ca 20 % (Figur 6). I 2-skördesystemet hade biomassan vid andra skörden en relativt hög TS-halt, ca 32 %. Enligt vallprognosen började tillväxten i Helsingborg den 26 mars (Spörndly, 2015), men de kalla lerjordarna på Wrams Gunnarstorp brukar ha en fördröjd tillväxtstart på ca 3 veckor. Antar man därför den 15 april som startdatum för tillväxten kan man räkna fram antalet tillväxtdagar för

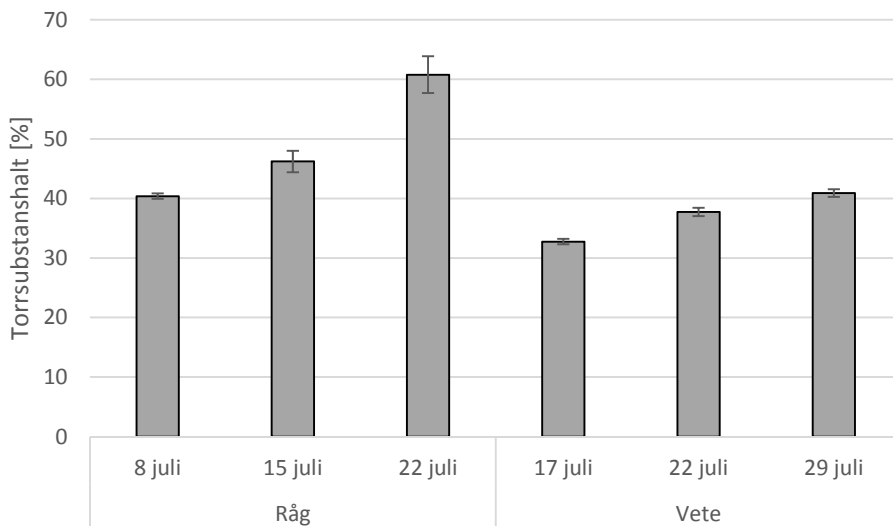
varje skördetillfälle. Undersöker man relationen mellan tillväxtperioden och TS-halt ser man ett samband. Biomassan vid andra skördetillfället i 2-skördesystemet har haft en betydligt längre tillväxtperiod jämfört med första skörden och de tre skördarna i 3-skördesystemet.



Figur 6. Torrsubstanshalt i medel för varje skördetillfälle för vall i relation till antal tillväxtdagar (tillväxtstart på våren antagen till den 15 april). Felstaplar visar medelfelet.

3.2.2 Helsäd

Torrsubstanshalten i biomassaproverna av helsäd visade mycket höga TS-halter för råg och låg över de halter som är normala vid ensilering i plansilo (Figur 7).



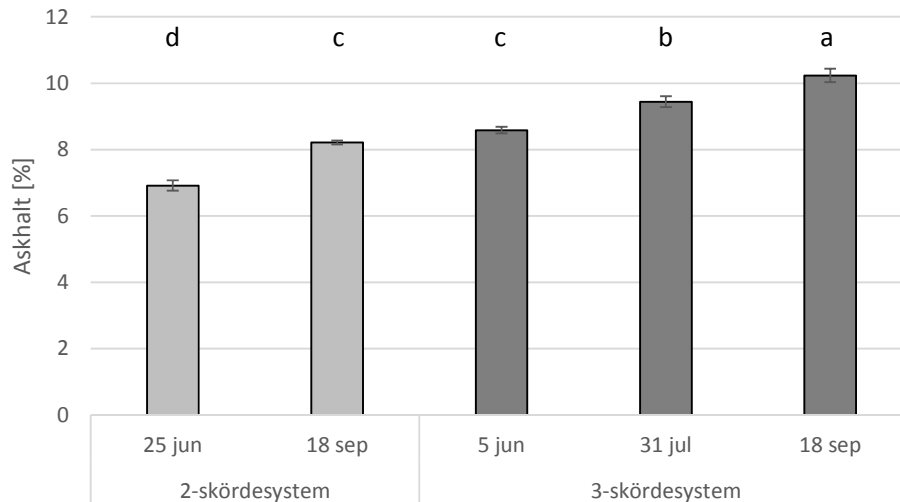
Figur 7. Torrsubstanshalt för helsäd vid olika skördetidpunkter. Felstaplar visar medelfelet.

Redan vid första skördetillfället var TS-halten hög och nådde över 60 % vid sista skördetillfället. Torrsubstanshalterna för vete ökade endast i mindre omfattning och låg i intervallet 33-41% vid alla skördetidpunkter.

3.3 Askhalt

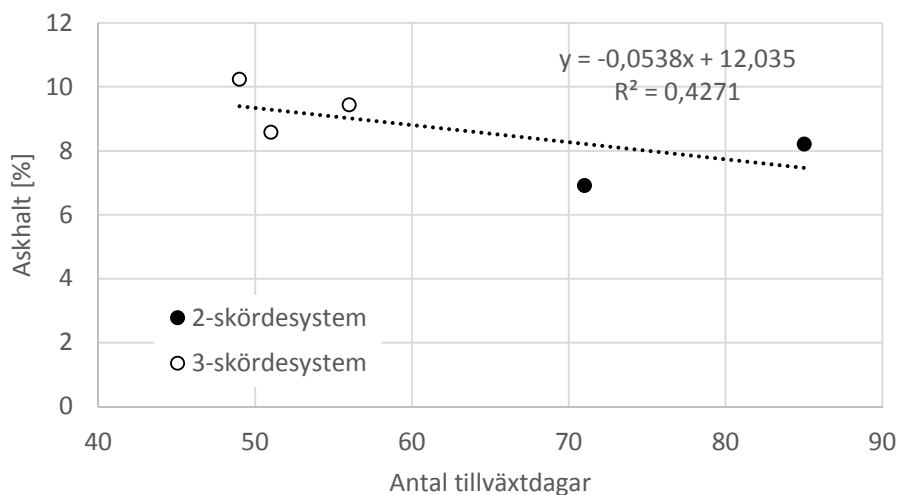
3.3.1 Vall

Askhalten i vallens biomassa steg med senare skördetillfälle (Figur 8). I 3-skördesystemet var askhalten högre, i snitt 9,4 %, jämfört med 2-skördesystemet, där askhalten var i snitt 7,6 %.



Figur 8. Askhalt i vall vid olika skördetidpunkter i 2- och 3-skördesystemet. Staplar med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0,05$). Felstaplar visar medelfelet.

Antar man den 15 april som startdatum för tillväxten kan man räkna fram antalet tillväxtdagar för varje skördetillfälle. Figur 9 visar hur askhalten av vallen minskar med stigande antal tillväxtdagar.



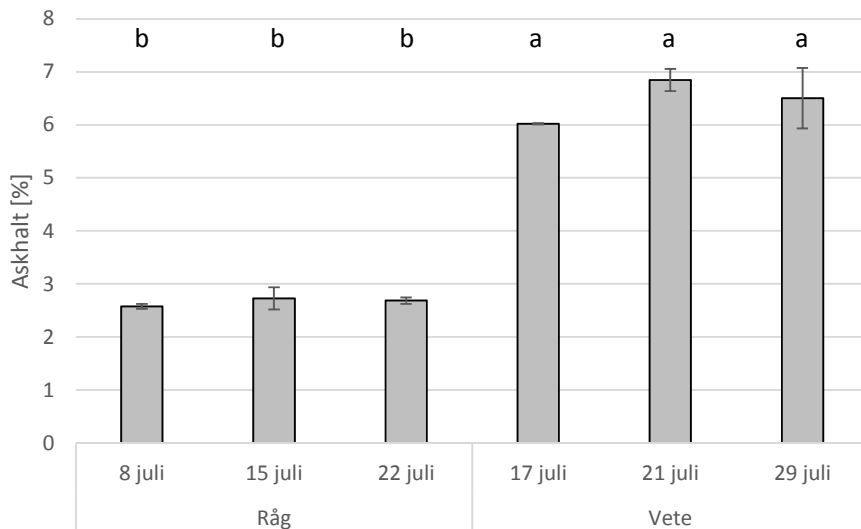
Figur 9. Askhalt i vall i relation till antal tillväxtdagar.

Det har visats tidigare att askhalten i vallgräs och baljväxter sjunker från ca 10 % tidigt under växtutvecklingen till ca 7-8 % vid full blomning (Fogelfors, 2001). Detta är ofta en utspädningseffekt, eftersom tillväxten av organiskt material överstiger upptaget av mineraler (Oehmichen *m fl.*, 2006). Detta medför en mer omfattande bortförsel av kalium, magnesium och fosfor vid ett tidigare utvecklingsstadium. Förutom en viss merkostnad för substrathanteringen och rötningen innebär detta en bättre gödseffekt när rötresten används

som gödselmedel. Den låga variationen i askhalt tyder på att effekten inte är orsakad av nedsmutsning av växtmaterialet med jordpartiklar.

3.3.2 Helsäd

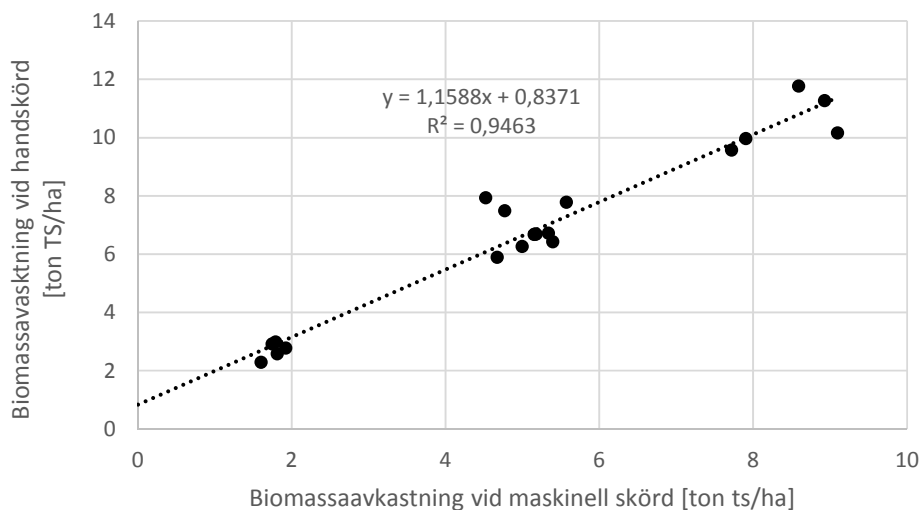
Askhalten i helsädesbiomassa av råg och vete skilde sig signifikant (Figur 10). Medan råg hade en askhalt på i medel 2,7 %, hade vete en mycket högre askhalt på 6,5 %. Skillnaderna mellan skördetidpunkterna var dock mycket liten. Den högre askhalten i vete kunde vara orsakad av en annan jordsammansättning på försöksfältet (t.ex. en högre lerhalt), men är troligen orsakad av föroreningar av växtmaterialet med jordpartiklar och anses därför inte vara en generell skillnad mellan råg och vete.



Figur 10. Askhalt för helsäd vid olika skördetidpunkter.

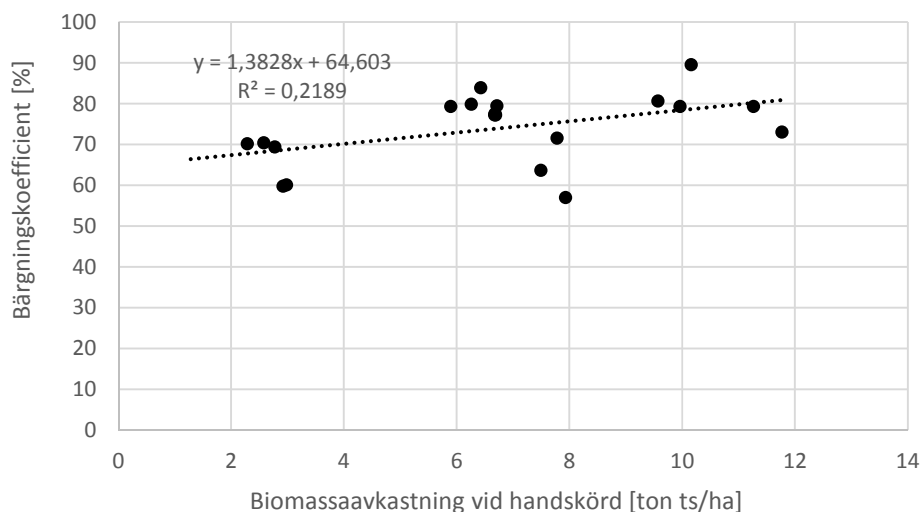
3.4 Skördeförluster

Det finns en stark relation mellan biomassaavkastningen för vall baserad på handskörd och biomassaavkastningen baserad på maskinell skörd (Figur 11). Biomassaförluster i form av högre stubb vid maskinskörd ligger runt 0,8 ton TS/ha, vilket visas av skärningspunkten av regressionslinjen med lodräta y-axeln. Vid maskinell skörd är biomassaavkastningen ytterligare ca 16 % lägre jämfört med handskörden, vilket visas av linjens lutning (Figur 11). Anledningen till detta är förmodligen att denna andel biomassa inte plockas upp från strängen av pick-upen vid hackningen.



Figur 11. Relation mellan biomassaavkastningen (ton TS/ha) av vall baserad på handskörd och biomassaavkastningen baserad på maskinell skörd.

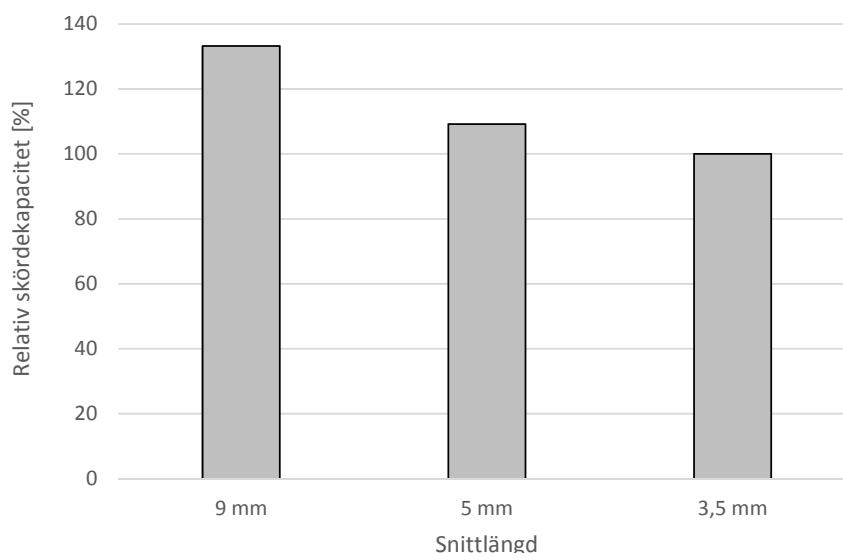
Utifrån dessa uppgifter kan bärgningskoefficienten beräknas. Bärgningskoefficienten varierar mellan ca 65 % vid låga skördar och ca 80 % vid höga skördar av vall (Figur 12).



Figur 12. Effekten av biomasmängden mätt genom handskörd på bärgningskoefficienten.

3.5 Relativ skördekapacitet

Den relativa skördekapaciteten av exakthacken vid skörd av helsäd definierades som 100 % för 3,5 mm-snittlängden (Figur 13). En ökning i snittlängdsinställningen från 3,5 mm till 5 mm respektive till 9 mm ledde till en ökning av skördekapaciteten med 9 respektive 33 %.

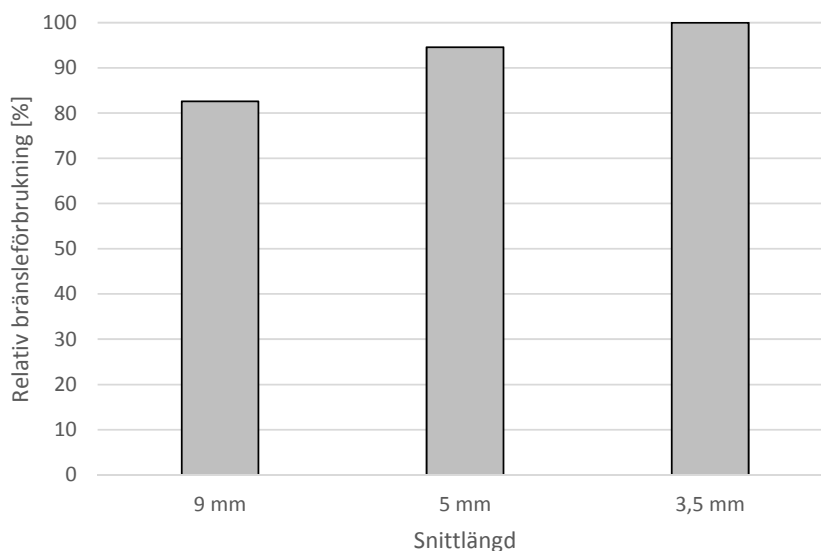


Figur 13. Relativ skördekapacitet (%) vid hackning av helsäd (rågvete). Med olika inställningar för snittlängden var kapaciteten vid 3,5 mm snittlängdsinställning satt till 100 %. Medelavkastningen för rågvete låg på 44 ton våtvikt per hektar i försöksfältet.

En dansk studie noterade kapacitetsökningar för självgående exakthackar från 10 till 50 % när man ändrade snittlängdsinställningen från 4 till 9 mm (Hedegaard *m.fl.*, 2003).

3.6 Relativ dieselförbrukning

Den relativa dieselförbrukningen hos exakthacken vid skörd av rågvete (helsäd) definierades som 100 % för 3,5 mm-snittlängd (Figur 13). Ökades snittlängden så minskade dieselförbrukningen. En ökning till 5 mm respektive 9 mm ledde till en minskning av dieselförbrukningen med 5 respektive 17 %, vid en medelavkastning på 44 ton våtvikt per hektar.



Figur 14. Relativ bränsleförbrukning vid hackning av helsäd (rågvete) med olika inställningar för snittlängden. Medelavkastningen för rågvete låg på 44 ton/ha i försöksfältet.

3.7 Transportdensitet

Det fanns ingen skillnad i transportdensitet för helsäd av rågvete mellan olika snittlängdsinställningar. I medeltal var densiteten av det hackade materialet runt 0,3 ton per m³. Detta är i samma nivå som rapporterades tidigare (Herrmann *m fl.*, 2012).

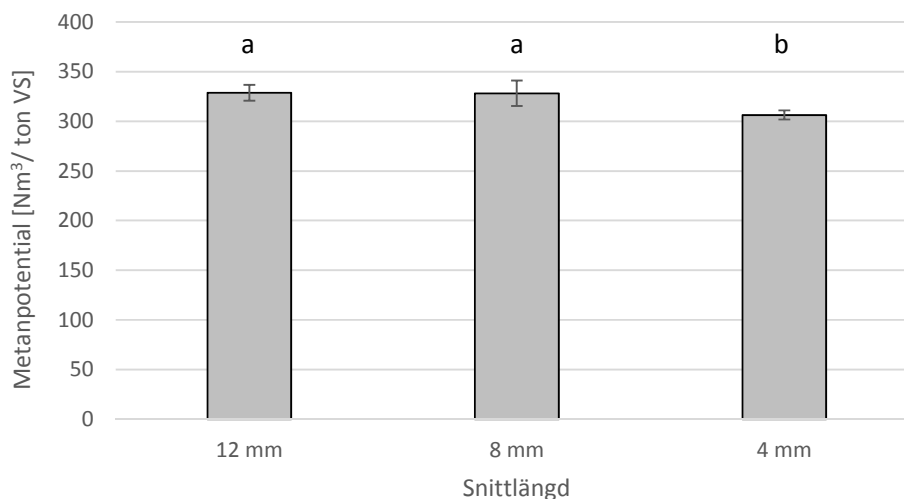
3.8 Ensileringsförluster

Ensileringsförlusterna i vallproven vid labbförsöken var små, i medeltal 2,3 % av biomassans energipotential. Den maximala förlusten var 4,9 %. Ensileringsförlusterna i helsäd var väldigt små, i medeltal 0,6 % av energipotentialen. Den maximala förlusten här var 1,4 %. Dessa förluster kan anses motsvara den delen av energin som omsätts vid själva ensileringsprocessen, eftersom mätmetoden effektivt utesluter syre (nära 100 %). Ensileras biomassan i plansilo tillkommer förluster som orsakas av aerob nedbrytning av biomassan.

3.9 Metanpotential

3.9.1 Snittlängd i vall

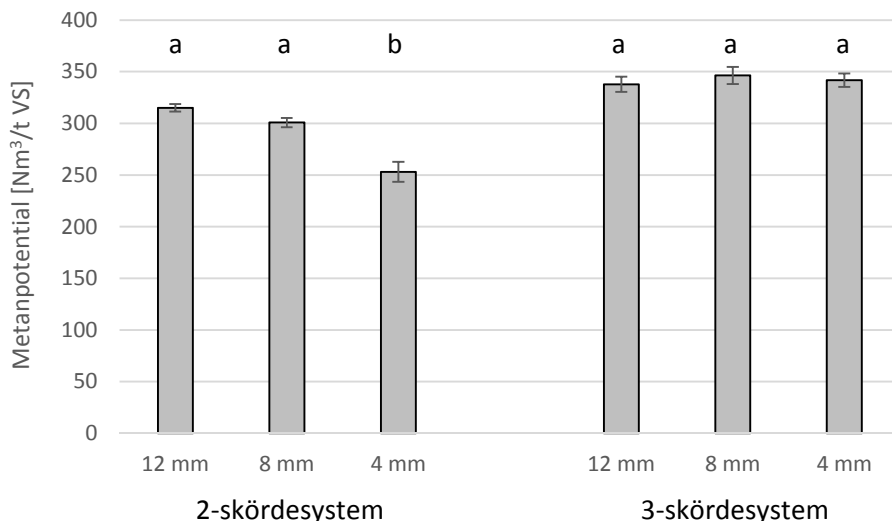
Snittlängden påverkade metanpotentialen hos vall signifikant (Figur 15). Vall hackad vid 8- respektive 12 mm-inställning hade en metanpotential på 330±5 Nm³/ton VS. Denna var 12 % högre än vall hackad vid 4 mm-inställningen (300±13 Nm³/ton VS).



Figur 15. Metanpotential för vall vid olika snittlängdsinställningar på exakthacken för både 2- och 3-skördesystemet. Staplar med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0,05$). Felstaplar avser medelfelet.

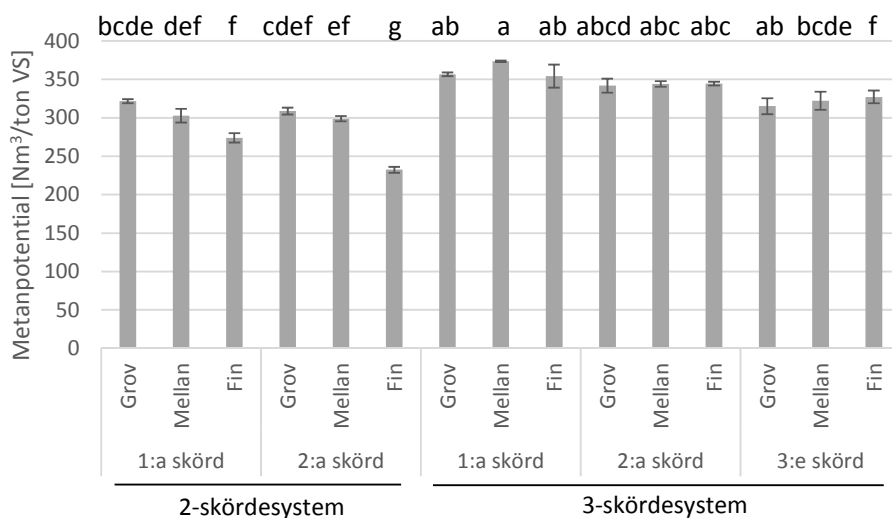
En ökning av metanpotentialen vid längre snittlängd bekräftas av en finländsk studie som hittade en metanpotential på 320 Nm³/ton VS vid en snittlängd på 5 mm och en metanpotential på 350 Nm³/ton VS vid en snittlängd på 10 mm (Kaparaju *m fl.*, 2002). En ytterligare ökning av snittlängden till 20 mm resulterade dock i en minskning av metanpotentialen till 270 Nm³/ton VS.

Studeras varje skördesystem för sig (två eller tre skördar per år) så ser bilden likadan ut för 2-skördesystemet. Däremot hittades ingen statistisk skillnad mellan snittlängderna i 3-skördesystemet (Figur 16).



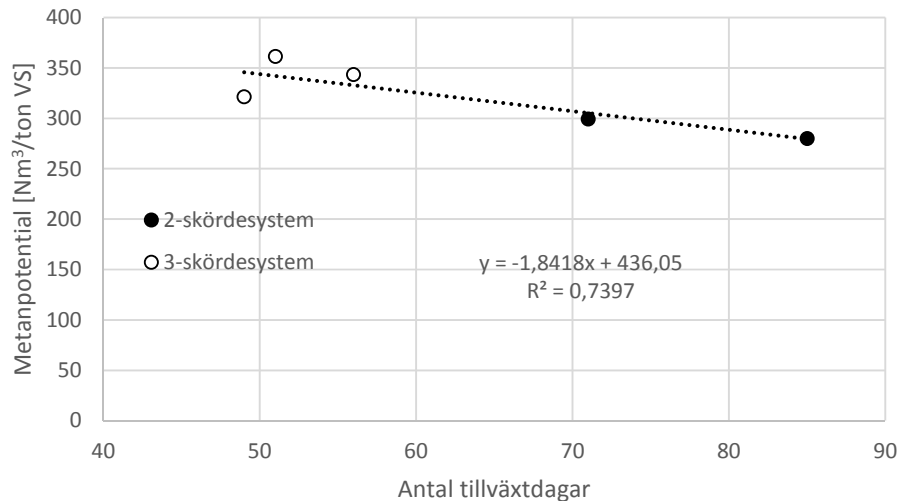
Figur 16. Metanpotential hos vall vid olika snittlängdsinställningar på exakthacken. Staplar med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0,05$), varje skördesystem för sig. Felstaplar avser medelfelet.

*Fin*hackad vall i 2-skördesystemet hade lägst metanpotential jämfört med *mellan*- eller *grov*hackad vall, även när man analyserar varje skördetillfälle för sig (Figur 17). I 3-skördesystemet hittades ingen skillnad för metanpotential vid olika snittlängder för 1:a och 2:a skörden. Vid 3:e skörden hittades en signifikant lägre metanpotential vid *fin*hackning.



Figur 17. Metanpotential hos vall vid olika snittlängdsinställningar på exakthacken, varje skördetillfälle för sig. Staplar med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra. Felstaplar avser medelfelet.

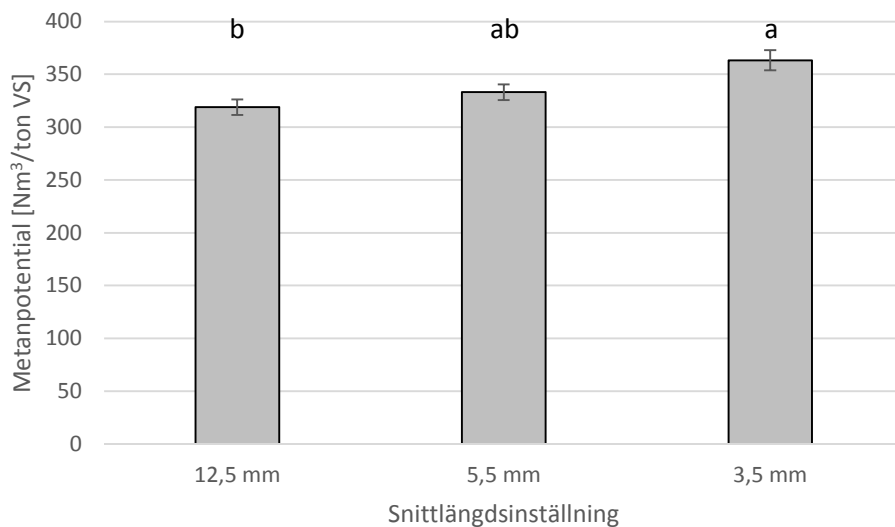
Antar man den 15 april som startdatum för tillväxten kan man räkna fram antalet tillväxtdagar för varje skördetillfälle. Figur 18 visar hur metanpotentialen hos vällen minskar med stigande antal tillväxtdagar.



Figur 18. Effekt av antalet tillväxtdagar i vall på metanpotentialen.

3.9.2 Snittlängd i helsäd

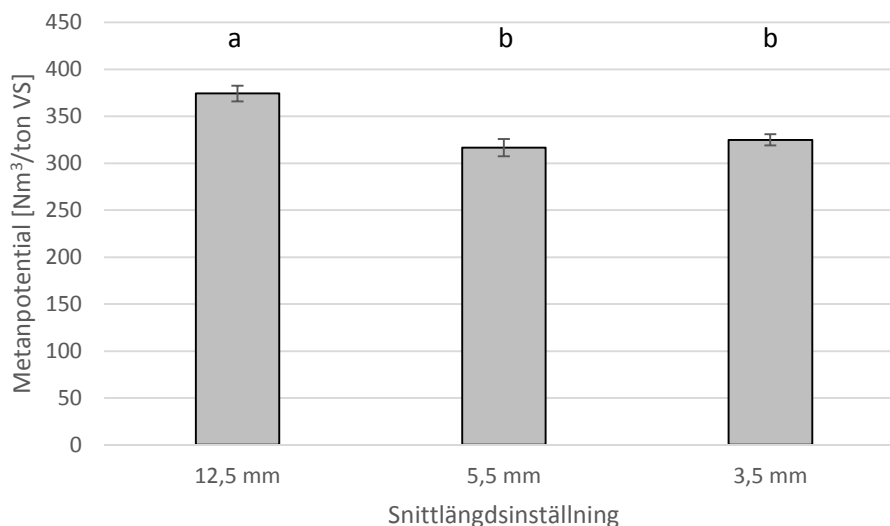
Snittlängden påverkade metanpotentialen av råg skördad som helsäd signifikant (Figur 19). Råg hackad vid 3,5 mm-inställningen hade en metanpotential på 360 ± 9 Nm³/ton VS. Denna var 12 % högre än råg hackad vid 12,5 mm-inställningen (320 ± 7 Nm³/ton VS).



Figur 19. Metanpotential för råg som helsäd vid olika snittlängdsinställningar på exakthacken. Staplar med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0,05$). Felstaplar avser medelfelet.

En ökning av metanpotentialen för råg skördad som helsäd vid kortare snittlängd bekräftas i en labbstudie av en tysk studie som hittade en metanpotential på 320 Nm³/ton VS vid en snittlängd på 16 mm och en metanpotential på 360 Nm³/ton VS vid en snittlängd på 4 mm (Herrmann *m fl.*, 2012). Samma studie visade också en signifikant högre metanpotential vid 6,8 mm snittlängdsinställning (336 Nm³/ton VS) jämfört med en lägre metanpotential vid 11 mm snittlängdsinställning (308 Nm³/ton VS) där biomassan hackades av en självgående exakthack. Dessa signifikanta skillnader erhöles för en rågsort vid begynnande blomning, medan för två andra sorter och andra växtutvecklingsstadier visades inga signifikant skillnader. Dessa utvecklingsstadier motsvarar dock en betydligt tidigare skörd än vad som testades i vår studie.

Snittlängden hade signifikant påverkan på metanpotentialen för vete som helsäd (Figur 20). Vete hackad vid 3,5 och 5,5 mm-inställning hade en metanpotential på 320 ± 5 $\text{Nm}^3/\text{ton VS}$. Denna var 14 % lägre än vete hackad vid 12,5 mm-inställningen (370 ± 8 $\text{Nm}^3/\text{ton VS}$). Det är oklart vad som orsakar den lägre metanpotentialen för *mellan-* och *finhackad* vete. Resultatet bekräftas dock genom metanpotentialanalyserna av *grovhackad* vete vid olika skördetidpunkter (Figur 23), som visar en genomgående hög metanpotential, i medeltal 350 ± 9 $\text{Nm}^3/\text{ton VS}$.

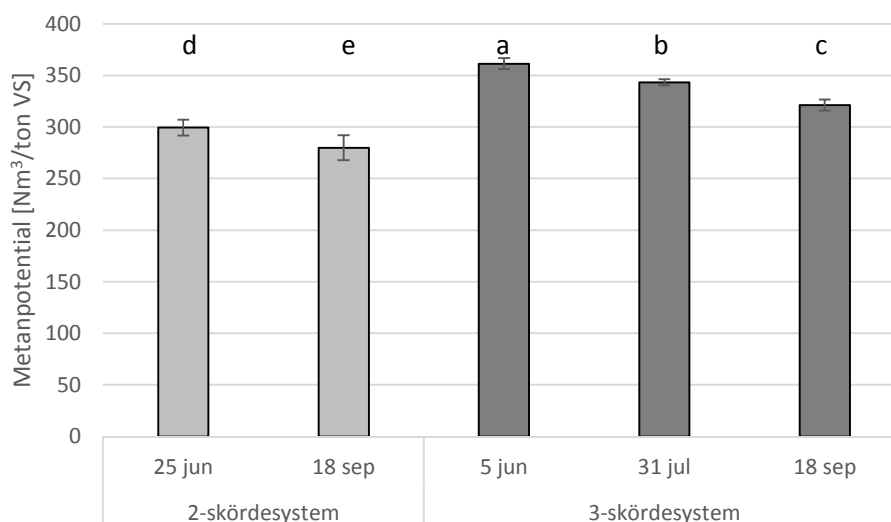


Figur 20. Metanpotential för vete som helsäd vid olika snittlängdsinställningar på exakthacken. Staplar med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0,05$). Felstaplar avser medelfelet.

Det finns ingen studie som har undersökt effekten av snittlängden på metanpotentialen av vete skördad som helsäd. I labbförsök visade Herrmann *et al.* (2012) en metanpotential för rågvete som ökade signifikant från 300 till 330 $\text{Nm}^3/\text{ton VS}$, när snittlängden minskades från 16 till 4 mm. Vid hackning av rågvete med en självgående exakthack visades en signifikant ökning av metanpotentialen från 335 till 351 $\text{Nm}^3/\text{ton VS}$, när snittlängden minskades från 8 till 4 mm vid degmognad i sorten Grenado, men inte vid mjölmognad i sorten Talentro (Herrmann *m fl.*, 2012).

3.9.3 Antal skördar i vall

Antalet skördar per år påverkade metanpotentialen hos vall signifikant (Figur 21). Vall skördad i 3-skördesystemet hade en metanpotential på 340 ± 5 $\text{Nm}^3/\text{ton VS}$ som var 18 % högre än vall skördad i 2-skördesystemet (290 ± 7 $\text{Nm}^3/\text{ton VS}$). I både 2- och 3-skördesystemet minskade metanpotentialen per ton VS signifikant från en skörd till nästa. Minskningen av metanpotentialen från första till andra skörd i 2-skördesystemet, från första till andra skörd i 3-skördesystemet respektive från andra till tredje skörd i 3-skördesystemet var 6, 5 respektive 7 %.



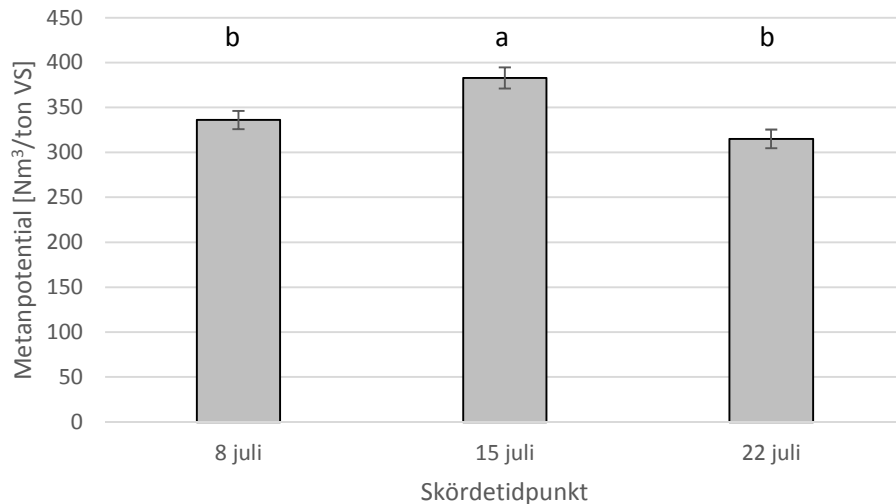
Figur 21. Metanpotential för vall vid olika skördetidpunkter och antal skördar per år. Staplar med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0,05$). Felstaplar avser medelfelet.

Metanpotentialen för 2-skördesystemet ligger i samma nivå som tidigare studier visade för vall på marginalmark, där första skörden och andra skörden resulterade i en metanpotential på 290-300 respektive 245-270 Nm³/ton VS (Seppälä *m fl.*, 2009, Särholm, 2011, Gissén *m fl.*, 2014, Prade *m fl.*, 2014). Vall från permanent gräsmark resulterade i en metanpotential på 320-360, 190-270 och 190-240 Nm³/ton VS för skörd 1,2 respektive 3 (Amon *m fl.*, 2007). Den med biomassaavkastningen viktade metanpotentialen var då i snitt 270 och 300 Nm³/ton VS för en tidig respektive sen första skörd. Vall skördat 4 gånger per år visade en metanpotential på i snitt 280 Nm³/ton VS, ökade metanpotentialen alltså inte ytterligare.

3.9.4 Skördetidpunkter i helsäd

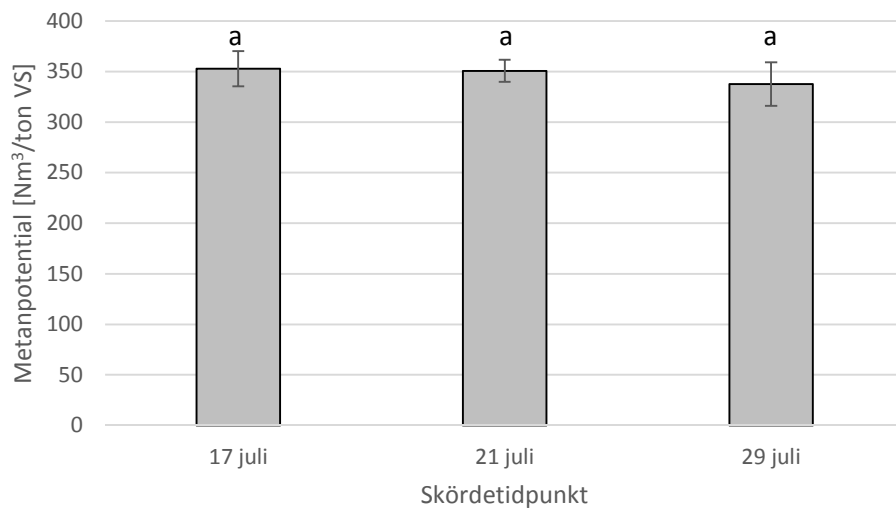
Metanpotentialen hos råg som helsäd var signifikant högre vid skörd den 15 juli, 380 ± 12 Nm³/ton VS (tidig degmognad), jämfört med skörd den 8 eller 22 juli (sen mjölmognad respektive sen degmognad), då den var 330 ± 8 Nm³/ton VS (Figur 22).

Att metanpotentialen hos råg ligger i samma nivå som hos vete (se nedan) tyder på att metanpotentialen uppenbarligen inte påverkades av de höga TS-halterna för råg (40-61 %). En tidigare studie har visat att metanpotentialen av råg fortfarande stiger från utvecklingsfasen mjölmognad, 243 Nm³/ton VS, till komplett mogenhet, 275 Nm³/ton VS (Amon *m fl.*, 2007). En annan studie hittade dock ett optimum vid mjölmognad (Heiermann *m fl.*, 2009).



Figur 22. Metanpotential för råg som helsäd vid olika skördetidpunkter. Staplar med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0,05$). Felstaplar avser medelfelet.

Metanpotentialen av vete som helsäd för olika skördetidpunkter låg på 350 ± 9 Nm³/ton VS (Figur 23). En tidigare studie visade inte heller någon statistisk skillnad i metanpotential för vete i utvecklingsfasen mjölkmodnad, degmodnad och komplett mogenhet, dock var metanpotentialen mycket lägre, 228-251 Nm³/ton VS, för två olika vetesorter (Amon *m fl.*, 2007). En annan studie visade allmänt högre metanpotentialer för vete som helsäd, som dock minskade från utvecklingsfasen mjölkmodnad, 360 Nm³/ton VS, till degmodnad, 346 Nm³/ton VS (Rincón *m fl.*, 2010).



Figur 23. Metanpotential för vete som helsäd vid olika skördetidpunkter. Staplar med olika bokstäver är signifikant skilda från varandra ($p < 0,05$). Felstaplar avser medelfelet.

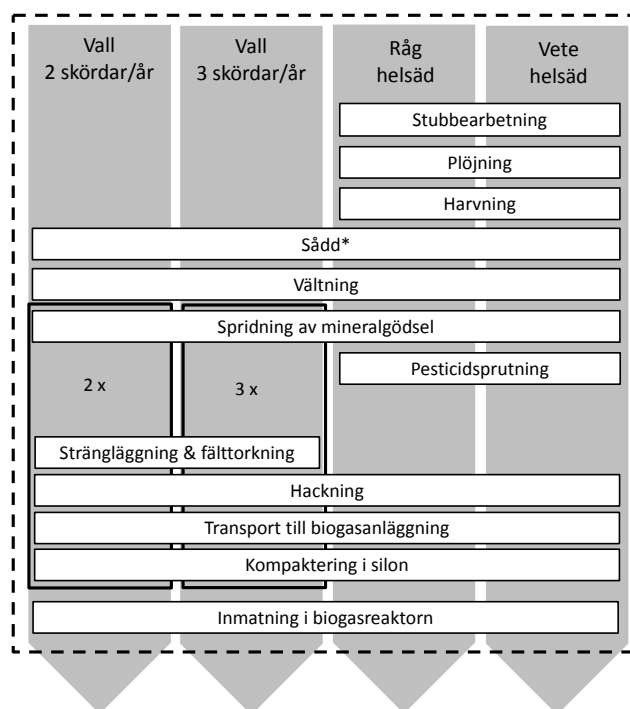
4 Systemstudie – metodik

En systemstudie genomfördes för att utvärdera effekter av snittlängd och skördesystem respektive skördetidpunkt på energibalans och substratkostnad för vall och helsäd som biogassubstrat. Denna systemstudie baserades på provresultat från fältstudierna i detta projekt, kompletterade med litteraturuppgifter för odlings- och rötningskostnader. Uppgifter från litteraturen användes även, tillsammans med data från denna studie, för beräkning av energibalansen. Metoden följer standarden för livscykelanalys (ISO, 2006).

4.1 Odling av vall och helsäd

4.1.1 Odlingstidpunkt

Odlingen av vall och helsäd i systemstudien följer de betingelser som har undersökts i fältstudien och omfattar samma arbetsmoment (Figur 24).



Figur 24. Flödesschema över arbetsmoment för varje gröda som finns med i energibalansen och i de ekonomiska beräkningarna.

4.1.2 Utsädesmängd

Utsädesmängden för helsädesproduktion antogs vara samma som vid foderproduktion av vete, 180 kg/ha (SJV, 2014). Utsädesmängden för vall antogs vara samma som vid slåttervallsproduktion vid insådd i skyddsgröda, 7 kg/ha (SJV, 2014).

4.1.3 Gödselmedel

Mängden mineralkväve beräknades som en grundgiva (45 kg/ha för vall och 15 kg/ha för helsäd) samt en skörde-relaterad giva (1,5 % för vall och 1,3 % för helsäd, beräknad på mängden bortförd torrsubstans).

Gödslingsmängder av fosfor (P) och kalium (K) för vall och helsäd beräknades från mängden näring bortförd med skörden. Bortfört P och K beräknades utifrån biomassabortförelsen (avkastning) samt näringsinnehållet i biomassan (Tabell 5). Beräknad mängd K som ersätts, har dock reducerats med 80 kg/ha, eftersom en stor del skånska lerjordar har en tillförsel från vittring av lermineralen, som är i samma storleksordning (Heimer, 2004). All gödsling antas sker med mineralgödsel.

Tabell 5. Näringsammansättning av skördad biomassa enligt Jordbruksverkets produktlista (SJV, 2010)

Gröda	Näringsinnehåll	
	P [% av TS]	K [% av TS]
Vall	0,22	2,10
Råg, vete (helsäd)	0,30	2,43

De beräknade mineralgödselgivorna som används i systemstudien redovisas i Tabell 6.

Tabell 6. Gödselmängder och tillhörande biomassavkastning för vall respektive helsäd som används i systemstudien

Gröda	Gödning		
	N [kg/ha]	P [kg/ha]	K [kg/ha]
Vall			
2 skördar per år	235	28	186
3 skördar per år	228	27	176
Råg			
Tidigt	173	31	175
Medium, sent	173	36	215
Vete			
Tidigt, medium, sent	173	36	215

4.2 Skörd av biomassa

Helsäd hackas direkt stående på rot, medan vallen slås av och läggs i sträng. Strängarna fälttorkas till en TS-halt av 35 %. En gemensam hacknings- och transportmodell används för att räkna på dieselförbrukning och tidsåtgång vid skörd av helsäd och vall. Det antas att hackningen genomförs med en självgående exackhack (Tabell 7). Användning av de olika snittlängdsinställningarna som testades i fältförsöken simuleras i systemstudien. Den hackade biomassan ”blåses” över till traktordragna följevagnar som transporterade substratet till biogasanläggningen, där biomassan ensilerades i plansilo.

Tabell 7. Maskinkombination som används för att beräkna kapaciteten och dieselanvändningen för skörd av vall respektive helsäd

Arbetsmoment	Maskin	Arbetsbredd
Vall		
Avslagning och strängläggning	Traktormonterat rotorslätteraggregat (t.ex. Pöttinger Novacat X8)	8,3 m, avslagen biomassa läggs i en sträng
Hackning	Självgående exakthack (t.ex. Claas Jaguar 980) med pickup	8,3 m, (stränglagd arbetsbredd)
Helsäd		
Hackning	Självgående exakthack (t.ex. Claas Jaguar 980) med helsädesbord	5,8 m (effektiv)

Kapacitet och dieselförbrukning för maskinerna vid strängläggning av vall, hackning av vall och helsäd samt transport av substraten till biogasanläggningen har beräknats utifrån följande beräkningsmodeller:

4.2.1 Strängläggning av vall - Areakapacitet

Modellen för strängläggning av vall baseras på ett traktormonterat slätteraggregat som har en arbetsbredd på 8,3 m. All avslagen biomassa från denna bredd sammanförs till en sträng inför fälttorkningen. Modellen för beräkning av kapaciteten för strängläggning utgår från en maximal körhastighet [km/h] och en maximal biomassakapacitet [ton/h] som kan läggas i sträng. Vid lågt biomassabestånd körs maskinen på maximal hastighet utan att kapaciteten utnyttjas fullständigt. Vid en högre beståndstäthet nås kapacitetstaket och hastigheten sjunker. Utgående från hastigheten och arbetsbredden beräknas bruttoarealkapaciteten:

$$\text{Bruttoarealkapacitet} \left[\frac{\text{ha}}{\text{h}} \right] = \frac{\text{Körhastighet} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \cdot 1000 \cdot \text{Arbetsbredd} [\text{m}]}{10000}$$

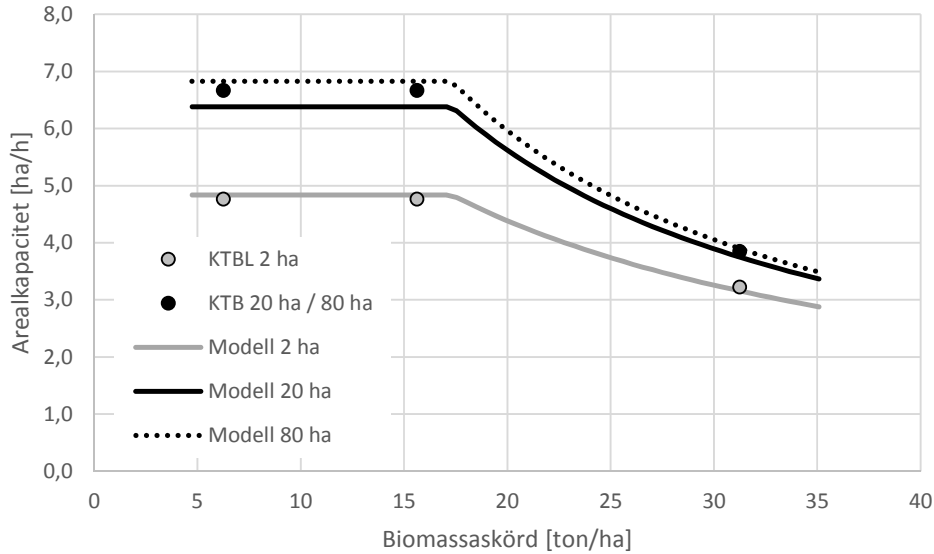
Den effektiva arealkapaciteten justerades med tiden för vändning av ekipaget efter varje skördedrag:

$$\begin{aligned} \text{Areakapacitet}_{\text{effektiv}} \left[\frac{\text{ha}}{\text{h}} \right] \\ = \text{Bruttoarealkapacitet} \left[\frac{\text{ha}}{\text{h}} \right] + \frac{3600}{\text{Vändningar} \left[\frac{1}{\text{ha}} \right] \cdot \text{Vändningstid} [\text{s}]} \end{aligned}$$

Modellen för arealkapacitet har kalibrerats mot data från KTBL (2005) genom att anpassa den maximala körhastigheten, den maximala biomassakapaciteten samt tiden för vändning på vändtegen (Tabell 8).

Tabell 8. Parametrar som optimerats för kalibreringen av modellen för beräkning av den effektiva arealkapaciteten vid strängläggning av vall. Värdena har avrundats

Parameter	Enhet	Optimerat värde
Körhastighet, maximal	[km/h]	9
Biomassakapacitet, max	[ton/h]	130
Vändningstid	[s]	36
Fältgeometri	[bredd:längd]	1:2



Figur 25. Resultat från modelleringen av arealkapaciteten vid avslagning och strängläggning av vall. Korrelationskoefficienten mellan KTBLs kapacitetsdata och modellen var 0,99, vilken betyder att modellen kan användas för att beräkna interpolerade värden.

Resultatet av kalibreringen visar ett oberoende från biomassaavkastningen upp till ca 17,5 ton/ha (Figur 25). Vid biomassaavkastningar över 17,5 ton/ha nås den maximala skördekapaciteten [ton/h] och körhastigheten samt arealkapaciteten sjunker.

4.2.2 Strängläggning av vall - Dieselförbrukning

Modellen för beräkning av dieselförbrukning utgår från att dieselförbrukningen är en summa av förbrukning vid körning av maskinen [L/h] och av förbrukning vid avslagning och strängläggning av biomassan [L/ton]. Beräkning av den areal-relaterade dieselförbrukningen gjordes enligt:

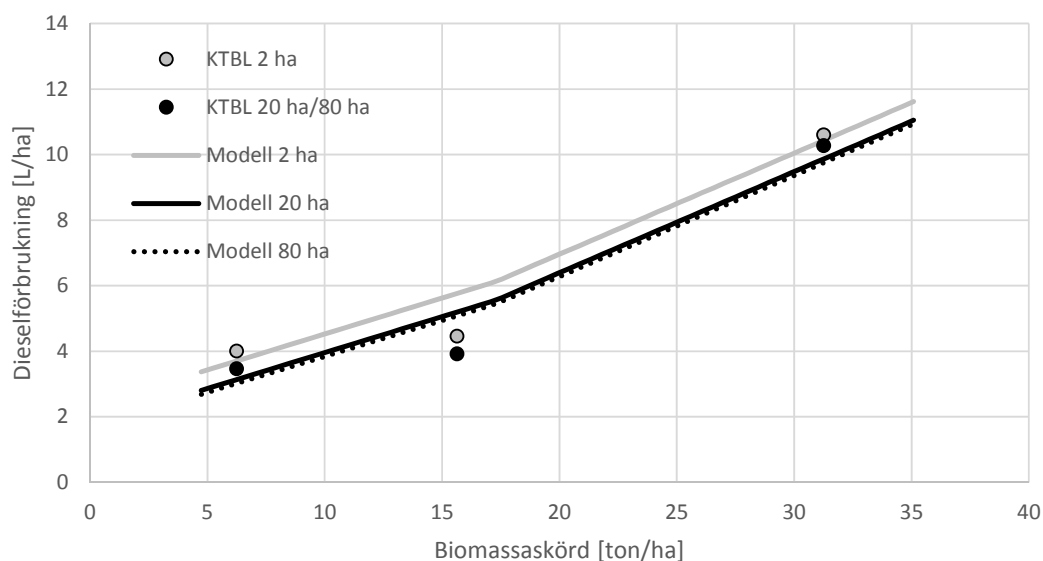
$$\begin{aligned}
 \text{Dieselförbrukning} \left[\frac{L}{ha} \right] &= \frac{\text{Dieselförbrukning}_{\text{körning}} \left[\frac{L}{h} \right]}{\text{Areakapacitet}_{\text{effektiv}} \left[\frac{ha}{h} \right]} + \text{Dieselförbrukning} \left[\frac{L}{ton} \right] \\
 &\cdot \text{Biomassaskörd} \left[\frac{ton}{ha} \right]
 \end{aligned}$$

Modellen för arealkapaciteten har kalibrerats mot data från KTBL (2005) genom att anpassa dieselförbrukningen (a) vid körning samt (b) vid avslagning och strängläggning (Tabell 9).

Tabell 9. Parametrar som optimerats för kalibreringen av modellen för beräkning av dieselförbrukningen vid strängläggning av vall. Värdena har avrundats

Parameter	Enhet	Optimerat värde
Dieselförbrukning, körning	[L/h]	11,3
Dieselförbrukning, avslagning och strängläggning	[L/ton]	0,22

Dieselförbrukningen vid avslagning och strängläggning av vall stiger linjärt med stigande biomassaskörd (Figur 26). Överstiger den avslagna och stränglagda biomassan ca 17,5 ton/ha nås kapaciteten för maskinen och hastigheten måste sänkas, vilket betyder en högre dieselförbrukning per hektar.



Figur 26. Resultat från modelleringen av dieselförbrukningen vid avslagning och strängläggning av vall. Korrelationskoefficienten mellan KTBL:s kapacitetsdata och modellen var 0,94, vilken betyder att modellen kan användas för att beräkna interpolerade värden.

Modellen har kalibrerats med data för fältstorlek på 2, 20 och 80 hektar, men i fortsättningen av studien antas en fältstorlek på 20 ha.

4.2.3 Hackning av vall – Areakapacitet

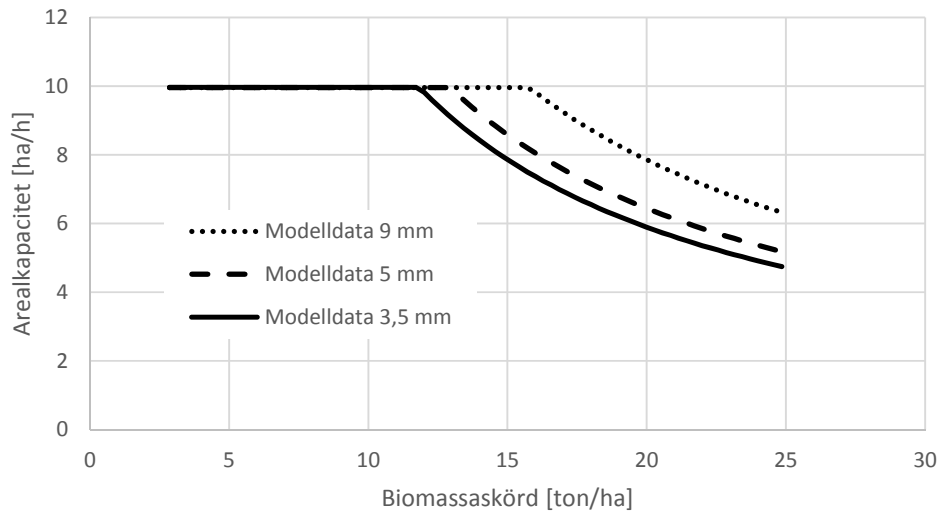
Modellen för hackning av vall baseras på en självgående exakthack (Claas Jaguar 980) med en pick-up som har en nominell arbetsbredd på 3 m. Den effektiva arbetsbredden antas vara 8,3 m, eftersom vallen samlas upp från en sträng som rotorslätteraggregatet har samlat biomassan från en bredd på 8,3 m. Modellen för beräkning av kapaciteten utgår från en körhastighet [km/h], en skördekapacitet på 130 ton/h vid en snittlängdsinställning på 3,5 mm (Hedegaard *m fl.*, 2003) och den snittlängds-specifika korrigeringsfaktorn [%] som beräknades för helsädesskörd i maskinstudien (3.5):

$$\begin{aligned}
 \text{Körhastighet} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] &= \frac{\text{Skördekapacitet}_{\text{snittlängdsspecifik}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] \cdot \text{Korrigeringsfaktor}_{\text{kapacitet}} [\%]}{\text{Biomassaskörd} \left[\frac{\text{ton}}{\text{ha}} \right] \cdot \text{Arbetsbredd} [\text{m}] \cdot 1000 \cdot 100}
 \end{aligned}$$

Vid ett lågt avkastande biomassabestånd körs maskinen på maximal hastighet (12 km/h) utan att kapaciteten utnyttjas fullständigt. Vid en högre avkastning nås kapacitetstaket och hastigheten sjunker. Utgående från hastigheten och arbetsbredden beräknas den effektiva arealkapaciteten:

$$\text{Arealkapacitet}_{\text{effektiv}} \left[\frac{\text{ha}}{\text{h}} \right] = \frac{\text{Körhastighet} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \cdot 1000 \cdot \text{Arbetsbredd} [\text{m}]}{10000}$$

Resultatet av modelleringen visar ett oberoende från biomassaavkastningen upp till ca 15,7, 12,9 och 11,7 ton/ha vid 9, 5, respektive 3,5 mm snittlängdsinställning (Figur 27). Vid biomassaavkastning över dessa brytpunkter nås den maximala skördekapaciteten [ton/h] och körhastigheten samt arealkapaciteten sjunker.



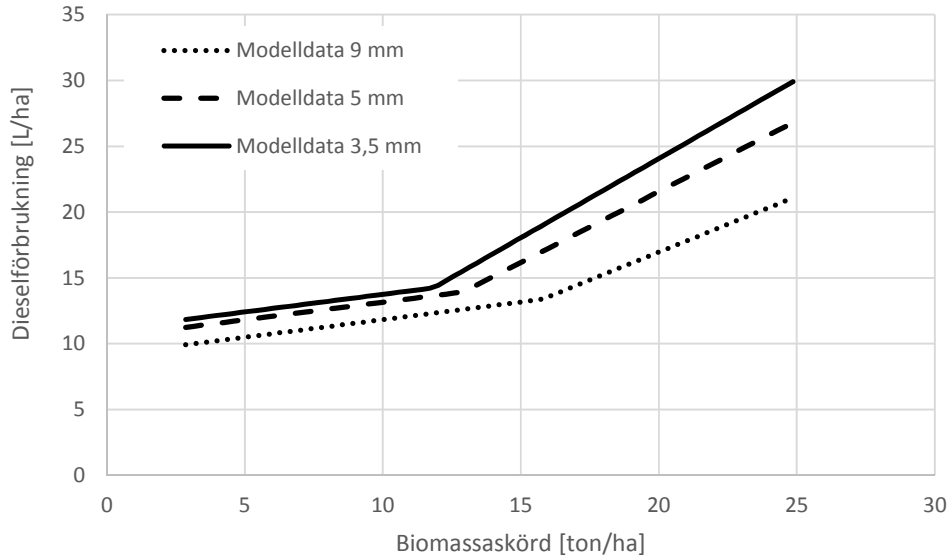
Figur 27. Resultat från modelleringen av arealkapaciteten vid hackning av vall.

4.2.4 Hackning av vall – Dieselförbrukning

Modellen för beräkning av dieselförbrukningen utgår från att dieselförbrukningen är en summa av förbrukningen vid körning av maskinen [L/h] och av förbrukningen vid hackningen av biomassan [L/ton]. Beräkningen av den areal-relaterade dieselförbrukningen gjordes enligt:

$$\begin{aligned} \text{Dieselförbrukning} \left[\frac{\text{L}}{\text{ha}} \right] &= \left(\frac{\text{Dieselförbrukning}_{\text{körning}} \left[\frac{\text{L}}{\text{h}} \right]}{\text{Arealkapacitet}_{\text{effektiv}} \left[\frac{\text{ha}}{\text{h}} \right]} + \text{Dieselförbrukning} \left[\frac{\text{L}}{\text{ton}} \right] \right. \\ &\quad \left. \cdot \text{Biomassaskörd} \left[\frac{\text{ton}}{\text{ha}} \right] \cdot \frac{\text{Korrigeringsfaktor}_{\text{dieselförbrukning}} [\%]}{100} \right) \end{aligned}$$

Den relativa dieselförbrukningen framtagen för helsädesskörd i maskinstudien (0) användes här som korrigeringsfaktor för dieselförbrukningen. Modellen för den areal-relaterade dieselförbrukningen använder sig av värden för dieselförbrukningen (a) vid körning och (b) vid hackning som togs fram i kalibrering för helsädesskörd (Tabell 10; se 4.2.6).



Figur 28. Resultat från modelleringen av dieselförbrukningen vid hackning av vall.

Resultatet av modelleringen visar att dieselförbrukningen stiger sakta med stigande biomassaskörd upp till ca 15,7 ton/ha vid 9 mm snittlängdsinställning, 12,9 ton/ha vid 5 mm snittlängdsinställning och 11,7 ton/ha vid 3,5 mm snittlängdsinställning (Figur 28). Vid biomassaavkastning över dessa brytpunkter nås den maximala skördekapaciteten [ton/h] och dieselförbrukningen stiger kraftigare.

4.2.5 Hacking av helsäd - Areakapacitet

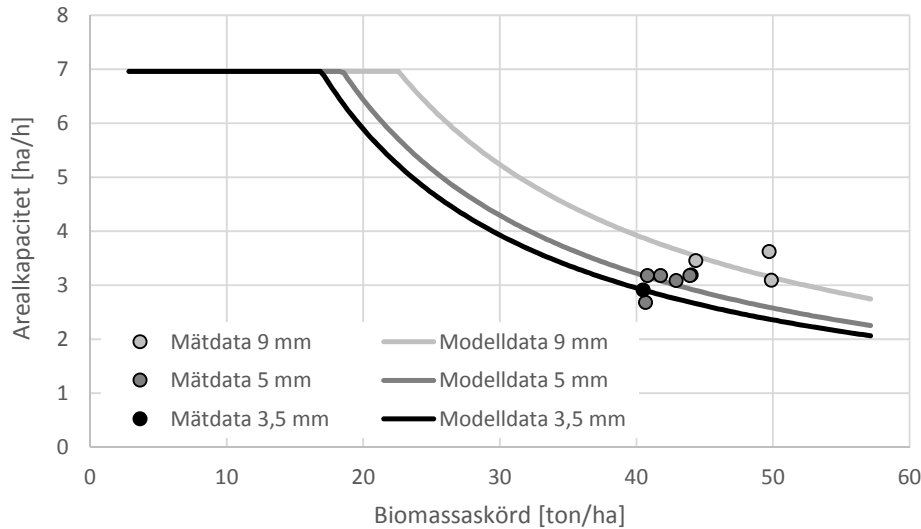
Modellen för hacking av helsäd baseras på en självgående exakthack (Claas Jaguar 980) med ett helsädesbord som har en nominell arbetsbredd på 6,1 m. Den effektiva arbetsbredden antas vara 5,8 m. Modellen för beräkning av kapaciteten utgår från en maximal körhastighet [km/h] och den snittlängds-specifika maximala biomassakapaciteten [ton/h] som beräknades för helsädesskörden i maskinstudien (3.5):

$$\text{Körhastighet} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] = \frac{\text{Biomassakapacitet}_{\text{maximal}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]}{\text{Biomassaskörd} \left[\frac{\text{ton}}{\text{ha}} \right] \cdot \text{Arbetsbredd} [\text{m}] \cdot 1000}$$

Vid lågt avkastande biomassabestånd körs maskinen på maximal hastighet utan att kapaciteten utnyttjas fullständigt. Vid en högre avkastning nås kapacitetstaket och hastigheten sjunker. Utgående från hastigheten och arbetsbredden beräknas den effektiva arealkapaciteten:

$$\text{Areakapacitet}_{\text{effektiv}} \left[\frac{\text{ha}}{\text{h}} \right] = \frac{\text{Körhastighet} \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \cdot 1000 \cdot \text{Arbetsbredd} [\text{m}]}{10000}$$

Eftersom tid för vändningar av ekipaget redan ingick i den maximala biomassakapaciteten, behövs inga fler kalibreringar av modellen.



Figur 29. Resultat från modelleringen av arealkapaciteten vid hackning av helsäd.

Resultatet av modelleringen visar ett oberoende från biomassaavkastningen upp till ca 22,6 ton/ha vid 9 mm snittlängdsinställning, 18,4 ton/ha vid 5 mm snittlängdsinställning och 16,9 ton/ha vid 3,5 mm snittlängdsinställning (Figur 29). Vid biomassaavkastning över dessa brytpunkter nås den maximala skördekapaciteten [ton/h], vilket leder till att körhastigheten och arealkapaciteten sjunker.

4.2.6 Hackning av helsäd - Dieselförbrukning

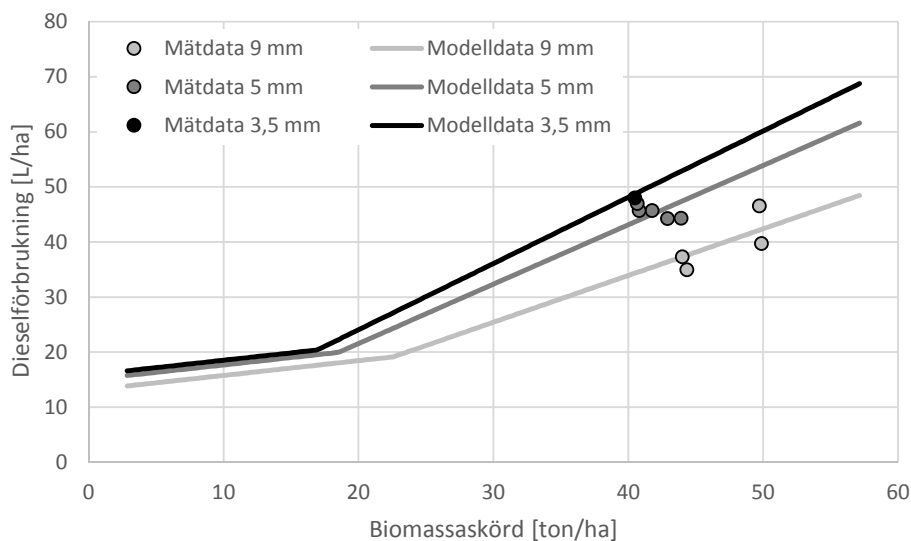
Modellen för beräkning av dieselförbrukningen utgår från att dieselförbrukningen är en summa av förbrukningen vid körning av maskinen [L/h] och av förbrukningen vid hackningen av biomassan [L/ton]. Beräkningen av den areal-relaterade dieselförbrukningen gjordes enligt:

$$\begin{aligned}
 \text{Dieselförbrukning} \left[\frac{L}{ha} \right] &= \left(\frac{\text{Dieselförbrukning}_{\text{körning}} \left[\frac{L}{h} \right]}{\text{Areal kapacitet}_{\text{effektiv}} \left[\frac{ha}{h} \right]} + \text{Dieselförbrukning} \left[\frac{L}{ton} \right] \right. \\
 &\quad \left. \cdot \text{Biomassaskörd} \left[\frac{ton}{ha} \right] \cdot \frac{\text{Korrigeringsfaktor}_{\text{snittlängd}} [\%]}{100} \right)
 \end{aligned}$$

Den relativa dieselförbrukningen från maskinstudien (0) användes här som korrigeringsfaktor för dieselförbrukning. Modellen för den areal-relaterade dieselförbrukningen har kalibrerats mot mätdata från maskinstudien genom att anpassa dieselförbrukningen (a) vid körning och (b) vid hackning (Tabell 10).

Tabell 10. Parametrar som optimerats för kalibreringen av modellen för beräkning av dieselförbrukningen vid hackning av helsäd på rot. Värden har avrundats

Parameter	Enhet	Optimerat värde
Dieselförbrukning, körning	[L/h]	110
Dieselförbrukning, exakthackning	[L/ton]	0,27



Figur 30. Resultat från modelleringen av dieselförbrukningen vid hackning av helsäd på rot. Korrelationskoefficienten mellan mätdata och modellen var 0,66, vilken betyder att modellen kan användas för att beräkna interpolerade värden.

Resultatet av modelleringen visar att dieselförbrukningen stiger sakta med stigande biomassaskörd upp till ca 22,6 ton/ha vid 9 mm snittlängdsinställning, 18,4 ton/ha vid 5 mm snittlängdsinställning och 16,9 ton/ha vid 3,5 mm snittlängdsinställning (Figur 30). Vid biomassaavkastningar över dessa brytpunkter nås den maximala skördekapaciteten [ton/h] och dieselförbrukningen stiger kraftigare.

4.2.7 Biomassaavkastning efter skördeförluster

Det antas att bara en viss andel av biomassan som står i fältet kan bärgas vid maskinell skörd. För vall användes en bärgningskoefficient som beräknades enligt den linjära regressionen som redovisades i Figur 12:

$$\text{Bärgningskoefficient [\%]} = 1,3828 \cdot \text{Biomassaavkastningen} \left[\frac{\text{ton TS}}{\text{ha}} \right] + 64,603$$

För helsäd antogs en skördeoberoende bärgningskoefficient på 90 %.

För vall i 3-skördesystemet hade ingen gödsling skett efter andra skörden i fältförsöket. I denna systemstudie antogs för vall producerad i ett 3-skördesystem att gödslingen sker som en grundgiva, samt efter både första och andra skörden. Detta antogs påverka biomassaavkastningen av tredje skörden positivt och den uppskattades med hjälp av relativskördar. Den ackumulerade biomassaavkastningen för första och andra skörden i ett 3-skördesystem antogs stå för 75 % av den totala biomassaavkastningen (Nilsdotter-Linde, 2004). Biomassaavkastningen för den gödslade 3:e skörden beräknades därmed till 3,0 ton TS/ha istället för 1,6 ton TS/ha för den ogödslade 3:e skörden. Biomassaavkastningen för vall i 2-skördesystemet (12,7 ton TS/ha) var 4 % högre jämfört med vall i 3-skördesystemet (12,2 ton TS/ha), vilket kan anses vara normalt (Gunnarsson *m fl.*, 2014).

Rågen i fältförsöket hade behandlats med stråförkortningsmedel samt gödslats otillräckligt, vilket antogs leda till en minskad biomassaavkastning. I systemstudien antogs därför att råg och

vete har lika avkastningar på 12,1 ton TS/ha vid skördetidpunkt *mellan* och *sent*. Vid *tidig* skördetidpunkt antogs råg ha en lägre avkastning på 10,5 ton TS/ha, som beräknats enligt relativskörden i fältförsöket.

De använda uppgifterna för skördad biomassa per hektar, för grödor i studien visas i Tabell 11.

Tabell 11. Antagen teknisk biomassaavkastning för olika grödor, skördesystem och skördetidpunkter

Gröda	Biomassaavkastning
	[ton TS/ha]
<i>Vall</i>	Skörd 1 / skörd 2 / skörd 3 (totalt)
2 skördar per år	7,3 / 5,3 (12,7)
3 skördar per år	4,3 / 4,8 / 3,0 (12,2)
<i>Råg</i>	
Tidigt	10,5
Medium, sent	12,1
<i>Vete</i>	
Tidigt, medium, sent	12,1

4.3 Transport av biomassa

Den hackade biomassan blåses från exakthacken över i en traktordragen följevagn, som sedan transporteras direkt till biogasanläggningen. Det är främst exakthackens skördekapacitet, biomassaavkastningen i fält och distansen till biogasanläggningen som avgör hur många ekipage med följevagnar som behövs. Antalet ekipage beräknades så att det alltid finns en tom följevagn redo för att ta emot hackad biomassa. Ekipaget som används är en 120 kW-traktor med två fältvagnar på vardera 47 m³. För att undvika att effekterna från olika snittlängdsinställningar överskuggas av olika belastningskoefficienter av transportkedjan vid de valda biomassaavkastningarna har en transportkedja med 100 % belastning antagits.

Tabell 12. Parametrar som användes vid dimensioneringen av transportkedjan för hackad vall respektive helsäd

Parameter	Enhet	Värde	Referens
Densitet av vall vid transport	[ton/m ³]	240	(Pettersson <i>m fl.</i> , 2009, Herrmann <i>m fl.</i> , 2012)
Densitet av helsäd vid transport	[ton/m ³]	300	Fältstudie, (Herrmann <i>m fl.</i> , 2012)
Medeltransporthastighet	[km/h]	35	Fältstudie

Av Skånes areal på drygt 1,1 milj. hektar är det ca 41 % (0,45 milj. hektar) åker (SCB, 2013). Betesmark har inte tagits med i beräkningarna, eftersom biogasvallen odlas intensivt. Den potentiella andelen av odlingsarealen för vall respektive helsäd har beräknats utifrån bl.a. potentiella typväxtföljder för Skåne (Tabell 13) och andelen jordbruksmark i Skåne:

$$\begin{aligned} & \text{Andel av odlingsarealen}_{\text{potentiell}} [\%] \\ & = \text{Andel jordbruksmark} [\%] \cdot \text{Andel gröda i växtföljden} [\%] \end{aligned}$$

Tabell 13. Typväxtföljder som antagits för produktion av helsäd respektive vall som biogassubstrat

År i växtföljden	Växtföljd utan vall	Växtföljd med vall
1	Malkorn	Malkorn
2	Höstvete	Vall I
3	Höstvete	Vall II
4	Höstraps	Höstraps
5	Höstvete	Höstvete
6	Socketbetor	Socketbetor
Andel helsäd i växtföljden	3 av 6 år = 50 %	
Andel vall i växtföljden		2 av 6 år = 0,33 %

För helsäd och vall har den potentiella andelen av odlingsarealen beräknats till 20 % respektive 14 % av den totala landarealen i Skåne. Odlingsarealen som behövs för att producera 110 GWh metan per år beräknades enligt:

$$Odlingsareal [ha] = \frac{\text{Metanproduktion} \left[\frac{GWh}{\text{år}} \right]}{\text{Energiavkastning} \left[\frac{GWh}{ha \cdot a} \right]}$$

Det antogs att biogasanläggningen ligger mitt i ett cirkulärt upptagningsområde som behövs för att försörja biogasanläggningen med substrat. Den totala landarealen av detta upptagningsområde beräknades enligt:

$$Landareal_{total} [ha] = \frac{Odlingsareal [ha] \cdot 100}{\text{Andel av odlingsarealen}_{potentiell} [\%]}$$

Radien av denna landareal beräknades enligt:

$$Radielandareal [km] = \sqrt{\frac{Landareal_{total} [ha]}{\pi \cdot 100}}$$

Medeltransportdistansen har beräknats utifrån landarealens radie samt en slingerfaktor τ , som antogs vara 1,95 (Overend, 1982) för att få fram körsträckan på väg:

$$\text{Medeltransportdistansen} [km] = \frac{2}{3} \cdot \tau \cdot Radielandareal [km]$$

4.4 Övriga maskinarbetsmoment

Övriga maskinarbetsmoment omfattar jordbearbetningsmoment såsom, kultivering, plöjning, harvning, samt sådd, gödsling, besprutning, kompaktering i plansilo och inmatning i biogasanläggningen.

Fältarbetstiden för maskiner vid övriga maskinarbetsmoment har beräknats enligt maskinens kapacitet (Maskinkalkylgruppen HIR, 2013):

$$\text{Fältarbetstid} \left[\frac{h}{ha} \right] = \frac{1}{\text{Kapacitet}_{maskin} \left[\frac{ha}{h} \right]}$$

Dieselförbrukningen för dessa arbetsmoment har beräknats enligt timförbrukning för maskiner (Maskinkalkylgruppen HIR, 2013) och effektiva fältarbetstider:

$$\text{Dieselförbrukning} \left[\frac{L}{ha} \right] = \text{Timförbrukning} \left[\frac{L}{h} \right] \cdot \text{Fältarbetstid} \left[\frac{h}{ha} \right]$$

4.5 Lagring av biomassa

För att försörja biogasanläggningen under hela året krävs det att substratet finns tillgängligt året runt. Den skördade biomassan lagras i plansilo vid biogasanläggningen. När den hackade biomassan anländer till plansilon behöver den tryckas in och upp i plansilon. Samtidigt behöver biomassan kompakteras genom överkörning med tunga maskiner för att minska andelen luft och höja densiteten i biomassan. Kompaktering behövs för att minska torrsubstans- och energiförluster genom aerob nedbrytning i plansilon. När plansilon är full behöver den täckas med ett lufttätt plastskikt samt ett skikt som skyddar plastskiktet från att ta skada (t.ex. genom fåglar). Dimensionerna av de plansilos som används i beräkningarna antas motsvara de som finns på SBI:s biogasanläggning i Jordberga.

Tabell 14. Dimensioner på plansilon som motsvarar plansilon på SBI:s biogasanläggning i Jordberga

Parameter	Enhet	Värde	
Längd	[m]	96	sett från sidan
Bredd	[m]	40	
Vägghöjd	[m]	4	sett från öppna ändan
Limpan maximala höjd	[m]	7	
Fyllnadshöjd	[% av vägghöjd]	90	
Substratets lutning	[%]	15	
Volym	[m ³]	17600	

Under lagring av biomassa, helsäd och vall, antogs det att det uppstod förluster som motsvarar 5 % av torrsubstansen (Gissén *m.fl.*, 2014).

4.6 Askhalt

Askhalten i vallen antas följa relationen som visats i Figur 9. Askhalten i helsäd antas vara 5 % (Gissén *m.fl.*, 2014), eftersom det antas att askhalten inte förändras nämnvärt inom de 4 veckorna mellan *tidig* och *sen* skörd, vilket har visats i fältförsöken. Det antas inte vara någon skillnad i askhalt mellan råg och vete, eftersom den skillnaden som visades i fältförsöken förmodligen berodde på en nedsmutsning av växtmaterialet. Halten av organiskt material beräknades som andelen *volatile solids* (VS) av torrsubstansen enligt:

$$VS [\%] = 100 \% - \text{Askhalt} [\%]$$

De slutliga uppgifterna redovisas i Tabell 15.

4.7 Metanpotential

Metanpotentialen för den ensilerade biomassan uppskattades från labbanalysernas resultat samt den statistiska analysen av dessa. Värden som används här har räknats fram från medelvärden för varje skördesystem och justerats med de relativa skillnaderna mellan skördetidpunkter och mellan de olika snittlängderna som presenterades i kapitel 3.9. Värdena har avrundats. I en uppskalerad biogasprocess antogs att metanpotentialen uppnås till 90 % av labbresultaten (Tabell 15).

Tabell 15. Metanpotential och andel organiskt material i torrsubstansen (VS) för vall och helsäd vid olika skördetidpunkter och skördesystem

	Skörd	VS [% av TS]	Metanpotential [Nm ³ /ton VS] (fin / mellan / grov)
Vall			
2-skördesystem	1:a av 2	91,8	230 / 290 / 290
	2:a av 2	92,5	220 / 270 / 270
3-skördesystem	1:a av 3	90,7	320 / 320 / 330
	2:a av 3	91,0	310 / 310 / 320
	3:e av 3	90,6	290 / 290 / 290
Helsäd			
Råg	Tidigt	95,0	300 / 290 / 280
	Medium	95,0	350 / 340 / 330
	Sent	95,0	300 / 290 / 280
Vete	Tidigt	95,0	290 / 290 / 340
	Medium	95,0	290 / 290 / 340
	Sent	95,0	290 / 290 / 340

4.8 Energibalans

Energibalansen beräknades för alla arbetsmoment som visades i Figur 24, som summa av alla energivinster minus summan av alla energiinsatser.

4.8.1 Energiinsatser i biomassaproduktion

Energiinsatserna beräknades som summan av primärenergi för både direkta energiinsatser, såsom drivmedel, el-, och indirekta energiinsatser. De indirekta energiinsatserna omfattar energi som används vid framställning av maskiner (även underhåll), drivmedel och insatsmedel såsom gödselmedel, ensileringsplast, betong och stål till plansilos. Tabell 16 sammanfattar de maskinrelaterade energiinsatserna.

Tabell 16. Maskinspecifikationer för arbetsmomenten vid odling, skörd och transport av vall och helsäd. En 140 kW-traktor antogs användas för alla arbetsmoment. Datakälla: Maskinkalkylgruppen (Maskinkalkylgruppen, 2014)

Arbetsmoment	Maskin	Dieselförbrukning [L/ha]	Indirekt energi [MJ/(ha*a)]
Traktor	Traktor, 140 kW	se nedan	38
Vall			
Sådd	Såmaskin, 2200 L	4,7	43
Vältning	Vält	2,3	35
Spridning av mineralgödsel	Konstgödselspridare, buren	2,3	4
Helsäd			
Stubbearbetning	Tallrikskultivator	5,7	8
Plöjning	Plog, delburen	17,5	49
Harvning	Harv, bogserad	4,2	16
Sådd	Såmaskin, 2200 L	4,7	43
Vältning	Vält	2,3	35
Spridning av mineralgödsel	Konstgödselspridare, buren	2,3	4
Pesticidsprutning	Spruta, bogserad	1,2	5
Traktor	Traktor, 120 kW		33
Vall			
Strängläggning	Slåtterkombination	modellberäkning	10
Hackning	Exakthack med pick-up	modellberäkning	119
Transport till lagring	50 m ³ fältvagn	modellberäkning	30 / 50 a
Kompaktering i silon / Inmatning i biogasreaktorn	Lastmaskin, midjestyrd	modellberäkning	2,9 / 5,8 a

^a Gäller för vall / helsäd

Mer detaljerade uppgifter presenteras i tabeller i bilagan:

Parametrar	Tabell
Direkta och indirekta energiinsatser för drivmedel	Tabell 20
Indirekta energiinsatser för mineralgödsel	
Indirekta energiinsatser för maskiner har beräknats enligt Prade, et al. (2012)	Tabell 21
Skördeoberoende arbetsmoment	
Skördeberoende arbetsmoment	Tabell 22
Utsäde: mängder, energiinsatser och kostnader	Tabell 23
Kalkning och baspesticider: mängder, energiinsatser och kostnader	Tabell 24
Övriga pesticider vid odling av helsäd: mängder, energiinsatser och kostnader	Tabell 25

4.8.2 Energiinsatser i biogasproduktion

Energiinsatser i rötningen beräknades för en typbiogasanläggning med en produktion av 110 GWh per år. Anläggningen antogs bestå av ett antal lika stora röt-kammarmoduler. Antalet röt-kammare beräknades för varje gröda, skördetidpunkt och snittlängd enligt gemensamma processparametrar (Tabell 17). På samma sätt beräknades antalet rötrestlager i form av betongbrunnar med gastätt plasttak. Rötrestlagrats totala volym antogs täcka 50 % av producerad mängd rötrest, eftersom rötresten antogs användas både till vår- och höstetablerade grödor.

Tabell 17. Antagna och beräknade processparametrar som användes för att modellera biogasanläggningen

Parameter	Enhet	Antaget värde	Referenser
Rötkammarmodul, volym	m ³	2700	Egna beräkningar
Lagringstank för rötrest, volym	m ³	14500	Egna beräkningar
Behov av lagringsvolym för rötrest	%	50	Egen antagning
Inmatningshastighet rötkammare	kg/m ³ /d	3	(Salter and Banks, 2009)
Livslängd för rötkammare och rötrestlager	a	20	(Hartmann, 2006)
Livslängd för tak på rötrestlager	a	10	Egen antagning
Energiinsatser för rötning - värme	MJ/Mg	110	(Berglund and Börjesson, 2006)
Energiinsatser för rötning - el	MJ/Mg	66	(Berglund and Börjesson, 2006)
Metandel i biogasen	%	55	Egen antagning
Energiinsatser för uppgradering - skrubber	MJ/Nm ³	1,08	(Nilsson <i>m fl.</i> , 2001)
Energiinsatser för uppgradering - komprimering	MJ/Nm ³	0,72	(Nilsson <i>m fl.</i> , 2001)

Energibehovet i form av värme och el beräknades som en fast energikostnad per ton substrat i rötkammaren. Alla substrat fick spädas så att rötrestens torrsbstanshalt inte skulle överstiga 9,5 % (Börjesson *m fl.*, 2015). Det indirekta energibehovet för biogasproduktionen har uppskattats som rena energikostnader för materialframställning för en förenklad biogasanläggning med rötkammare (stål), rötrestlager (armerad betong och plasttak).

Direkta energiinsatser för uppgradering av biogas till fordonsgas uppskattades som elförbrukning för en vattenskrubberanläggning samt för komprimering av metangasen (Tabell 17).

4.8.3 Energpotential

Energpotentialen i form av metan från rötning beräknades för vall och helsäd för olika skördetidpunkter samt olika snittlängder utgående från biomassaavkastningen, askhalten och metanpotentialen:

$$\begin{aligned} \text{Biomassaavkastningen} \left[\frac{\text{ton VS}}{\text{ha}} \right] \\ = \text{Biomassaavkastningen} \left[\frac{\text{ton TS}}{\text{ha}} \right] \cdot (1 - \text{Askhalt}[\%]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Metanavkastning} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{ha}} \right] \\ = \text{Biomassaavkastningen} \left[\frac{\text{ton VS}}{\text{ha}} \right] \cdot \text{Metanpotential} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{ton VS}} \right] \end{aligned}$$

$$\text{Energpotential} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{ha}} \right] = \text{Metanavkastning} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{ha}} \right] \cdot \text{Högre värmevärde}_{\text{metan}} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3} \right]$$

4.8.4 Nettoenergiavkastning

Nettoenergiavkastningen beräknades som energipotentialen minus energiinsatserna:

$$\text{Nettoenergiavkastning} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{ha}} \right] = \text{Energipotential} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{ha}} \right] - \text{Energiinsatser} \left[\frac{\text{GJ}}{\text{ha}} \right]$$

Energiinsatser omfattar direkta och indirekta energiinsatser vid odling, skörd och transport av substratet, biogasprocessen samt uppgradering av biogas till fordonsgas.

4.9 Substratkostnader

Kostnader för produktion och tillhandhållande av substrat från vall och helsäd har beräknats med hjälp av en totalstegskalkyl (Rosenqvist, 2010, SJV, 2014). Modellen använder sig av samma arbetsmoment som i beräkningarna för energibalansen (Figur 24).

4.9.1 Gödselmedel

Kostnader för gödselmedel som behövs vid produktion av substratet har beräknats enligt uppgifterna i Tabell 18.

Tabell 18. Pris på växtnäring.<

Växtnäring	Pris ^a [SEK/kg]
N	9
P	20
K	8

^a enligt (SJV, 2012, SJV, 2013)

4.9.2 Maskiner

Maskinkostnaderna har beräknats enligt timpriser för maskiner (Maskinkalkylgruppen HIR, 2013) och effektiva fältarbetstider:

$$\text{Maskinkostnad} \left[\frac{\text{kr}}{\text{ha}} \right] = \text{Timpris}_{\text{maskin} + \text{förare} + \text{bränsle}} \left[\frac{\text{kr}}{\text{h}} \right] \cdot \text{Fältarbetstid} \left[\frac{\text{h}}{\text{ha}} \right]$$

4.9.3 Utsäde, kalkning och pesticidanvändning

Mängder och kostnader för utsäde, kalkningsmedel och pesticider presenteras i bilagan (Tabell 23-Tabell 25).

4.9.4 Lagring i plansilo

Lagringskostnaderna i plansilo (jämför 4.5) beräknades med hjälp av en investeringskalkyl till 20 kr/m³ inklusive täckning med plast (Tabell 19).

Tabell 19. Ekonomiska beräkningar kring lagringsutrymme i plansilomoduler

Parameter	Enhet	Värde
Lagringsvolym	[m ³]	17505
Investeringskostnader ^a	[kr/m ³]	158
Avskrivningstid	[a]	20
Ränta	[%]	6
Kostnader för täckplast ^a	[kr/m ² /a]	28
Totalkostnad	[kr/m ³ /a]	20

^a Källa: Strid *et al.* (2012)

4.10 Processkostnader

4.10.1 Biogasproduktion

Kostnaderna för biogasproduktionen beräknades för en typbiogasanläggning med en produktion på 110 GWh per år. Det antogs att rötningen kostar 1,8 kr/Nm³ metan (Urban *m.fl.*, 2008) med en variation på ±10%, dvs. kostnaderna antogs variera mellan 1,6 och 2,0 kr/Nm³ metan. En korrigeringsfaktor för denna kostnad beräknades för de olika substraten i studien baserad på deras metanproduktion i Nm³ per m³ reaktorinnehåll, eftersom kostnadsuppgifterna är framtagna för rötning av majs:

$$\text{Korrigeringsfaktor} = \frac{\text{Volymproduktivitet}_{\text{majs}} \left[\frac{Nm_{\text{metan}}^3}{m_{\text{reaktorinnehåll}}^3} \right]}{\text{Volymproduktivitet}_{\text{substrat}} \left[\frac{Nm_{\text{metan}}^3}{m_{\text{reaktorinnehåll}}^3} \right]}$$

4.10.2 Uppgradering

Kostnaderna för uppgraderingen av råbiogasen beräknades för en typbiogasanläggning med en produktion på 110 GWh per år och ett flöde av råbiogas på 2000 m³/h. Det antogs att uppgraderingen kostar 0,1 kr/kWh metan (Persson, 2003) med en variation på ±20%, dvs. kostnaderna antogs variera mellan 0,08 och 0,12 kr/kWh metan.

4.10.3 Rötrestlagring

Rötrestlagrats totala volym antogs täcka 50 % av producerad mängd rötrest, eftersom rötresten antogs användas både till vår- och höstetablerade grödor. Det antogs att lagring av rötresten kostar 30 kr/m³/år (Rylander and Wiqvist, 2010) med en variation på ±10%, dvs. kostnaderna antogs variera mellan 27 och 33 kr/m³/år.

Rötrestens roll i biogasanläggningens ekonomi har dock inte beaktats, eftersom det är de lokala förutsättningar som avgör om rötresten blir en kostnad eller en inkomstkälla.

4.11 Betalningsförmåga

Biogasanläggningens betalningsförmåga för substratet beräknades som en differens mellan ett antaget marknadspris för fordonsgas och anläggningens kostnader för biogasproduktion, uppgradering och rötrestlagring:

$$\begin{aligned} \text{Betalningsförmåga}_{\text{substrat}} \left[\frac{\text{kr}}{\text{MWh}} \right] \\ = \text{Marknadspris}_{\text{fordonsgas}} - \text{Kostnader}_{\text{Biogasproduktion}} \\ - \text{Kostnader}_{\text{Uppgradering}} - \text{Kostnader}_{\text{Rötrestlagring}} \end{aligned}$$

Som marknadspris för fordonsgas antogs 650 kr/MWh (Lantz and Björnsson, 2011) med en variation på ±50 kr/MWh.

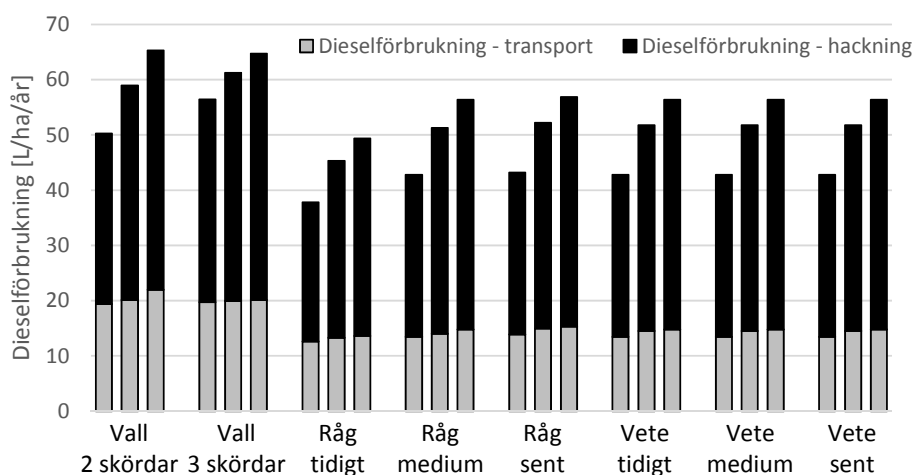
5 Systemstudie – resultat och diskussion

Resultaten presenteras först för de avkastningsnivåer som har uppnåtts i fältstudiedelen och justerats för fältförluster vid maskinell skörd. Dessa resultat undersöks sedan vidare i ett antal känslighetsanalyser.

5.1 Energibalans

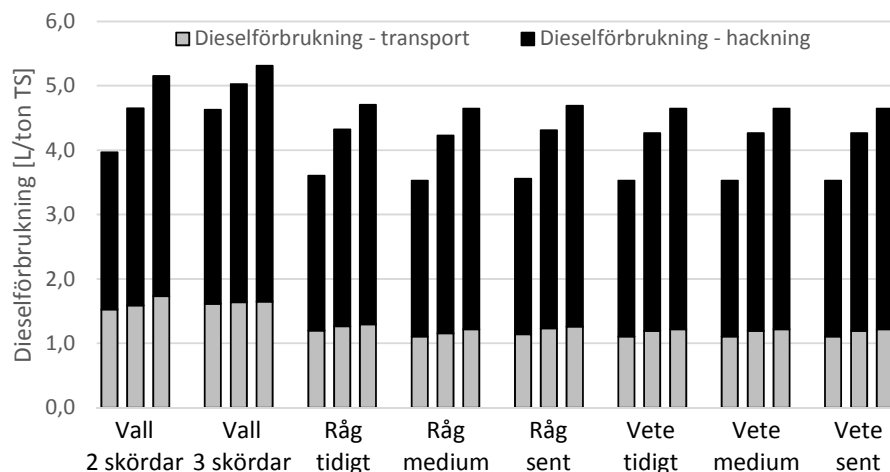
5.1.1 Dieselförbrukning

Dieselförbrukningen (L per hektar och år) är högre för hackning och transport av vall än för vete och råg (Figur 31). Råg har en något lägre dieselförbrukning vid *tidig* skörd, på grund av lägre biomassaavkastning. Den högre dieselförbrukningen vid vallskörd beror på att skörden är uppdelad i flera arbetsmoment (avslagning och bärgning) samt att torrsubstanshalten är lägre (19,5-32,4 %) vid avslagningsmomentet jämfört med helsädesskörd, vilket begränsar avslagningskapaciteten. Allmänt är dieselförbrukningen högre vid kortare snittlängdsinställning.



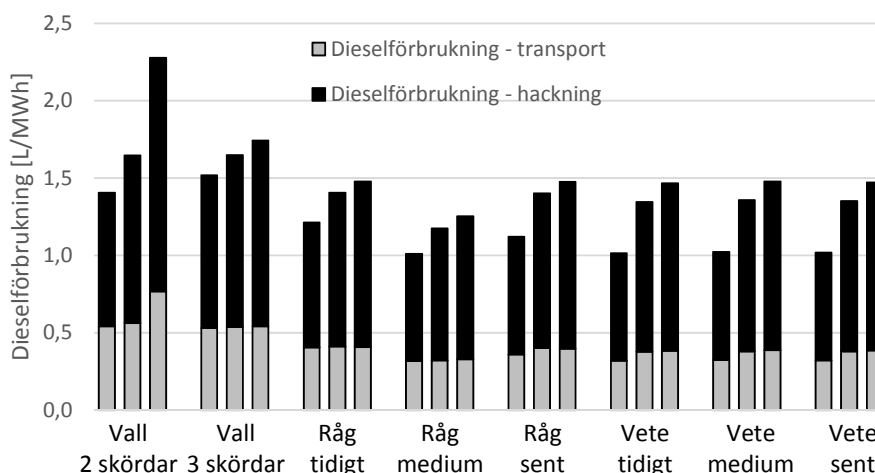
Figur 31. Dieselförbrukning (L/ha/år) vid hackning och transport för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*).

Dieselförbrukningen relaterad till torrsubstansavkastningen visar att vall i 2-skördesystemet och helsäd har liknade dieselinsatser (Figur 32). De högre dieselinsatserna för vall i 3-skördesystemet beror på den tredje skörden, som hade en relativt låg avkastning, samt en lägre torrsubstanshalt jämfört med vallskörd i 2-skördesystemet och med helsädesskörd.



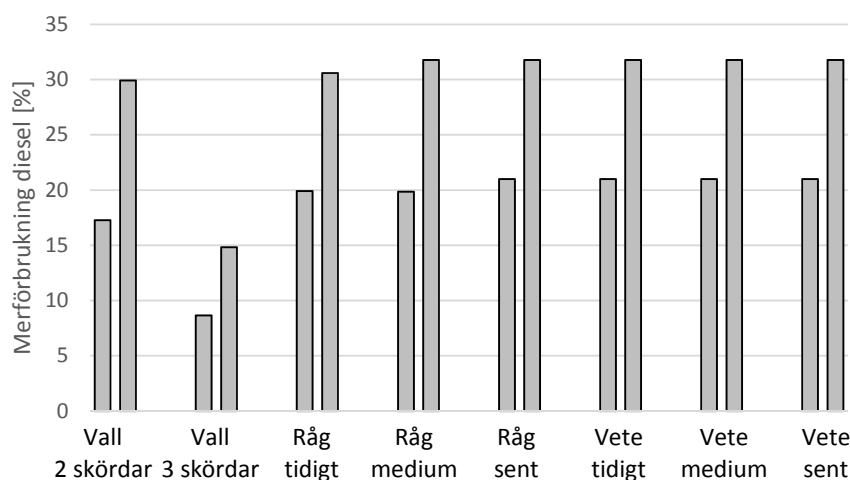
Figur 32. Dieselförbrukning (L/ton TS) vid hackning och transport för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*).

Dieselförbrukningen i relation till energipotentialen i biogassubstratet visas i (Figur 33). Råg med skördetidpunkten *medium* har de lägsta värden, vilket beror främst på de höga metanpotentialerna för råg.



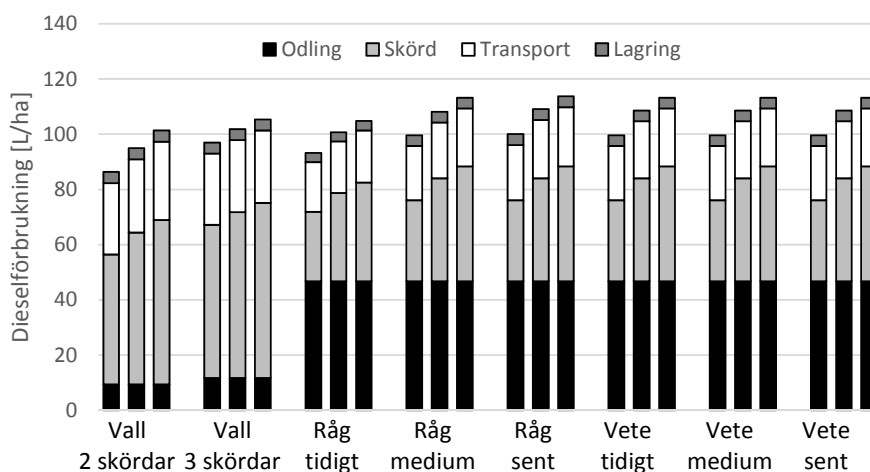
Figur 33. Dieselförbrukning (L/MWh metan) vid hackning och transport för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*).

Dieselförbrukningens förändring i % när snittlängden ändras från *grov* till *mellan* respektive från *grov* till *fin* visas i (Figur 34). Generellt sker den största förändringen i dieselförbrukning när snittlängden ändras från *grov* till medel och sen blir förändringen i dieselförbrukningen inte så mycket större när snittlängden blir ännu kortare, dvs. då den ändras till *fin*. För skörd av helsäd och vall i 2-skördesystemet ligger merförbrukningen vid hackning och transport runt 17-22 och 30-33 % när snittlängden ändras från *grov* till *mellan* respektive från *grov* till *fin*. För vall i 3-skördesystemet ligger merförbrukningen mycket lägre, runt 9 och 15 % när snittlängden ändras från *grov* till *mellan* respektive från *grov* till *fin*. Detta kan förklaras med att grundförbrukningen är redan relativt hög pga. skörden delas upp på tre delskördar samt att biomassaavkastningar per delskörd är lägre än i 2-skördesystemet.



Figur 34. Merförbrukning av diesel (%) vid hackning och transport för olika grödor och skördetidpunkter vid ändring av snittlängden från *grov* till *mellan* (vänster) och från *grov* till *fin* (höger).

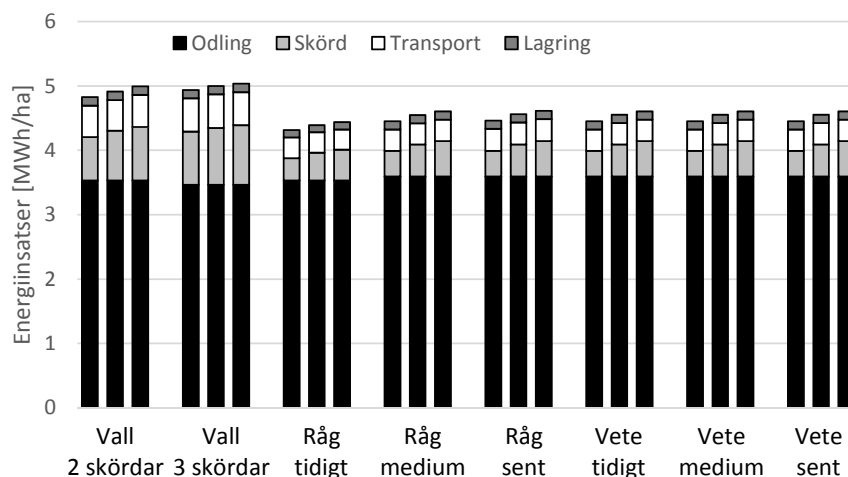
Dieselförbrukningen i hela substratproduktionskedjan varierar mellan 86 och 114 L/ha (Figur 35). Skörderelaterad dieselsats dominerar dieselförbrukningen vid produktion av vall som biogassubstrat. Vid produktion av helsäd som biogassubstrat är odlingsdelen, dvs. jordbearbetningsmomenten, dominerande.



Figur 35. Dieselförbrukning (L/ha) vid odling, skörd, transport och lagring för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*).

5.1.2 Energiinsatser i biogassubstratproduktion

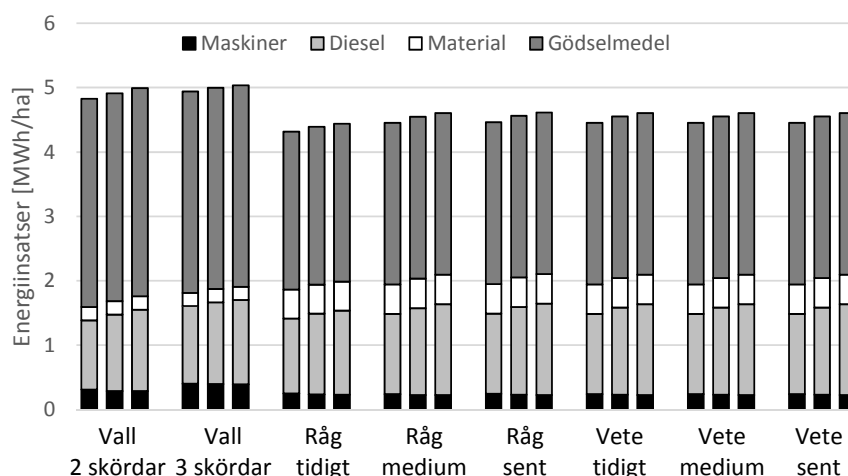
Med 3,5–3,6 MWh/ha utgör odlingen av substratet den största andelen av energiinsatserna, 69–82 %, i biogassubstratproduktionen (Figur 36). Skörd och transport står för 0,3–0,9 MWh/ha (8–18 %) respektive 0,3–0,5 MWh/ha (7–11 %). Lagringens andel är endast 0,1 MWh/ha (2–3 %) av den totala energiinsatsen vid odling, skörd, transport och lagring av biogassubstraten.



Figur 36. Energiinsatser (MWh/ha) vid produktion av biogassubstrat för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder fördelat på produktionsmoment (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*).

Energiinsatserna för vall i 2-skördesystem (4,8–5,0 MWh/ha) är ca 10 % högre än presenterad i en tidigare studie där den blev 4,5 MWh/ha (Gissén *m fl.*, 2014). Samma studie visade energiinsatserna på 3,5 MWh för rågvete skördad som helsäd, vilket ligger ca 22 % under de 4,3–4,6 MWh/ha presenterad här. Fördelning av energiinsatserna mellan produktionsmomenten var dock mycket liknande.

Förklaringen till de nästan lika höga energiinsatserna i odlingsdelen för vall och helsäd är att de indirekta energiinsatserna för gödsling är högre i vallodling jämfört med helsädesodling, medan de direkta energiinsatserna för arbetsmomenten i fält är lägre i vallodling jämfört med helsädesodling.

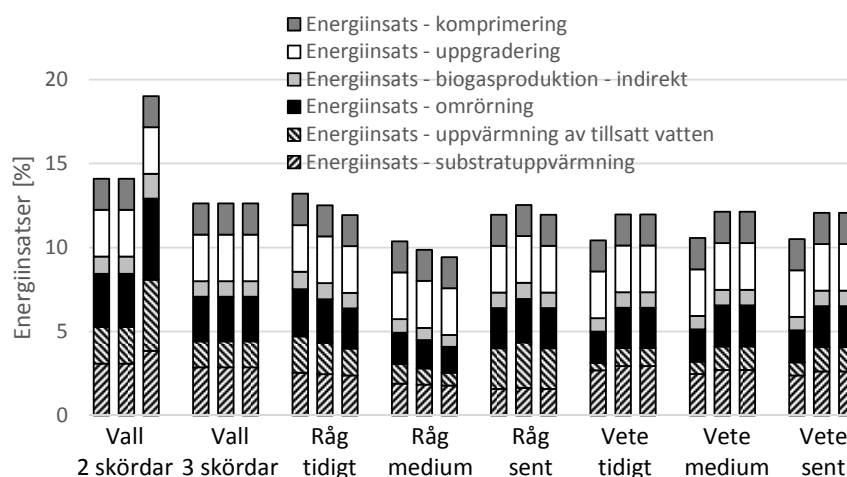


Figur 37. Energiinsatser (MWh/ha) vid produktion av biogassubstrat för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder fördelat på produktionsmedel (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*).

Fördelar man energiinsatserna (MWh/ha) på olika produktionsmedel så framstår de indirekta energiinsatserna i framställning av gödselmedel (54-66 %) som klart dominerande (Figur 37). Diesel står för den näst högsta energiinsatsen (23-31 %). De indirekta energiinsatserna för maskiner (5-8 %) och material (4-10 %) står för bara en mindre andel. Den högre andelen energi för material i helsädesproduktionen beror främst på högre energiinsatser för produktion av utsädet samt mer omfattande användning av pesticider.

Fördelningen mellan produktionsmedlen för vall och helsäd är mycket liknande den som presenterades i Gissén *m.fl.* (2014) för vall respektive rågvete.

Energiinsatserna för rötning av substraten och uppgradering av biogasen till fordonsgas (metan) som andel av energiinnehållet i producerad mängd fordonsgas blev lägst för råg, 10 %, vid skördetidpunkt medium (Figur 38). Råg skördad tidigare resp. senare, vete samt vall i 3-skördesystemet hade ett medeltal på 12 %. Vall i 2-skördesystemet hade ett medeltal på 16 %. Detta orsakas främst av den låga metanpotentialen för *fin*hackad vall. Exkluderas den, så hade vall i 2-skördesystemet ett medeltal på 14 %.

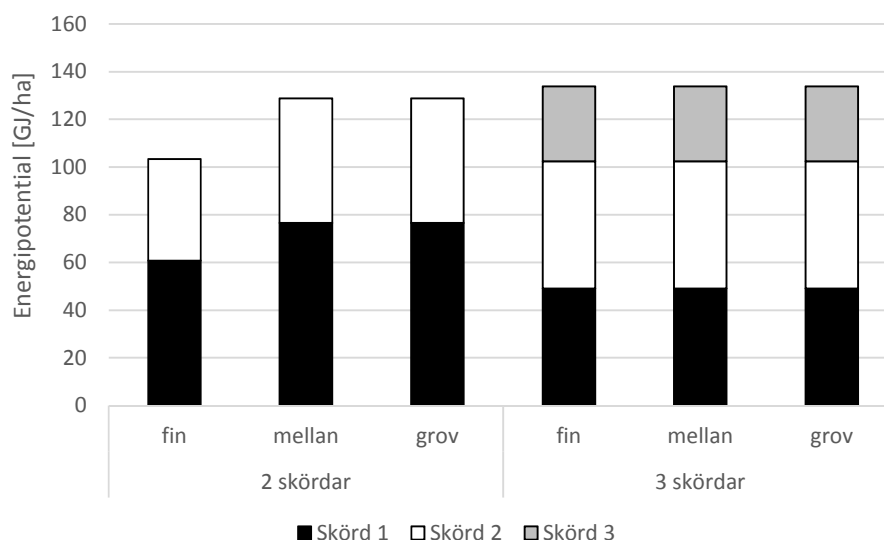


Figur 38. Energiinsats (%) för rötning av substratet och uppgradering av biogasen som andel av energiinnehållet i form av metangas hos substratet (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*).

Energiinsatser vid produktion av vall, råg och vete som biogassubstrat redovisas i detalj i bilagan (Tabell 26-Tabell 28).

5.1.3 Energipotential

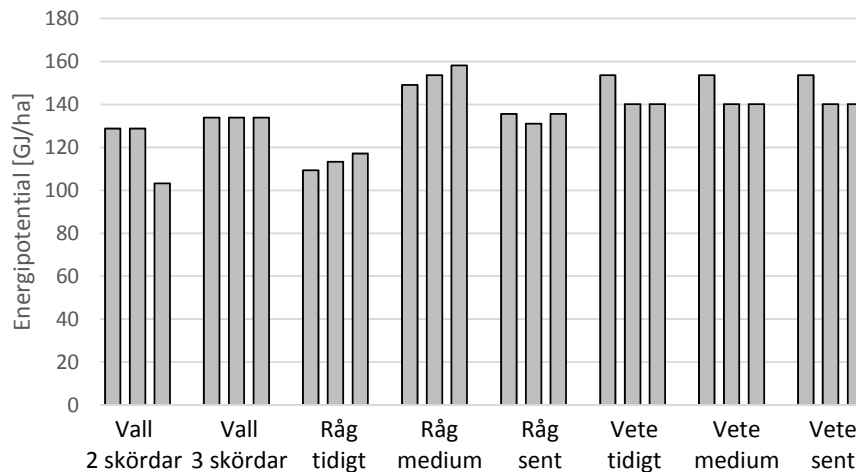
Energipotentialerna (MWh/ha) som redovisas här är uppskattningar av teknisk möjlig energipotential för olika grödor, skördetidpunkter och snittlängdsinställningar. Energipotentialen för vall påverkas av snittlängdsinställningen i 2-skördesystemet, men inte i 3-skördesystemet (Figur 39). En *fin* hackning av vallen missgynnar energiavkastningen i 2-skördesystemet och resulterar i en energipotential på 29 MWh/ha. Detta kan jämföras med 36-38 MWh/ha om *mellan* eller *grov* hackning tillämpas i 2-skördesystemet och 3-skördesystemet. Fältstudien visade att det inte hittades någon skillnad i energiavkastningen mellan snittlängderna i 3-skördesystemet.



Figur 39. Energipotential (MWh/ha) för vall som biogassubstrat vid olika snittlängder och i olika skördesystem i form av råbiogas. Potentialen baseras på maskinell skörd (skördeförluster borträknade) samt teknisk metanpotential (=90 % av BMP-resultatet i fältstudien).

Vallens energipotential som biogassubstrat i 2-skördesystemet har tidigare uppskattats till ca 22 MWh/ha. Detta ligger runt 35 % under värdena som presenteras här och beror främst på en mycket lägre biomassaavkastning, 9,1 ton TS/ha, som utgångspunkt (Gissén *m.fl.*, 2014).

*Fin*hackad råg, skördad vid skördetidpunkten *medium* samt *grov*hackad vete visar de högsta energipotentialerna, 43-44 MWh/ha (Figur 40).

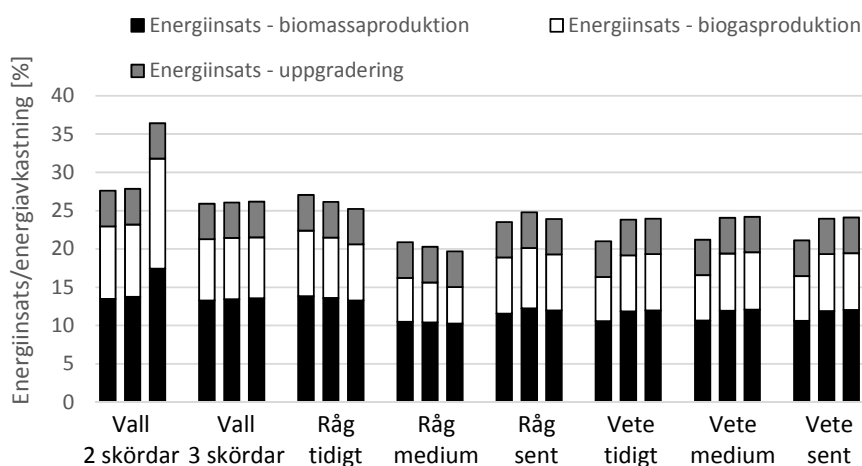


Figur 40. Energipotential i form av metan (MWh/ha) för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder fördelat på produktionsmedel (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*). Energipotentialen baseras på maskinell skörd (skördeförluster borträknade) samt teknisk metanpotential (=90 % av BMP-resultatet i fältstudien).

Fältstudien visade att detta främst beror på metanpotentialen (jämför Tabell 15). Biomassaavkastningen av råg var signifikant lägre vid skördetidpunkt *tidigt*, medan ingen påverkan av skördetiden kunde ses i vete. Skördetid-punkterna för rågen var onödigt sen. Detta kan styrkas med mycket högra torrsubstanshalter redan vid *tidig* skörd av rågen. Råg är mycket mer känslig för skördetidpunkten än de andra grödorna (Figur 40), vilket främst beror på metanpotentialen.

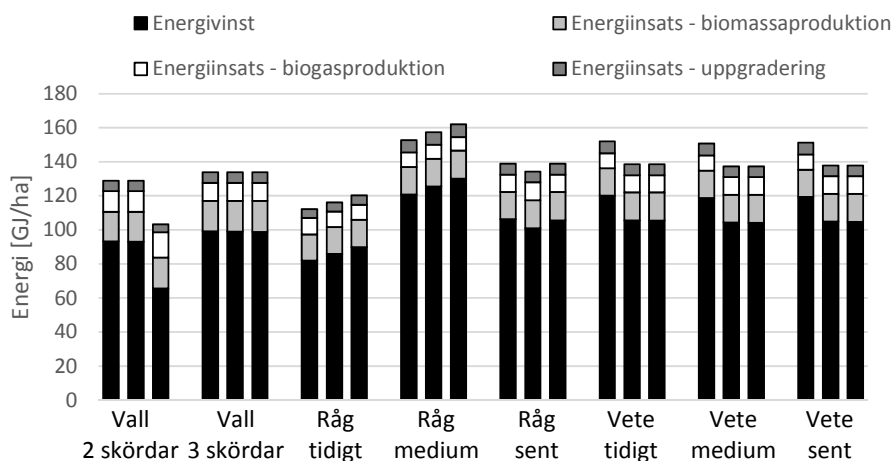
5.1.4 Energibalans

Energikvoten mellan energiinsats och energiavkastning vid produktion av metangas som fordonsbränsle varierade mellan 20 och 37 % (Figur 41). Lägst kvot, dvs. bäst energibalans, hade råg skördad vid skördetidpunkt *medium*, följt av *grovhackad vete* och vall skördad tre gånger per år.



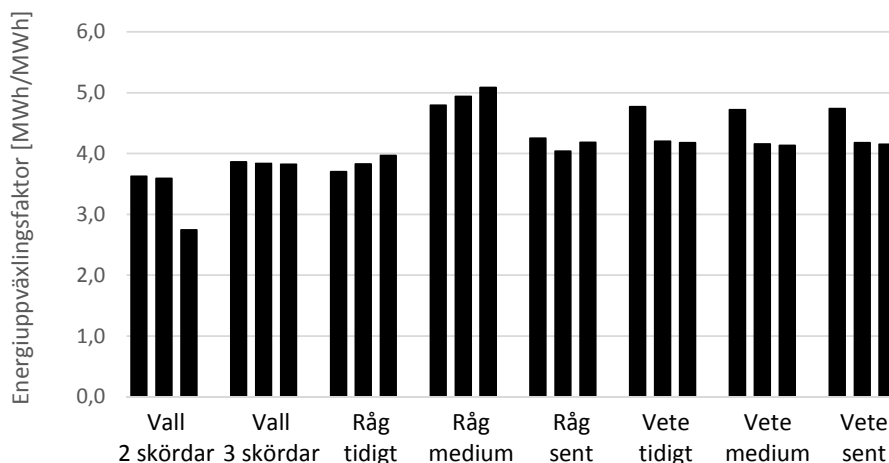
Figur 41. Energibalansen - kvoten mellan energiinsatser och energiavkastningen för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder fördelat på produktionsmedel (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*). Energipotentialet baseras på maskinell skörd (skördeförluster borträknade) samt teknisk metanpotential (=90 % av BMP-resultat i fältstudien).

Energivinsten (nettoenergiavkastningen) varierade i intervallet 18-36 MWh/ha (Figur 42). Råg skördad vid skördetidpunkt *medium* samt *grovhackad vete* har en klart högre nettoenergiavkastning per hektar än vall samt helsäd vid andra skördetidpunkter respektive snittlängder.



Figur 42. Energivinst (MWh/ha) för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder fördelat på produktionsmoment (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*). Energipotentialet baseras på maskinell skörd (skördeförluster borträknade) samt teknisk metanpotential (=90 % av BMP-resultatet i fältstudien).

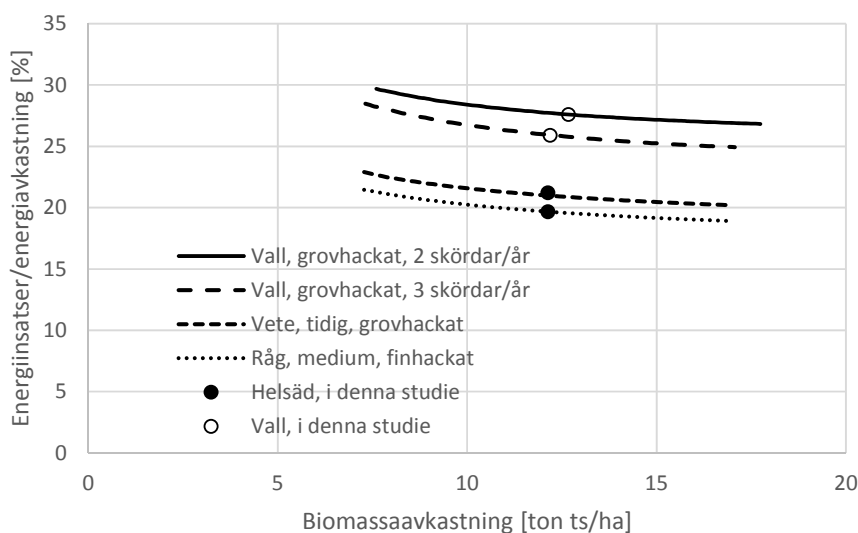
Energiuppväxlingsfaktorn beskriver hur många gånger man får energiinsatserna tillbaka vid fordonsgasproduktionen och den är därför ett bra mått för energieffektivitet. Råg skördad vid *medium* skördetidpunkt har genomgående för alla snittlängder hög energieffektivitet pga. relativt låga energiinsatser och höga metanpotentialer (Figur 43).



Figur 43. Energiuppväxlingsfaktor för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*). Energipotentialet baseras på maskinell skörd (skördeförluster borträknade) samt teknisk metanpotential (=90 % av BMP-resultat i fältstudien).

5.1.5 Känslighetsanalys - Energibalans

Förändringar i biomassaavkastningen per hektar påverkade energibalansen för de bästa skördealternativen relativt lite (Figur 44). En minskning av biomassaavkastningen med 40 % leder till att andelen av energiinsatserna stiger med 8 % för vall, *grovhackad* och skördad 2 gånger per år, 10 % för vall, *grovhackad* och skördad 3 gånger per år, samt 9 % för råg, *finhackad* och skördat vid skördetidpunkt *medium*, och vete, *grovhackad* och skördad vid skördetidpunkt *tidig*. Ökning av biomassaavkastningen med 40 % resulterar i en minskning av energiinsatsernas andel i energiavkastningen med 3, 4, 4 respektive 4 % för grödorna nämnda ovan.

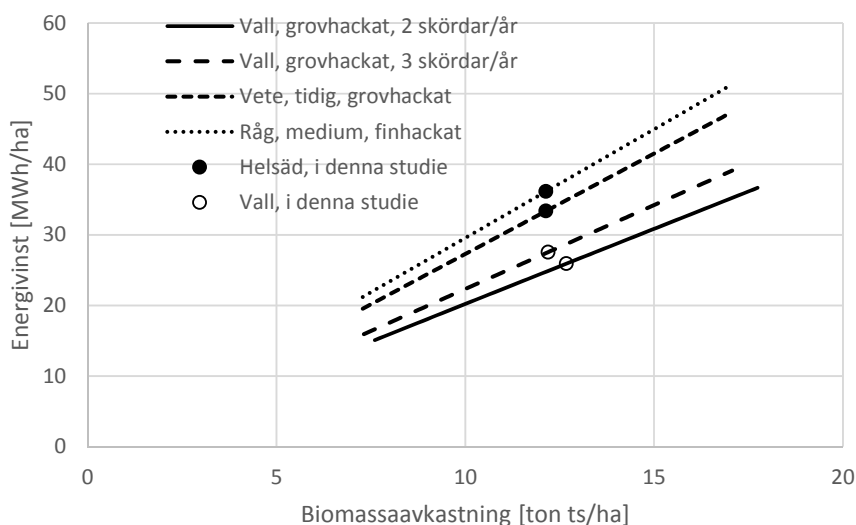


Figur 44. Energibalans vid varierande biomassaavkastning, från -40 till +40 % för de bästa skördealternativen: Råg: *finhackad* vid *medium* skördetidpunkt, vete: *grovhackad* vid *tidig* skördetidpunkt och vall: *grovhackad*.

Utän förändringar i biomassaavkastning är råg, *finhackad* vid skördetidpunkt *medium*, grödan som har bäst energibalans, med en energiinsats som är 19 % av energiavkastningen i form av metangas när substratet rötats. Energiinsatsen för vete, *grovhackad*, vid *tidig* skördetidpunkt

ligger på 21 %, energiinsatsen för vall ligger på 25 % i 3-skördesystemet respektive 28 % i 2-skördesystemet.

Råg, *finhackad* vid *medium* skördetidpunkt, hade högst energivinst per ha, 36 MWh/ha (Figur 45). För att uppnå en liknande energivinst för de andra grödorna, skulle vete, *grovhackad*, vid *tidig* skördetidpunkt avkasta 13,1 ton TS/ha, vall i 3-skördesystemet 15,7 ton TS/ha och vall i 2-skördesystemet 17,5 ton TS/ha. Detta skulle innebära en ökning av biomassaavkastningen med 8, 29 respektive 38 % för vete samt vall i 3- respektive 2-skördesystemet. Vall skördad 3 gånger per år resulterar i en 10 % högre energivinst per hektar jämfört med 2-skördesystemet trots att biomassaavkastningen var 4 % lägre. För helsäd är biomassaavkastningen per hektar en mer avgörande faktor, pga. liknade metanpotentialer för råg och vete.

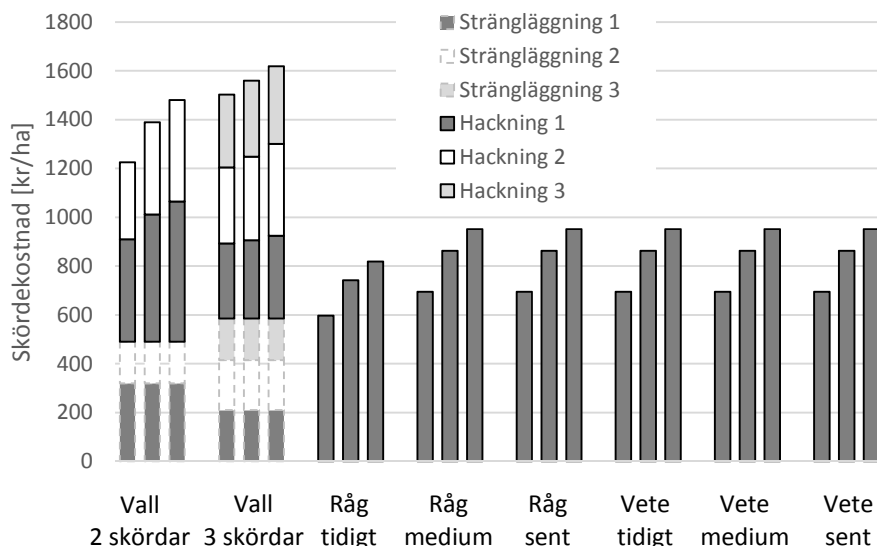


Figur 45. Energivinst (MWh/ha) i relation till biomassaavkastning med en variation i skörd mellan -40 och +40 % för de bästa skördealternativen: Råg: *finhackad* vid *medium* skördetidpunkt, vete: *grovhackad* vid *tidig* skördetidpunkt och vall: *grovhackad*.

5.2 Kostnader

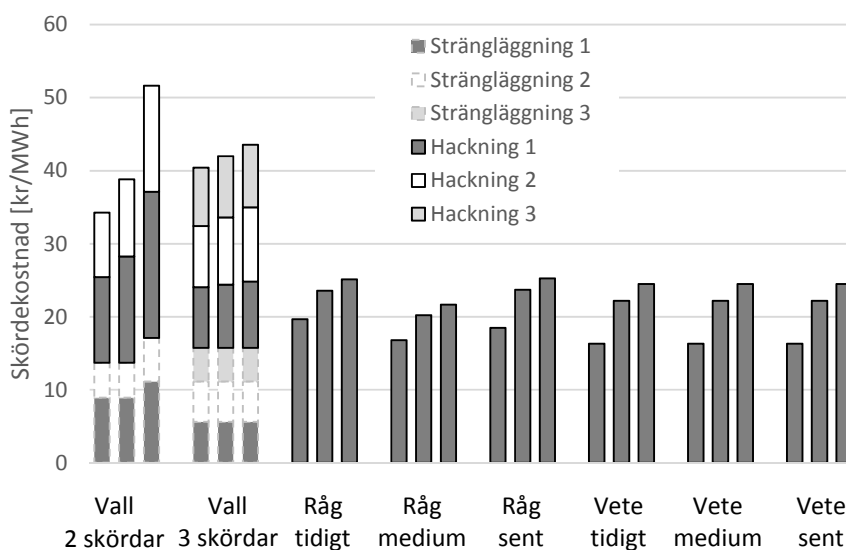
5.2.1 Skördekostnader

Kostnaderna per hektar för stränkläggning och hackning av vall är betydligt högre än hackning av helsäd som står på rot (Figur 46). Detta beror på att skörden är uppdelad i två separata moment (stränkläggning och hackning) samt att varje moment måste genomföras vid två respektive tre skördetillfällen för vallen. Generellt ökar kostnaderna vid minskning av snittlängden. Går man från *grov* hackning till *fin* hackning stiger kostnaderna med 256 respektive 115 kr/ha (21 resp. 8 %) för vall i 2- resp. 3-skördesystem. För helsäd är kostnadsökningen lika som i 2-skördesystemet för vall, 256 kr/ha, som dock står för en betydligt större relativ ökning med 37 %.



Figur 46. Skördekostnader (kr/ha) för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder fördelat på produktionsmedel (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*).

Kostnaderna per producerad MWh fordonsgas ser liknade ut (Figur 47). Även här ökar kostnaderna vid minskning av snittlängden. Går man från *grov* hackning till *fin* hackning stiger kostnaderna med 17 respektive 3 kr/MWh (51 resp. 8 %) för vall i 2- resp. 3-skördesystem. För råg är kostnadsökningen 5-7 kr/MWh (28-37 %) och för vete är kostnadsökningen 8 kr/MWh (50 %).

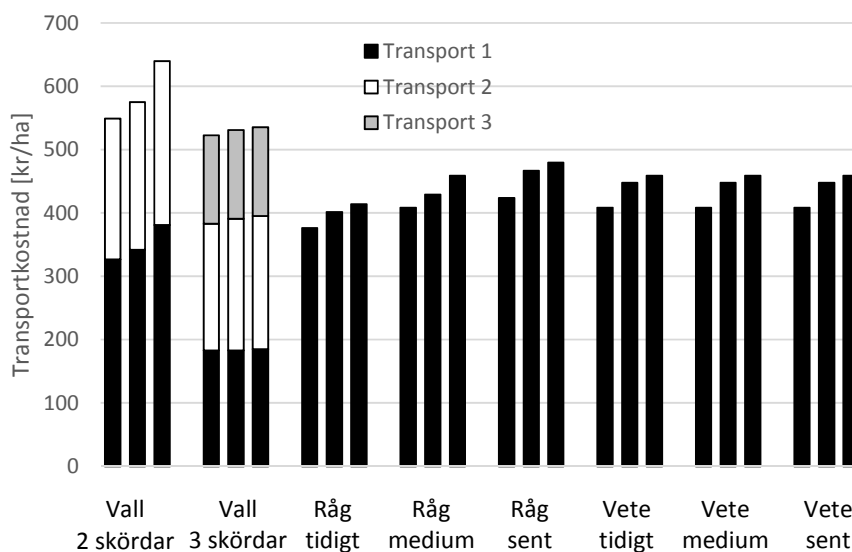


Figur 47. Skördekostnader (kr/MWh) för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder fördelat på produktionsmedel (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*). Energipotentialen baseras på maskinell skörd (skördeförluster borträknade) samt teknisk metanpotential (=90 % av BMP-resultat i fältstudien).

5.2.2 Transportkostnader

Transportkostnader inkluderar insamling vid hackning samt transport till och inmatning i biogasanläggningen. Hektarkostnaderna är generellt lägst för *grov*hackad biomassa, vilket främst beror på högre kapacitet vid skörd och i transportkedjan (Figur 48). Går man från *grov*

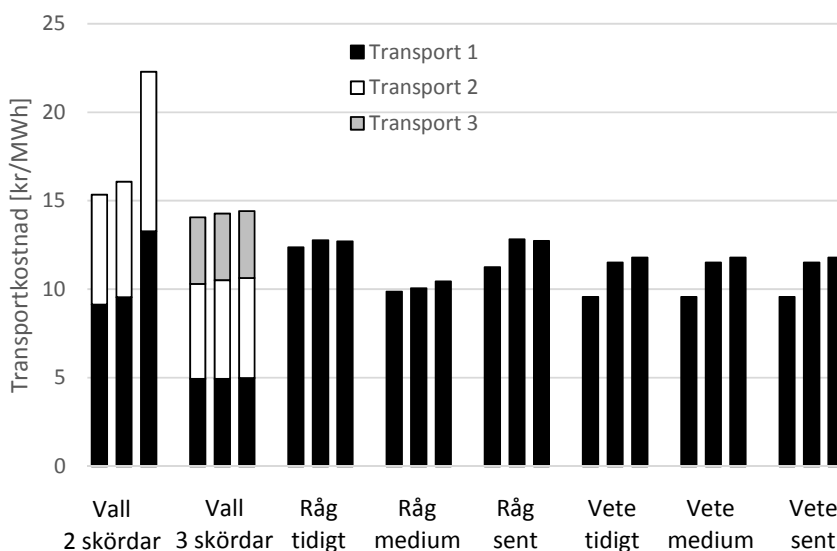
hackning till *fin* hackning stiger transportkostnaderna med 91 respektive 13 kr/ha (16 resp. 2 %) för vall i 2- resp. 3-skördesystem. För helsäd är kostnadsökningen 50-71 kr/ha (12-17 %).



Figur 48. Transportkostnader (kr/ha) för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder fördelat på produktionsmedel (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*).

Fördelen för helsäd vid transporten är den drygt 25 % högre densiteten (gäller både våt- och torrsvikt) jämfört med vall. Det finns dock en viss osäkerhet kring densitet av både vall och helsäd i denna studie. Möjligheten till kompaktering av biomassan inför transporten från fältet bör undersökas mer ingående i framtida studier.

Transportkostnaderna per MWh skiljer sig inte lika mycket mellan vall och helsäd, med *fin*hackad vall i 2-skördesystem som undantag (Figur 49).

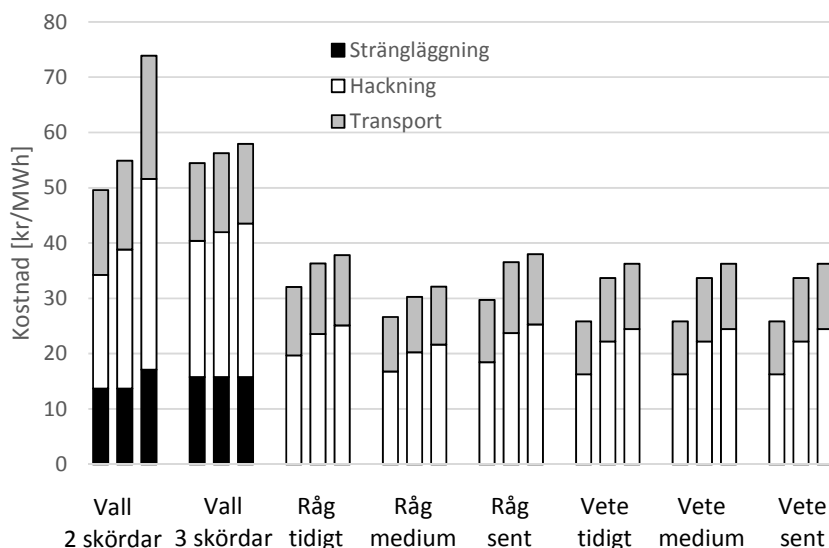


Figur 49. Transportkostnader (kr/MWh) för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder fördelat på produktionsmedel (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*). Energipotentien baseras på maskinell skörd (skördeförluster borträknat) samt teknisk metanpotential (=90 % av BMP-resultat i fältstudien).

*Grov*hackad vete och råg skördad vid skördetidpunkt *medium* har ett högt energiutbyte som resulterar i de lägsta transportkostnaderna. Trots flera skördetillfällen för vall i 3-

skördesystemet är de energi-relaterade transportkostnaderna bara något högre än för *mellan-* och *finhackad* vete. De höga transportkostnaderna för *finhackad* vall i 2-skördesystemet beror på den låga metanpotentialen.

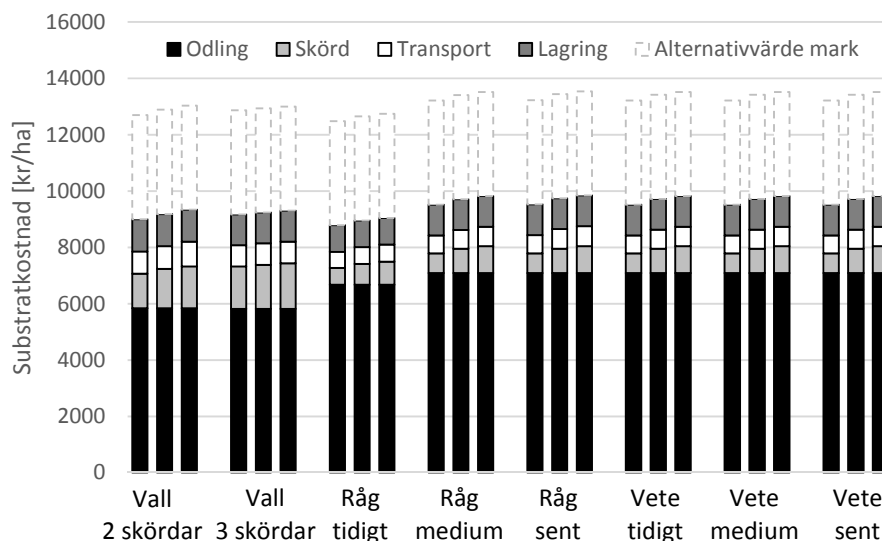
Skörde- och transportkostnaderna per MWh är lägst för *grovhackad* råg skördad vid skördetidpunkt *medium* och *grovhackad* vete, 26-27 kr/MWh (Figur 50). Kostnaderna för *mellan-* och *finhackad* vete och råg ligger 6 respektive 9 kr/MWh (ca 67 resp. 77 %) högre, medan skörde- och transportkostnaderna för vall ligger 32 kr/MWh (122 %) högre!



Figur 50. Skörde- och transportkostnader (kr/MWh) för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder fördelat på produktionsmedel (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*). Energipotentialet baseras på maskinell skörd (skördeförluster borträknade) samt teknisk metanpotential (=90 % av BMP-resultat i fältstudien).

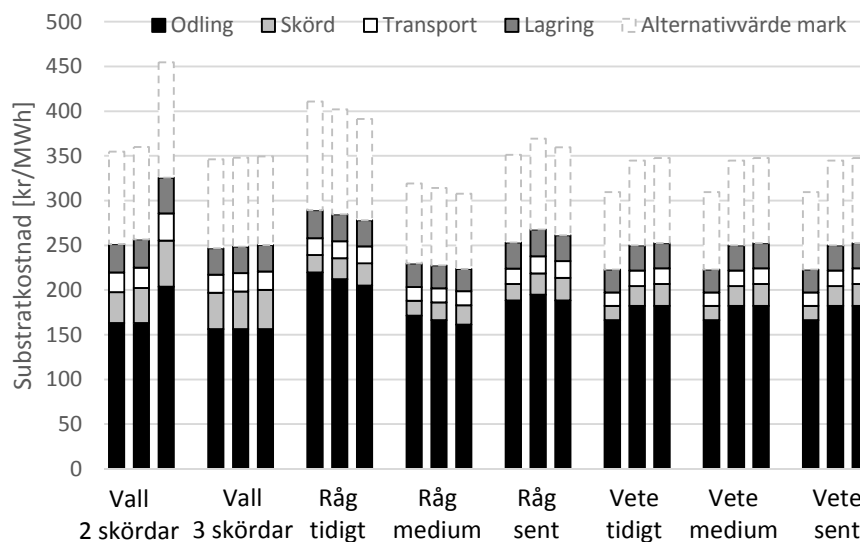
5.2.3 Substratkostnader

Förutom skörde- och transportkostnaderna ingår även andra arbetsmoment samt kostnader för insatsmedel som utsäde, gödning, besprutning, kostnader för lagring samt markkostnader i de totala substratkostnaderna. Råg vid skördetidpunkt *tidig* har de lägsta hektarkostnaderna, främst pga. lägre biomassaavkastning jämfört med annan helsäd (Figur 51).



Figur 51. Substratkostnader (kr/ha) för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder fördelat på produktionsmoment (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*).

En tidigare studie presenterade substratkostnader för vall med en avkastning på 7,7 ton TS/ha i 2-skördesystem på 6800 kr/ha (Dalemo *m fl.*, 1993). En annan studie beräknade en substratkostnad exklusive alternativvärdet för marken på ca 7600-8900 kr/ha för vall skördad 3 gånger per år (Gunnarsson *m fl.*, 2007). Kostnader för vall som biogassubstrat med en avkastning på 7,5 ton TS/ha blev mycket högre, runt 12000 kr/ha i ett 2-skördesystem, men skördelogistiken baserades på en dyrare lösning med pressning av balar (Rosenqvist *m fl.*, 2014).



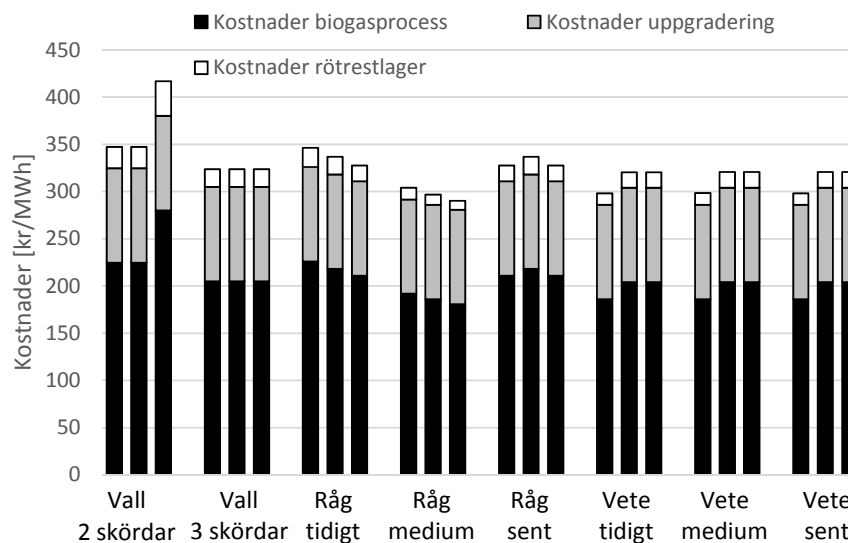
Figur 52. Substratkostnader (kr/MWh) vid biogasproduktion för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder fördelat på produktionsmoment (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*).

Substratkostnaden per MWh producerad fordonsgas är lägst för råg skördad vid skördetidpunkt *medium* och för *grovhackad vete*, 310 kr/MWh (Figur 52). Vall i 3-skördesystem samt *grov-* och *mellanhackad vall* i 2-skördesystem kostar mellan 350 och 360 kr/MWh.

Substratkostnaderna exklusive alternativvärdet för marken för vall och helsäd (rågvete) har tidigare uppskattats till 575 respektive 604 kr/MWh, vilket då baserades på en biomassaavkastning på 9,1 resp. 7,9 ton TS/ha (Edström *m.fl.*, 2008, Gissén *m.fl.*, 2014).

5.2.4 Processkostnader

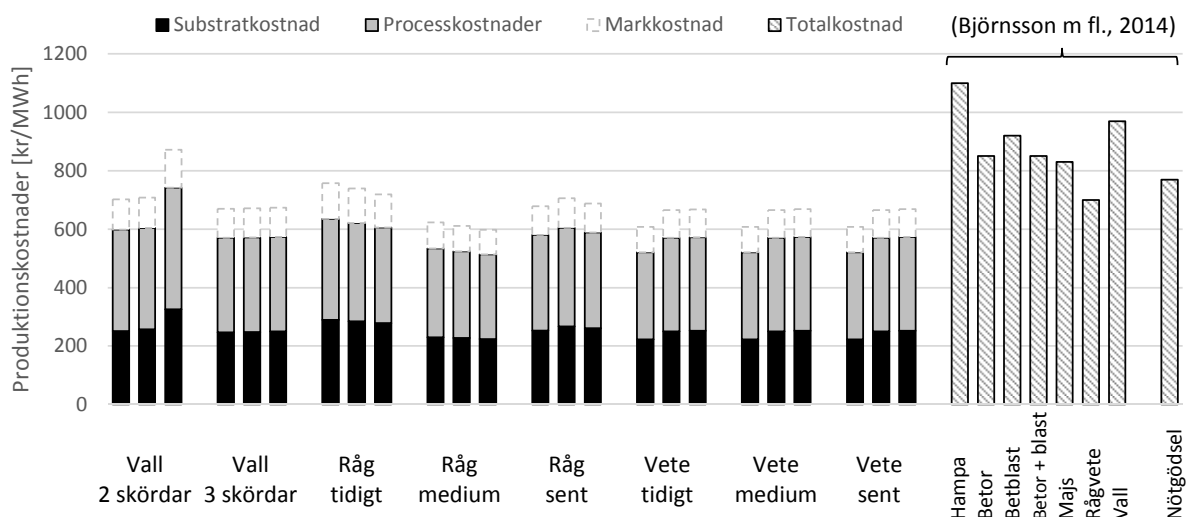
Processkostnaderna domineras med 180-280 kr/MWh (62-67 %) av kostnaderna för biogasproduktionen (Figur 53). Uppgraderingen, 100 kr/MWh (24-34%) och rötrestlagringen 10-37 kr/MWh (3-9%) representerar en mindre andel. Kostnaderna var lägst för råg, *fin*hackad vid *medium* skördetidpunkt, 290 kr/MWh, och för *grov*hackad vete, 300 kr/MWh. En förkortning av snittlängden vid skörd av råg minskade processkostnaderna med 4 %, medan en förkortning av snittlängden vid skörd av vete ökade kostnaderna med 7 %.



Figur 53. Kostnader (kr/MWh) för rötning av substratet, uppgradering av biogas till fordonsgaskvalitet och lagring av rötresten för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*).

5.2.5 Produktionskostnader

De totala produktionskostnaderna exkl. markkostnaderna för fordonsgas varierar mellan 514 och 742 kr/MWh (Figur 54). Lägst ligger *fin*hackad råg skördad vid *medium* skördetidpunkt samt *grov*hackat vete, 514-521 kr/MWh).

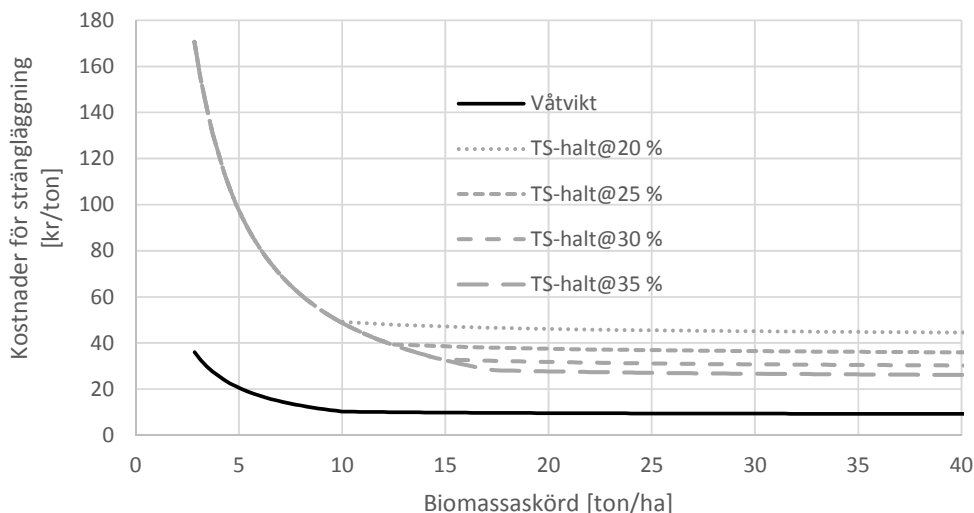


Figur 54. Produktionskostnader (kr/MWh) för uppgraderad fordonsgas för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*). Till höger anges jämförelsedata från en tidigare studie (Björnsson and Lantz, 2013).

För icke-uppgraderad biogas baserad på vall med en avkastning på 9 respektive 7,7 ton TS/ha i 3- respektive 2-skördesystem, presenterades lägre kostnader, 436-457 kr/MWh, i tidigare studier som gäller betydligt mindre anläggningsstorlekar (Dalemo *m fl.*, 1993, Johansson and Fellin, 1995). En senare studie presenterade 30-60 % högre totalkostnader för fordonsgas från vall med en avkastning på 9,1 ton TS/ha i 2-skördesystemet (Björnsson and Lantz, 2013). I samma studie var kostnaden för biogas baserad på rågvete 700 kr/MWh vid en biomassaavkastning på 7,9 ton TS/ha, medan i denna studie blir kostnaden bara något högre, 545-554 kr/MWh, vid samma biomassaavkastning.

5.2.6 Känslighetsanalys – Kostnader

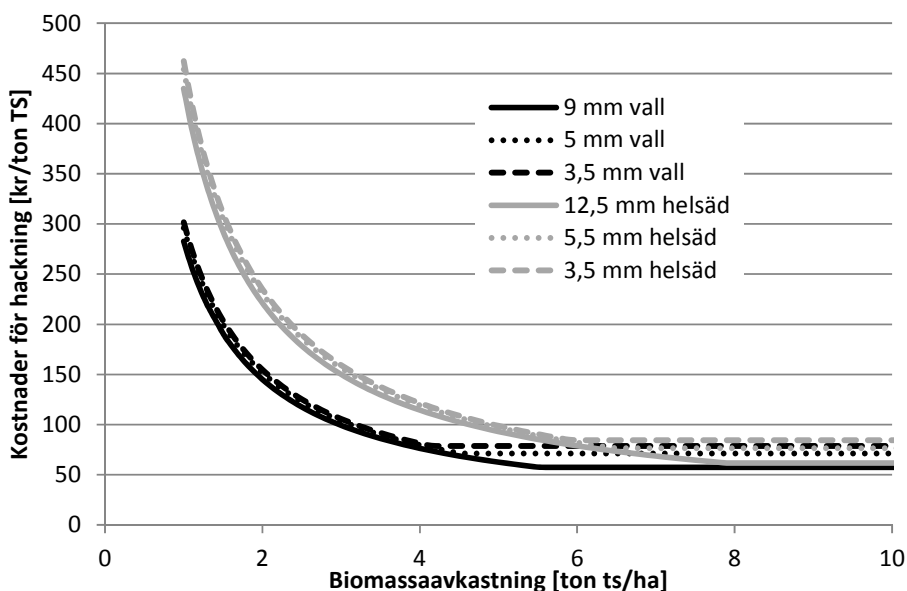
Känslighetsanalyser genomfördes för att visa hur substratkostnaderna påverkas av TS-halten vid avslagning och strängläggning av vall, snittlängden vid hackning av vall och helsäd samt transportvagnarnas storlek. En stigande TS-halt minskar substratkostnaderna räknat per ton torrsbstans (Figur 55). Strängläggning vid 20, 25 och 30 % TS kostar 70, 37 resp. 15 % mer jämfört med strängläggning vid en TS-halt på 35 %, räknat vid fullt utnyttjad maskinkapacitet.



Figur 55. Effekt av biomassaavkastningen på kostnader (kr per ton vätvikt resp. kr per ton torrsvikt) vid olika TS-halter vid strängläggning av vall.

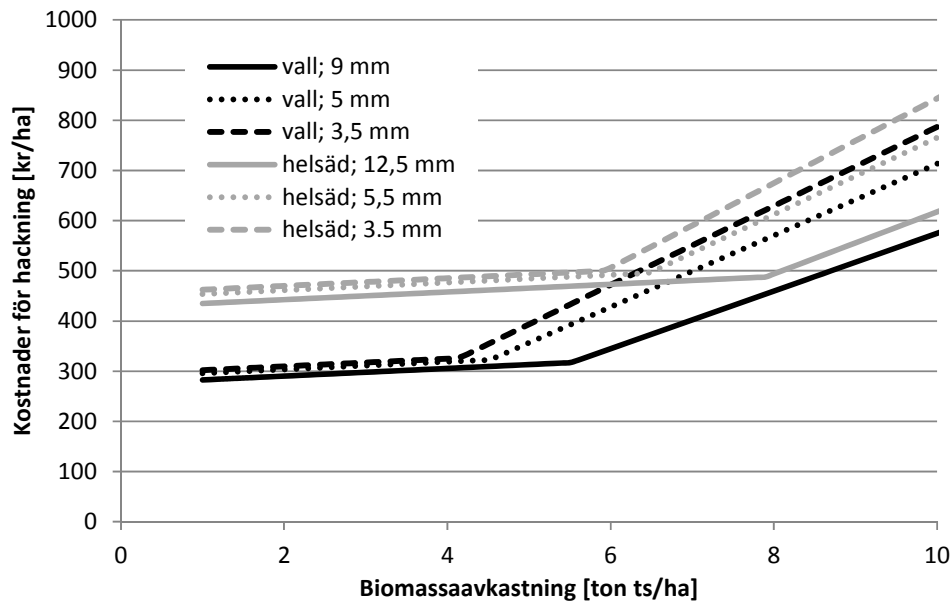
Detta kan vara en anledning till att inte skörda vallen för ofta. Minskas tillväxtperioden mellan skördarna, som i 3-skördesystemet, så sjunker både TS-halten och biomassaavkastningen, vilket resulterar i oproportionellt höga strängläggningskostnader. Detta kompenseras dock av en högre metanpotential hos biomissan.

En finare (kortare) snittlängd leder till stigande hackningskostnader (Figur 56). Kostnaden för hackning av vall och helsäd ökar med 24 respektive 37 % per ton TS för snittlängderna *mellan* respektive *fin*, jämfört med hackning vid *grov* snittlängd. Detta gäller vid fullt utnyttjad maskinkapacitet. Vid biomassaavkastning som understiger fullt utnyttjad maskinkapacitet är merkostnaderna betydligt mindre, 5 och 7 %, för *mellan* resp. *fin* snittlängd, jämfört med hackning vid *grov* snittlängd.



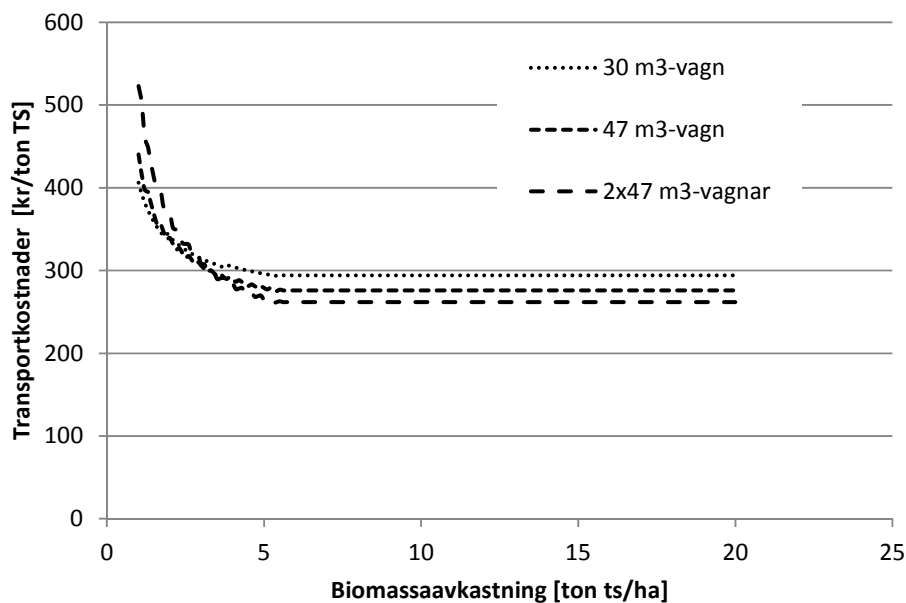
Figur 56. Effekt av biomassaavkastningen på kostnader per ton torrsubstans för hackning av vall och helsäd vid olika snittlängder.

Hackningskostnaderna per hektar påverkas på samma sätt (Figur 57).



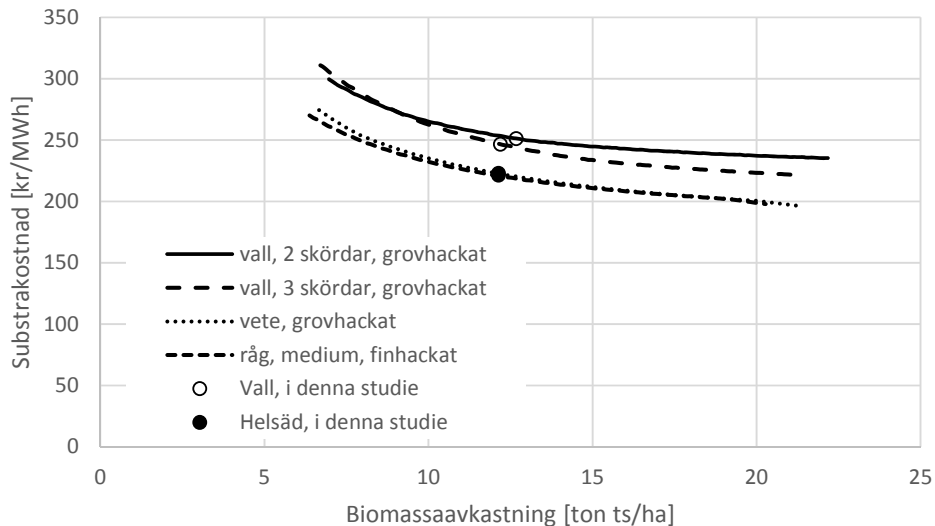
Figur 57. Effekt av biomassaavkastningen på kostnader per hektar för hackning av vall och helsäd vid olika snittlängder.

Transportkostnaderna minskar med större volymkapacitet hos fältvagnarna (Figur 58). Merkostnaderna vid vagnsvolymer på 30 och 47 m³ var 9 resp. 3 % högre jämfört med ekipage med två 47 m³-vagnar.



Figur 58. Transportkostnader (kr/ton TS) vid skörd av vall (9 mm snittlängd) för vagnar med olika lastvolym.

Förändringar i biomassaavkastning per hektar påverkade substratkostnaderna per MWh relativt lite vid skördenivåer över 10 ton TS/ha (Figur 59). En minskning av biomassaavkastningen med 40 % ledde till en fördyring av substratet med 15 % för vall skördad 2 gånger per år, 21 % för vall skördad 3 gånger per år, 17 % för råg, skördad vid skördetidpunkt *medium*, *finhackad*, och 18 % för vete, *grovhackad*.

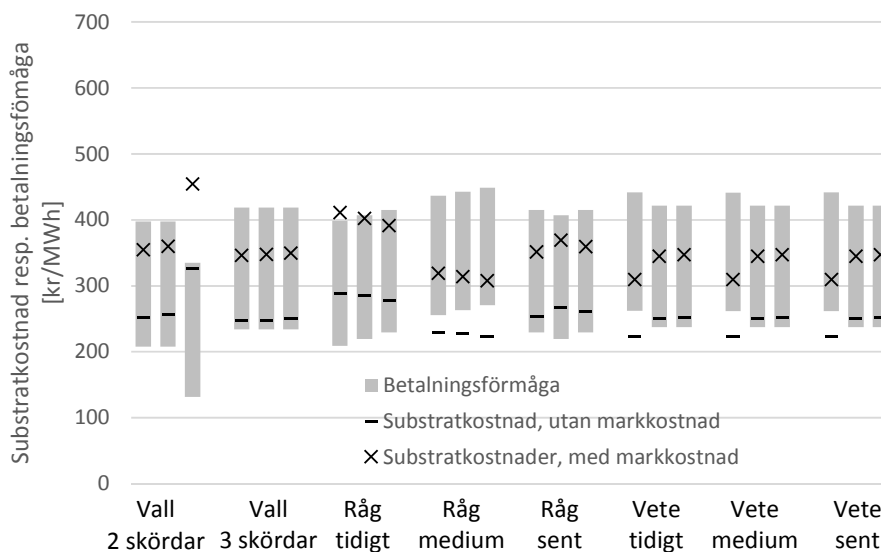


Figur 59. Förändring av substratkostnader exkl. markkostnaderna (kr/MWh) som effekt av förändrad biomassaavkastning per ha i medeltal för alla snittlängdsinställningar och utvalda skördetidpunkter/snittlängdsinställningar.

Ökning av biomassaavkastning med 40 % resulterade i en minskning av substratkostnaderna med 4, 7, 7 respektive 7 % för grödorna nämnda ovan. Utan förändringar i biomassaskörd är råg, *finhackad* vid skördetidpunkt *medium* samt vete, *grovhackad*, billigast, 223-224 kr/MWh. *Grovhackad* vall skördad 3 gånger per år och *grovhackad* vall skördad 2 gånger per år är 24 respektive 28 kr/MWh (11 resp. 13 %) dyrare.

5.2.7 Betalningsförmåga

Betalningsförmågan täckte substratkostnaderna exkl. markkostnad för alla grödor oavsett snittlängd för de betingelser som undersöktes i studien (Figur 60). Inkluderas markkostnaden så är vissa alternativ inte ekonomiskt hållbara, t.ex. *finhackad* vall i 2-skördesystem. Bästa förutsättningar har råg skördad vid *medium* skördetidpunkt samt *grovhackad* vete.



Figur 60. Substratkostnader (kr/MWh) med och utan markkostnad i förhållande till biogasanläggningens betalningsförmåga för olika grödor, skördetidpunkter samt snittlängder (vänster: *grov*; mitten: *mellan*; höger: *fin*).

6 Övergripande diskussion och slutsatser

6.1 Lämplighet som biogassubstrat

Det har visats i denna studie att vall och helsäd kan ge höga energivinster per hektar. Vid de skördenivåerna som har undersökts i systemstudien hade råg och vete mycket höga energivinster. De undersökta avkastningsnivåerna för helsäd låg runt 12 ton TS/ha, dock har 25-30 % högre avkastningsnivåer demonstrerats (Olanders, 2014). Detta tyder på att helsäd har en mycket stor potential som biogassubstrat. Med tanke på diskussionen kring användning av livsmedelsgrödor i produktion av förnybara fordonsbränslen kommer denna potential dock förmodligen inte att utnyttjas. Detta eftersom enligt det senaste förslaget till regler kring förnybara fordonsbränslen kan en skattebefrielse eller -lättning i framtiden bara erhållas från godkända, så kallade avancerade grödor, som karakteriseras som icke-livsmedelsgrödor med hög lignocellulosahalt (EP, 2015). I dagsläget är biogasproduktionen mycket beroende av att producerat fordonsbränsle får dessa skattelättnader för att överleva ekonomiskt.

Vall har visats kunna leverera höga energivinster, än något mindre än helsäd. Dock ligger de i systemstudien undersökta avkastningsnivåerna för biomassa på en redan mycket hög nivå, jämfört med vad som rapporterats tidigare. Potentialen att öka avkastningen för vall är därmed mer begränsad än för helsäd. Det har också visats att andra årets skördenivåer för vallar kan vara upp till 30 % lägre jämfört med första vallåret (Frankow-Lindberg, 2013). Detta minskar energivinsten respektive höjer totalkostnaden för fordonsgas från vall i 3-skördesystem med 32 respektive 6 %.

Dock får man inte glömma vallens funktion som avbrottsgröda och dess goda egenskaper vad gäller markkolsuppbbyggnad (Björnsson *m fl.*, 2013). En höjning av markkolhalten i marken bidrar med att koldioxid binds in i marken när vallen växer, samtidigt som markens bördighet höjs potentiellt. Dessutom kommer fordonsbränsle producerad av vall förmodligen räknas som andra generationens *avancerade biobränslen*, som är berättigat till skattereduktion samt vars produktion enligt EU-regler under förhandling får räknas dubbelt i den nationella statistiken för produktion av förnybar energi (EP, 2015).

Helsäd av råg och vete hade lägre substratkostnader än vall som biogassubstrat. Fordonsgas baserat på vall var 11 % dyrare än när den baseras på helsäd. Denna skillnad förväntas dock inte växa signifikant även om avkastningsnivåerna för helsäd ökar, enligt diskussion ovan. Detta betyder att vall förblir en mycket intressant råvara till biogasproduktion, inte minst för lantbrukare som behöver vidta åtgärder för att bibehålla jordbruksmarkens mullhalt och bördighet.

De undersökta biogassubstraten hade lägre substratkostnader än betalningsförmågan hos en potentiell biogasanläggning. Under optimala skördebetingelser kan även markkostnaderna täckas. En sämre metanpotential slår dubbelt i biogasprocessen, eftersom den fördyrar både substratproduktionen och biogasprocessen räknat per producerad energienhet. En sämre metanpotential betyder också en mindre nedbrytningsgrad i biogasreaktorn, vilken för energigrödor med en TS-halt på omkring 35 % betyder att vattentillsatsen och energikostnader för dess uppvärmning vid rötning i en omrörd tank ökar.

6.2 Odlingsrelaterade aspekter

Snittlängdsinställningen vid skörd påverkade metanpotentialen signifikant för såväl vall, som för råg och vete. Medan *grov* hackning var den bästa snittlängdsinställningen för att uppnå en hög metanpotential för vall och vete, skulle råg hackas *fin* för att optimera metanpotentialen. Det är oklart vad som orsakat dessa skillnader. Rågen, där *fin*hackning ökade metanpotentialen, skördades senare än vanligt, vid en hög TS-halt. En möjlig förklaring är att metanpotentialen av en mer mogen gröda påverkas positivt av *fin* hackning, medan en mindre mogen gröda påverkas negativt, till exempel eftersom flyktiga ämnen, som finns i större utsträckning i omogna grödor, går förlorade vid skörden. Däremot kan metanpotentialen hos en mogen gröda förbättras, när kärnorna hackas sönder i större utsträckning. Mognadsgraden hos grödorna vid skörden kan alltså vara en annan faktor som förmodligen påverkade metanpotentialen. Detta är ett mycket viktigt och intressant resultat som delvis stöds i andra studier. Upplösningen av skördetidsintervaller och olika snittlängdsinställningar i denna studie har varit begränsade pga de höga kostnaderna för metanpotentialbestämningar. En annan begränsning av studien var att skördetidpunkter inte kunde läggas vid samma mognadsgrader för råg och vete. Det bör därför undersökas mer ingående vad som orsakar skillnaderna och hur detta kan utnyttjas för att optimera metanavkastningen från hackade grödor.

Snittlängdsinställningarna påverkade metanpotentialen, dieselåtgången och skördekapaciteten, vilket direkt påverkade substratkostnaderna. Effekten av en merförbrukning av diesel vid *fin*hackning hos råg överlagrades dock av effekten av en högre metanpotential, både när det gäller energivinst och ekonomiskt resultat.

I de biogasprojekt som SLU Alnarp genomfört under tidigare år har vi noterat svårigheten att få maskinentreprenörerna till att ställa om sina exakthackar till kortare snittlängd vid exakthackning av biogasvallar och helsäd, eftersom det normalt kräver fler knivar i hacktrumman jämfört med exakthackning av vall till grovfoder. Detta är ett allvarligt problem för biogasområdet så länge marknaden för hackning av biogasvallar är så mycket mindre än hackning av vall till djurfoder.

För vällen har det visats att 3 skördar per år resulterar i högre metanpotential och lägre substratkostnader jämfört med systemet med 2 skördar per år, även om biomassaavkastningen inte ökar. En fjärde skörd per år kan dock inte anses vara relevant för vallodling till biogassubstrat i Sverige, eftersom det inte finns några tecken på att metanpotentialen då skulle höjas ytterligare.

6.3 Slutsatser

Sammanfattningsvis kan följande slutsatser dras:

- Helsäd av råg och vete har en överlägsen potential som biogasgröda i södra Sverige.
- Vall är en bra biogasgröda med höga biomassa- och energiskördar i 3-skördesystem
- Potentialen till att öka avkastningen hos vall på motsvarande sätt som för helsädesproduktionen som ses som låg.
- Snittlängden påverkar metanpotentialen, dock är det oklart varför resultaten skiljer sig för råg med högre TS-halt och vete med lägre TS-halt. Det behövs fler detaljstudier som undersöker mekanismerna bakom de resultat som presenterats här samt sätter det i samband med skördetidpunkten, t.ex. med grödans mognadsgrad och TS-halt som faktorer.

7 Referenser

- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Machmüller, A., Hopfner-Sixt, K., Bodiroza, V., Hrbek, R., Friedel, J., Plötsch, E., Wagenristl, H., Schreiner, M. and Zollitsch, W. (2007) Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology* 98: 3204-3212.
- Amon, T., Kryvoruchko, V., Amon, B., Bodiroza, V., Zollitsch, W. and Boxberger, J. P., Erich (2005) Biogas Production from Grassland Biomass in the Alpine Region. *Landtechnik* 60(6): 336-337.
- Bauer, A., Leonhartsberger, C., Lyson, D., Hopfner-Sixt, K., Bodiroza, V., Simic, V., Amon, B. and Amon, T. (2008). The role of biogas production in sustainable biofuels based biorefinery concepts. 13th RAMIRAN International Conference Albena, Bulgaria, "Nikola Poushkarov" Institute of Soil Science and Institute of Animal Sciences: 310-313.
- BCS (2002). Chapter 9 - Limestone and crushed rock. Energy and environmental profil of the U.S. mining industry: 12.
- Berglund, K., Berglund, M., Berglund, Ö., Gissén, C., Hald, A. B., Hedberg-Fält, P., Helander, I., Larsen, S. U., Lundegrén, J., Loerke, P. E., Nielsen, L., Stefanek, K., Stubsgaard, A., Svensson, S.-E., Jørgensen, T. V. and Wennerberg, P. (2012). Evalueringsrapport Marginale Jorder och Odlingssystem. J. Lundegrén. Aarhus, Denmark, Agrotech.
- Berglund, M. and Börjesson, P. (2006) Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. *Biomass and Bioenergy* 30(3): 254-266.
- Bernesson, S., Nilsson, D. and Hansson, P.-A. (2004) A limited LCA comparing large- and small-scale production of rape methyl ester (RME) under Swedish conditions. *Biomass & Bioenergy* 26: 545-559.
- Bioenergiportalen. (2011). "Spara energi vid slåtter av vall." from <http://www.bioenergiportalen.se/?p=5713&pt=7>.
- Björnsson, L. and Lantz, M. (2013). Energigrödor för biogasproduktion - Del 2 - Kostnadseffektivitet och styrmedel. Lund University, Sweden, Dept. of Technology and Society: 24.
- Björnsson, L., Prade, T., Lantz, M., Börjesson, P., Svensson, S.-E. and Eriksson, H. (2013). Impact of biogas crop production on greenhouse gas emissions, soil organic matter and food crop production – A case study on farm level. Sweden, Report No 2013:27, f3 - The Swedish Knowledge Centre for Renewable Transportation Fuels and Foundation: 79.
- Bryant, M. P. (1973) Nutritional requirements of the predominant rumen cellulolytic bacteria. *Federation Proceedings of the Federation of American Societies for Experimental Biology* 32: 1809-1813.
- Börjesson, P. (1996) Energy analysis of biomass production and transportation. *Biomass & Bioenergy* 11(4): 305-318.
- Börjesson, P. (2004). Energianalys av drivmedel från spannmål och vall. Lund, Sweden, Department of Technology and Society. Lund University: 26.

- Börjesson, P. and Berglund, M. (2003). Miljöanalys av biogassystem. Lund, Sweden, Department of Technology and Society, Lund University: 79.
- Börjesson, P., Lantz, M., Prade, T. and Björnsson, L. Energy crop-based biogas as vehicle fuel – impact of crop selection on energy and greenhouse gas efficiency. Submitted to Biomass & Bioenergy.
- Börjesson, P., Prade, T., Lantz, M. and Björnsson, L. (2015) Energy crop-based biogas as vehicle fuel – impact of crop selection on energy and greenhouse gas performance. Energies 8(6): 6033-6058.
- Börjesson, P. and Tufvesson, L. M. (2011) Agricultural crop-based biofuels - resource efficiency and environmental performance including direct land use changes. Journal of Cleaner Production 19(2-3): 108-120.
- Carlsson, G. and Huss-Danell, K. (2003) Nitrogen fixation in perennial forage legumes in the field. Plant and Soil 253(2): 353-372.
- Chynoweth, D. P., Turick, C. E., Owens, J. M., Jerger, D. E. and Peck, M. W. (1993) Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. Biomass and Bioenergy 5(1): 95-111.
- Dalemo, M., Edström, M., Thyselius, L. and Brodin, L. (1993). Biogas ur vallgrödor. Ultuna, Sweden, Jordbrukstekniska institutet: 104.
- Dalgaard, T., Halberg, N. and Porter, J. R. (2001) A model for fossil energy use in Danish agriculture used to compare organic and conventional farming. Agriculture Ecosystems & Environment 87: 51-65.
- Davidson, K. (2011). Sverige behöver stimulans till aktivt brukande. Land Lantbruk. Stockholm, Sweden, LRF Media AB.
- Davis, J. and Haglund, C. (1999). Life cycle inventory (LCI) of fertiliser production - Fertiliser products used in Sweden and Western Europe. Gothenburg, Sweden, Chalmers University of Technology: 112.
- DIN (1991). Agricultural tractors and machinery; trailer dimensions; towing device, coupling, transport volume. Berlin, Tyskland, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN 11741.
- Dragulescu, A. A. (2011). xlsx: Read, write, format Excel 2007 and Excel 97/2000/XP/2003 files. R package version 0.3.0.
- Edström, M., Forsberg, M. and Johansson, C. (2007). Energiutbyte från åkergrödor – några exempel från odling till användning. Uppsala, Sweden, Institutet för jordbruks- och miljöteknik: 12.
- Edström, M., Jansson, L.-E., Lantz, M., Johansson, L.-G., Nordberg, U. and Nordberg, Å. (2008). Gårdsbaserad biogasproduktion - System, ekonomi och klimatpåverkan. Uppsala, Institute för jordbruks- och miljöteknik: 78.
- EP (2015). Amendments after 2nd reading. European Parliament. Brussel, Belgium. A8-0025/2015.
- FNR (2013). Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. Gülzow-Prüzen, Tyskland, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
- Fogelfors, H. (2001). Växtproduktion i jordbruket. Borås, Sweden, Natur och Kultur.

- Frankow-Lindberg, B. (2013). Tre eller fyra skördar av vallen? - Skåneförsök. Uppsala, Sveriges lantbruksuniversitet: 4.
- Gissén, C., Prade, T., Kreuger, E., Nges, I. A., Rosenqvist, H., Svensson, S.-E., Lantz, M., Mattsson, J. E., Börjesson, P. and Björnsson, L. (2014) Comparing energy crops for biogas production – Yields, energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilisation. *Biomass and Bioenergy* 64(0): 199-210.
- Graves, S., Piepho, H.-P. and Selzer, L. (2011). multcompView: Visualizations of Paired Comparisons. R package version 0.1-3.
- Green, M. B. (1987). Energy in Pesticide Manufacture, Distribution and Use. Energy in Plant Nutrition and Pest Control. Z. R. Helsel. New York, USA, Elsevier. 2: 165-178.
- Gunnarsson, C., Nilsson-Linde, N. and Spörndly, R. (2014). Två, tre eller fyra skördar av vallfoder per år. Uppsala, JTI: 30.
- Gunnarsson, C., Spörndly, R., Rosenqvist, H., Sundberg, M. and Hansson, P.-A. (2007). Optimering av maskinsystem för skörd av ensilage med hög kvalitet. Uppsala, Institutionen för biometri och teknik, Sveriges lantbruksuniversitet: 76.
- Hansson, P., Saltzman, I.-L., Bååth Jacobsson, S. and Petersson, P. (2014). Produktionsgrenskalkyler för växtodling - Efterkalkyler för år 2014 - Södra Sverige, Hushållningssällskapen Kalmar-Kronoberg-Blekinge, Krisitanstad, Malmöhus och Halland: 62.
- Hartmann, J. K. (2006). Life-cycle-assessment of industrial scale biogas plants, University of Göttingen.
- Hedegaard, F., Mikkelsen, m., Nielsen, K. A., Thørgersen, R., Hansen, J. P. and Nielsen, K. V. (2003). Finsnitning af majs - Vurdering af kerneknusningsgrad, snitlængde og kapacitet. Århus, Danmark, Landbrugets Rådgivningscenter: 39.
- Heiermann, M., Ploechl, M., Linke, B., Schelle, H. and Herrmann, C. (2009) Biogas Crops-Part I: Specifications and Suitability of Field Crops for Anaerobic Digestion. *Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal* XI: 1-17.
- Heimer, A. (2004). Kalium i ekologiskt lantbruk. Jönköping, Jordbruksverket: 8.
- Herrmann, C., Heiermann, M., Idler, C. and Prochnow, A. (2012) Particle Size Reduction during Harvesting of Crop Feedstock for Biogas Production I: Effects on Ensiling Process and Methane Yields. *BioEnergy Research* 5(4): 926-936.
- ISO (2006). Environmental management - Lifecycle assessment - requirements and guidelines. SS-EN ISO 14044, Int Standard Org.
- Johansson, W. and Fellin, O. (1995). Biogas från vall. Uppsala, Sweden, Swedish University of Agricultural Sciences: 41.
- Kaparaju, P., Luostarinen, S., Kalmari, E., Kalmari, J. and Rintala, J. (2002) Co-digestion of energy crops and industrial confectionery by-products with cow manure: batch-scale and farm-scale evaluation. *Water Science and Technology* 45(10): 275-280.
- Kelm, M., Wachendorf, M., Trott, H., Volkers, K. and Taube, F. (2004) Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. III. Energy efficiency in forage production from grassland and maize for silage. *Grass and Forage Science* 59: 69-79.

- Kreuger, E., Nges, I. A. and Björnsson, L. (2011) Ensiling of crops for biogas production – Effects on methane yield and total solids determination. *Biotechnology for Biofuels* 4(44).
- KTBL (2005). *Faustzahlen für die Landwirtschaft*. Darmstadt, Germany, KTBL.
- Lantz, M. and Björnsson, L. (2011). *Biogas från gödsel och vall - analys av föreslagna styrmedel*. Lund, Enviro.
- Lantz, M., Ekman, A. and Börjesson, P. (2009). *Systemoptimerad produktion av fordonsgas*. Lund, Sweden, Department of Technology and Society, Lund University: 110.
- Lehmann, T. and Friedrich, E. (2012) Straw instead of field crops. *Landtechnik* 67: 358-360.
- Lehtomäki, A. (2006). Biogas production from energy crops and crop residues, University of Jyväskylä.
- Maskinkalkylgruppen (2014). *Maskinkostnader*. Bjarred, Sweden, Swedish Rural Economy and Agricultural Societies Malmöhus (HIR): 41.
- Maskinkalkylgruppen HIR (2013). *Maskinkostnader 2013*. Bjarred, Sweden, Swedish Rural Economy and Agricultural Societies Malmöhus: 43.
- McDonald, P., Henderson, A. R. and Heron, S. J. E. (1991). *The Biochemistry of Silage*. Marlow, UK, Chalcombe Publications.
- Nilsson-Linde, N. (2004). *Försök med vallfröblandningar*. Uppsala, FältForsk, Sveriges lantbruksuniversitet: 8.
- Nilsson, M., Linné, M. and Dahl, A. (2001). *Livscykelinventering för biogas som fordonsbränsle - Del 2*. Malmö, Svenskt Gasteknisk Center: 36.
- Nordberg, Å. and Edström, M. (1997). *Optimering av biogasprocess för lantbruksrelaterade biomassor*. Uppsala, Sweden, Institutet för jordbruks- och miljöteknik: 48.
- Oehmichen, J., Jacobs, G. and Weyer, T. (2006). *Pflanzenernährung und Düngung. Lehrbuch des Pflanzenbaus*. N. Lütke Entrup and J. Oehmichen. Bonn, Tyskland, Agroconcept. 1: 423-620.
- Olanders, J. (2014). *Helsäd för biogasproduktion*. Malmö, Skånska Biobränslebolaget (SB3): 23.
- Overend, R. P. (1982) The Average Haul Distance and Transportation Work Factors for Biomass Delivered to a Central Plant. *Biomass* 2: 75-79.
- Palmowski, L. and Müller, J. (2000) Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion. *Water Science and Technology* 41(3): 155-162.
- Persson, M. (2003). *Utvärdering av uppgraderingstekniker för biogas*. Malmö, Svenskt Gastekniskt Center: 85.
- Pettersson, O., Sundberg, M. and Westlin, H. (2009). *Maskiner och metoder i vallodling. JTI-rapport Lantbruk & Industri 377*. Uppsala, JTI- Institutet för jordbruks- och miljöteknik: 33.
- Prade, T., Svensson, S.-E., Kreuger, E., Mattsson, J. E., Carlsson, G. and Englund, J.-E. (2014). *Vall som biogassubstrat – utvärdering av skördesystemets och odlingsintensitetens påverkan på biogasutbytet. Rapportserie Landskapsarkitektur, trädgård, växtproduktionsvetenskap*. Alnarp, Inst. för biosystem och teknologi, SLU. 2014:8: 30.

- Prade, T., Svensson, S.-E. and Mattsson, J. E. (2012) Energy balances for biogas and solid biofuel production from industrial hemp. *Biomass & Bioenergy* 40: 36-52.
- Prade, T., Svensson, S.-E., Mattsson, J. E., Carlsson, G., Björnsson, L., Börjesson, P. and Lantz, M. (2013) EU sustainability criteria for biofuels potentially restrict ley crop production on marginal land for use as biogas substrate. *Grassland Science in Europe* 18: 528-530.
- Prusinski, J. R., Marceau, M. L. and VanGeem, M. G. (2004). Life cycle inventory of slag cement concrete. 8th CANMET/ACI- International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI.
- R Development Core Team (2011). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing.
- Reinhardt, G. A. (1993). Energie- und CO₂-Bilanzierung nachwachsender Rohstoffe. Braunschweig/Wiesbaden, Germany, Vieweg.
- Rincón, B., Banks, C. J. and Heaven, S. (2010) Biochemical methane potential of winter wheat (*Triticum aestivum* L.): Influence of growth stage and storage practice. *Bioresource Technology* 101(21): 8179-8184.
- Rosenberger, A., Kaul, H. P., Senn, T. and Aufhammer, W. (2001) Improving the energy balance of bioethanol production from winter cereals: the effect of crop production intensity. *Applied Energy* 68(1): 51-67.
- Rosenqvist, H. (2010). Kalkylmetodik för lönsamhetsjämförelser mellan olika markanvändning. Stockholm, Värmeforsk: 107.
- Rosenqvist, H., Nilsson, D. and Bernesson, S. (2014). Kostnader och lönsamhet för odling av energigräs på marginell jordbruksmark. Uppsala, Institutione för energi och teknik, Sveriges lantbruksuniversitet: 106.
- Rylander, H. and Wiqvist, W. (2010). Biogödselhandbok – Biogödsel från storskaliga biogasanläggningar, Avfall Sverige.
- Salter, A. and Banks, C. J. (2009) Establishing an energy balance for crop-based digestion. *Water Science and Technology* 59(6): 1053-1060.
- SCB (2013). Markanvändningen i Sverige. Stockholm, Sweden, Statistics Sweden: 202.
- SCB (2015). Jordbruksmarkens användning 2014. Stockholm, Sweden, Statistics Sweden: 38.
- Scharmer, K. and Gosse, G. (1996). Ecological impact of biodiesel production and use in europe. Proceedings of the 2nd European Motor Biofuels Forum, Graz, Austria.
- Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A. and Rintala, J. (2009) Biogas production from boreal herbaceous grasses – Specific methane yield and methane yield per hectare. *Bioresource Technology* 100(12): 2952-2958.
- SJV. (2010). "Jordbruksverkets produktlista." Retrieved 2014-08-08, from <http://www.jordbruksverket.se/download/18.773c089e128e1620fa5800087307/1370041066727/Produktlista100610.pdf>.
- SJV (2012). Gödselmedel för ekologisk odling. Specialgödselmedel och stallgödsel. Jönköping, Jordbruksverket: 12.
- SJV (2013). Riktlinjer för gödsling och kalkning 2014. B. Albertsson. Jönköping, Sweden, Swedish Board of Agriculture: 90.
- SJV (2014). Kalkyler för energigrödor. Jönköping, Jordbruksverket: 28.

- Smyth, B. M., Murphy, J. D. and O'Brien, C. M. (2009) What is the energy balance of grass biomethane in Ireland and other temperate northern European climates? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(9): 2349-2360.
- SPINE LCI dataset #11294 (1996). Ore-based steel production. Chalmers - Center for Environmental Assessment of Product and Material Systems.
- SPINE LCI dataset #115611 (1993). Extraction to polyethylene all grades APME. Chalmers - Center for Environmental Assessment of Product and Material Systems.
- Spörndly, R. (2015). Personlig meddelande ang. *Tillväxtstart vall 2012 i Helsingborg*. T. Hörndahl, Avd. för fodervetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet. 18 maj 2015.
- Strid, I., Gunnarsson, C., Karlsson, H., Edström, M. and Bertilsson, J. (2012). Mer och bättre vall till mjölkproduktion och återväxtvall till biogas. Uppsala, Institutionen för energi och teknik, Sveriges lantbruksuniversitet: 88.
- Särholm, M. (2011). Biogasproduktion från vall - Analys av metanpotential samt energi- och miljösystemanalys. Master examensarbete, Lund Tekniska Högskola.
- Urban, W., Girod, K. and Lohmann, H. (2008). Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007-2008. Oberhausen, Tyskland, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik: 121.
- Wells, C. (2001). Total Energy Indicators of Agricultural Sustainability: Dairy Farming Case Study. Otago, New Zealand, Department of Physics, University of Otago: 90.
- Vågström, L. (2005). Evaluation of a handling system for ley crop used in biogas production. Uppsala, Sweden, Institutet för jordbruks- och miljöteknik: 44.

Bilaga

Tabell 20. Primärenergifaktorer och energiekvivalenter för produktionsmedel

Produktionsmedel	Enhet	Energiekvivalent		Referenser
		Använd	Litteratur	
Diesel, energiinnehåll	MJ/L	37,4	35,9 – 38,7	(Reinhardt, 1993, Davis and Haglund, 1999, Dalgaard <i>m fl.</i> , 2001, Kelm <i>m fl.</i> , 2004, Berglund and Börjesson, 2006)
Diesel, indirekt energianvändning	MJ/MJ	0,2 ^a	0,10 – 0,27	(Reinhardt, 1993, Scharmer and Gosse, 1996, Dalgaard <i>m fl.</i> , 2001, Bernesson <i>m fl.</i> , 2004, Börjesson, 2004, Kelm <i>m fl.</i> , 2004)
Mineralgödsel N	MJ/kg	45,0 ^b	37,5 – 70,0	(Reinhardt, 1993, Börjesson, 1996, Dalgaard <i>m fl.</i> , 2001, Rosenberger <i>m fl.</i> , 2001, Wells, 2001, Berglund and Börjesson, 2006, Smyth <i>m fl.</i> , 2009)
P	MJ/kg	25,0 ^b	7,9 – 39,9	(Reinhardt, 1993, Börjesson, 1996, Dalgaard <i>m fl.</i> , 2001, Rosenberger <i>m fl.</i> , 2001, Wells, 2001, Berglund and Börjesson, 2006, Smyth <i>m fl.</i> , 2009)
K	MJ/kg	5,0 ^b	4,8 – 12,6	(Reinhardt, 1993, Börjesson, 1996, Dalgaard <i>m fl.</i> , 2001, Rosenberger <i>m fl.</i> , 2001, Wells, 2001, Berglund and Börjesson, 2006, Smyth <i>m fl.</i> , 2009)
Byggmaterial				
Stål	MJ/kg	17,5		(SPINE LCI dataset #11294, 1996)
Betong	GJ/m ³	2,0		(Prusinski <i>m fl.</i> , 2004)
Plast	MJ/kg	85,8		(SPINE LCI dataset #115611, 1993)

^a (Lantz *m fl.*, 2009).

^b Dessa värde representerar den nuvarande trenden av stigande energieffektivitet i kvävegödselproduktionen och den stigande energibehov för fosforgödselproduktionen (Börjesson and Tufvesson, 2011).

Tabell 21. Maskinspecifikationer för skördeberoende arbetsmoment. Det antogs att en 120 kW-traktor användes för strängläggning i vall och transporten av vall och helsäd till biogasanläggningen. Datakälla: Maskinkalkylgruppen (Maskinkalkylgruppen, 2014)

Arbetsmoment	Maskin		Vikt ^a [kg]	Effekt/effektbehov [kW]	Livslängd [a]	Indirekt energi [MJ/(ha*a)]
<i>Traktor</i>	Traktor	-	6300	120	10	33
<i>Vall</i>						
Strängläggning	Slätterkombination	AB 8,3 m	3200	120	10	10
Hackning	Exakthack med pick-up	effektiv AB 8,3m	14900	610	10	119
Transport till lagring	50 m ³ fältvagn		9500	120	8	30 / 60 a
Kompaktering i silon / Inmatning i biogasreaktorn	Lastmaskin, midjestyrd	Skopa 4,1 m ³	12400	150	15	3 / 7 a

^a Gäller för vall / helsäd

Tabell 22. Maskinspecifikationer för skördeberoende arbetsmoment. Det antogs att en 140 kW-traktor användes för alla arbetsmoment. Datakälla: Maskinkalkylgruppen (2014)

Arbetsmoment	Maskin	Arbets- bredd [m]	Vikt ^a [kg]	Effekt/effekt- behov [kW]	Dieselför- brukning [L/ha]	Årlig användning [h/a]	Omgångar [1/a]	Livs- längd [a]	Indirekt energi [MJ/(ha*a)]
<i>Traktor</i>	Traktor	-	7200	140	se nedan	850	-	10	38
<i>Vall</i>									
Sådd	Såmaskin, 2200 L	6	5500	90	4.7	130	0,5 ^b	12	43
Vältning	Vält	12	5600	80	2.3	70	1	15	35
Spridning av mineralgödsel	Konstgödselspridare, buren	24	800	80	2.3	110	2 / 3 ^c	12	4
<i>Helsäd</i>									
Stubbearbetning	Tallrikskultivator (disc och vält)	5	2100	140	5.7	260	1	10	8
Plöjning	Plog, delburen	2.5	2000	120	17.5	240	1	8	49
Harvning	Harv, bogserad	8.3	2600	140	4.2	130	2	10	16
Sådd	Såmaskin, 2200 L	6	5500	90	4.7	130	1	12	43
Vältning	Vält	12	5600	80	2.3	70	1	15	35
Spridning av mineralgödsel	Konstgödselspridare, buren	24	800	80	2.3	110	3	12	4
Pesticidsprutning	Spruta, bogserad	36	4100	110	1.2	320	1	8	5

^a Vikten för exempelmaskiner som matchar de parameter som anges för arbetsmomenten.

^b Det antas att vallen ligger två år i växtföljden utan att nysådd behövs.

^c Spridning genomförs en gång per skörd, dvs 2 gånger i 2-skördesystemet och 3 gånger i 3-skördesystemet.

Tabell 23. Utsädesrelaterade uppgifter

Utsäde	Enhet	Vall	Helsäd	Referenser
Mängd	[kg/ha]	7,0	180	(Hansson <i>m fl.</i> , 2014, SJV, 2014)
Energikostnad	[MJ/kg]	19,4	9,1	(Gissén <i>m fl.</i> , 2014)
Kostnad	[kr/kg]	40	4	(Hansson <i>m fl.</i> , 2014, SJV, 2014)

Tabell 24. Uppgifter för kalkning och baspesticider vid odling av vall och helsäd

Kalkning och baspesticider			
Kalkning		Krossad kalksten ^a	
Mängd	[kg/ha]	800	
Energikostnad ^b	[MJ/kg]	0,03	
Kostnad	[kr/kg]	0,73	
Baspesticider		Glyfosat	Biowet
Mängd	[L/ha]	3,0	0,3
Energikostnad ^c	[MJ/kg]	104	37
Kostnad	[kr/L]	53	49

^a inkl. transport och spridning

^b Källa: BCS (2002)

^c Beräknat med en energiinsats på 288 MJ/kg aktiv komponent (Green, 1987)

Tabell 25. Uppgifter om pesticider vid odling av helsäd

Pesticider - övriga		Ogräs			Insekt	Svamp		
		Boxer	Legacy	Starane XI	Sumi-alpha	Proline	Comet Pro	Sportak
Mängd	[L/ha]	1,25	0,1	0,8	0,2	0,6	0,25	0,4
Energikostnad ^a	[MJ/kg]	230	144	42	47	49	49	100
Kostnad	[kr/L]	136	732	172	217	637	353	269

^a Beräknat med en energiinsats på 288 MJ/kg aktiv komponent (Green, 1987).

Tabell 26. Energiinsatser vid produktion av vall som biogassubstrat

Antal skördar Snittlängsinställning	2 skördar per år						3 skördar per år					
	grov		mellan		fin		grov		mellan		fin	
	direkt [MJ/ha]	indirekt [MJ/ha]	direkt [MJ/ha]	indirekt [MJ/ha]	direkt [MJ/ha]	indirekt [MJ/ha]	direkt [MJ/ha]	indirekt [MJ/ha]	direkt [MJ/ha]	indirekt [MJ/ha]	direkt [MJ/ha]	indirekt [MJ/ha]
<i>Produktionsmedel</i>												
Minderalgödsel N		10578		10578		10578		10253		10253		10253
Minderalgödsel P		294		294		294		283		283		283
Minderalgödsel K		764		764		764		723		723		723
Utsäde		115		115		115		115		115		115
Pesticider		322		322		322		322		322		322
Kalkning		22		22		22		22		22		22
<i>Fältarbetsmoment</i>												
Sådd	87	58	87	58	87	58	87	58	87	58	87	58
Kompaktering	87	90	87	90	87	90	87	90	87	90	87	90
Mineralgödselspridning	175	119	175	119	175	119	262	179	262	179	262	179
Stränggläggning 1	408	124	408	124	408	124	260	95	260	95	260	95
Stränggläggning 2	198	82	198	82	198	82	255	94	255	94	255	94
Stränggläggning 3							187	80	187	80	187	80
Hackning 1	661	251	841	287	938	306	465	212	515	222	553	229
Hackning 2	494	217	610	241	681	255	479	215	553	229	617	242
Hackning 3							428	204	478	214	500	219
Transport till biogasanläggning 1	420	383	436	342	476	350	257	293	257	293	260	287
Transport till biogasanläggning 2	304	347	317	318	346	324	277	316	287	312	290	293
Transport till biogasanläggning 3							203	232	203	232	203	232
Kompaktering i silo 1	89	21	89	21	89	21	52	13	52	13	52	13
Kompaktering i silo 2	65	16	65	16	65	16	58	15	58	15	58	15
Kompaktering i silo 3							37	10	37	10	37	10
Inmatning i biogasanläggningen 1	139	31	139	31	139	31	82	19	82	19	82	19
Inmatning i biogasanläggningen 2	101	23	101	23	101	23	92	21	92	21	92	21
Inmatning i biogasanläggningen 3							57	14	57	14	57	14
<i>Lagring</i>												
Plansilo		88		88		88		84		84		84
Täckningsplast		202		202		202		194		194		194
Total	3229	14148	3553	14136	3791	14184	3626	14155	3808	14185	3938	14186

Tabell 27. Energiinsatser vid produktion av råg som biogassubstrat

Skördetidpunkt Snittlängsinställning	tidigt						medium						sent					
	grov		mellan		fin		grov		mellan		fin		grov		mellan		fin	
	direk t [MJ/ ha]	indir ekt [MJ/ ha]	direk t [MJ/ ha]	indir ekt [MJ/ ha]	direk t [MJ/ ha]	indir ekt [MJ/ ha]	direk t [MJ/ ha]	indir ekt [MJ/ ha]	direk t [MJ/ ha]	indir ekt [MJ/ ha]	direk t [MJ/ ha]	indir ekt [MJ/ ha]	direk t [MJ/ ha]	indir ekt [MJ/ ha]	direk t [MJ/ ha]	indir ekt [MJ/ ha]	direk t [MJ/ ha]	indir ekt [MJ/ ha]
<i>Produktionsmedel</i>																		
Minderalgödsel N		7773		7773		7773		7773		7773		7773		7773		7773		7773
Minderalgödsel P		332		332		332		384		384		384		384		384		384
Minderalgödsel K		718		718		718		882		882		882		882		882		882
Utsäde		609		609		609		609		609		609		609		609		609
Pesticider		749		749		749		749		749		749		749		749		749
Kalkning		22		22		22		22		22		22		22		22		22
<i>Fältarbetsmoment</i>																		
Stubbearbetning	212	88	212	88	212	88	212	88	212	88	212	88	212	88	212	88	212	88
Plöjning	655	218	655	218	655	218	655	213	655	213	655	213	655	213	655	213	655	213
Harvning	314	170	314	170	314	170	314	170	314	170	314	170	314	170	314	170	314	170
Sådd	175	106	175	106	175	106	175	106	175	106	175	106	175	106	175	106	175	106
Kompaktering	87	78	87	78	87	78	87	78	87	78	87	78	87	78	87	78	87	78
Mineralgödselspridning	262	76	262	76	262	76	262	76	262	76	262	76	262	76	262	76	262	76
Pesticidsprayning	44	33	44	33	44	33	44	33	44	33	44	33	44	33	44	33	44	33
Hackning	942	307	1198	358	1337	386	1096	338	1394	397	1556	430	1096	338	1394	397	1556	430
Transport till biogasanläggningen	471	441	497	393	509	377	504	419	524	371	553	368	519	431	560	397	572	381
Kompaktering i silon Inmatning i biogasanläggningen	127	32	127	32	127	32	147	36	147	36	147	36	147	36	147	36	147	36
199	47	199	47	199	47	231	53	231	53	231	53	231	53	231	53	231	53	231
<i>Lagring</i>																		
Plansilo		73		73		73		84		84		84		84		84		84
Täckningsplast		167		167		167		193		193		193		193		193		193
Total	3487	12039	3769	12043	3920	12055	3726	12307	4044	12319	4234	12348	3741	12320	4080	12345	4254	12361

Tabell 28. Energiinsatser vid produktion av vete som biogassubstrat

Skördetidpunkt Snittlängsinställning	tidig				medium				sent										
	grov		mellan		fin		grov		mellan		fin		grov		mellan		fin		
	direkt	indire	direkt	indire	direkt	indire	direkt	indire	direkt	indire	direkt	indire	direkt	indire	direkt	indire	direkt	indire	
	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]	[MJ/h a]
<i>Produktionsmedel</i>																			
Minderalgödsel N		7773		7773		7773		7773		7773		7773		7773		7773		7773	
Minderalgödsel P		384		384		384		384		384		384		384		384		384	
Minderalgödsel K		882		882		882		882		882		882		882		882		882	
Utsäde		609		609		609		609		609		609		609		609		609	
Pesticider		749		749		749		749		749		749		749		749		749	
Kalkning		22		22		22		22		22		22		22		22		22	
<i>Fältarbetsmoment</i>																			
Stubbearbetning	212	88	212	88	212	88	212	88	212	88	212	88	212	88	212	88	212	88	212
Plöjning	655	213	655	213	655	213	655	213	655	213	655	213	655	213	655	213	655	213	655
Harvning	314	170	314	170	314	170	314	170	314	170	314	170	314	170	314	170	314	170	314
Sådd	175	106	175	106	175	106	175	106	175	106	175	106	175	106	175	106	175	106	175
Kompaktering	87	78	87	78	87	78	87	78	87	78	87	78	87	78	87	78	87	78	87
Mineralgödelspridning	262	76	262	76	262	76	262	76	262	76	262	76	262	76	262	76	262	76	262
Pesticidsprayning	44	33	44	33	44	33	44	33	44	33	44	33	44	33	44	33	44	33	44
Hackning	1096	338	1394	397	1556	430	1096	338	1394	397	1556	430	1096	338	1394	397	1556	430	1096
Transport till biogasanläggningen	504	419	542	384	553	368	504	419	542	384	553	368	504	419	542	384	553	368	504
Kompaktering i silon	147	36	147	36	147	36	147	36	147	36	147	36	147	36	147	36	147	36	147
Inmatning i biogasanläggningen	231	53	231	53	231	53	231	53	231	53	231	53	231	53	231	53	231	53	231
<i>Lagring</i>																			
Plansilo		84		84		84		84		84		84		84		84		84	
Täckningsplast		193		193		193		193		193		193		193		193		193	
Total	3726	12307	4062	12332	4234	12348	3726	12307	4062	12332	4234	12348	3726	12307	4062	12332	4234	12348	

