

Transport och energibalanser för restbiomassa

Udarbejdet af Klimatstrategerna Helsingborg AB



Transport och energibalanser för restbiomassa

– En systemanalys av logistik
och klimatpåverkan



Författare:

Michael Johansson

Klimatstrategerna Helsingborg AB

December 2025

Förord

Denna rapport har utarbetats av Klimatstrategerna i Helsingborg AB, ett konsultföretag med inriktning på klimatstrategiska tjänster såsom klimat- och miljörelaterad rådgivning, klimatredovisning och rapportering. Arbetet bygger på en systematisk genomgång och analys av tidigare publicerade källor, med syftet att tillhandahålla ett kunskapsunderlag som kan stödja fortsatt diskussion, reflektion och beslutsfattande inom området.

Rapporten behandlar komplexa och dynamiska frågeställningar där det vetenskapliga kunskapsläget är under kontinuerlig utveckling. Författaren har eftersträvat en hög grad av objektivitet och transparens i analysen, men är medveten om att val av källor, antaganden och analytiska perspektiv kan påverka tolkningar och slutsatser. Alla slutsatser och rekommendationer som presenteras är författarens egna och baseras på den information som var tillgänglig vid tidpunkten för studiens genomförande. Även om stor omsorg har lagts vid att säkerställa korrekthet och relevans i det använda källmaterialet, kan fel i ursprungskällorna eller förändringar i det faktiska kunskapsläget påverka rapportens giltighet över tid.

Rapporten är inte avsedd att ersätta professionell rådgivning eller beslutsunderlag som baseras på uppdaterad och kontextspecifik information. Användare av rapporten uppmanas därför att kritiskt granska innehållet och vid behov komplettera med ytterligare analyser eller expertutlåtanden.

Bilden på framsidan illustrerar titeln "*Transport och energibalanser för restbiomassa – En systemanalys av logistik och klimatpåverkan*". Den visar ett sammanhang där restbiomassa transporteras för att på olika sätt användas som närings- och/eller energiresurs.

Populärvetenskaplig sammanfattning (svenska)

I omställningen till ett klimatneutralt samhälle är restbiomassa som till exempel halm, vallgräs, tång, ålgräs och hästgödsel värdefulla resurser som kan omvandlas till jordförbättringsmedel eventuellt i kombination med utvunnen biogas från rötningsprocesser. Den här rapporten analyserar hur långt sådana restflöden kan transporteras till förädlingsanläggningar (till exempel biogasanläggningar) innan kostnaden och energiförbrukningen i transporten äter upp vinsten från den producerade bioenergin.

Huvudresultaten är tydliga: Biomassa skiljer sig mycket åt i energiinnehåll och transportegenskaper. Halm, som är relativt torr, kompakt och energirik, tål långa transporter (typiskt upp mot 100 km eller mer) utan att den totala energi- och klimatnyttan försvinner. Vallgräs, om det pressas till balar eller pellets, klarar också hyfsat långa avstånd (vanligtvis 70–100 km).

Tång och andra kustalger är däremot i våt form mycket tunga (upp till 85–90 % vatten) och har lågt nettovärde per transporterad vikt. Därför blir transportenergin snabbt en dominerande kostnad — tång och ålgräs bör i praktiken behandlas nära insamlingsplatsen, för framställning av materialråvara eller kompost, för att vara klimatmässigt och energimässigt motiverat. Vid lokal kompostering, t ex i kompostmaskin, av alger, långt gräs, halm eller andra växtrester minskar vikten till ca 30 % av den ursprungliga, och energivinster görs i samband med transporten. Detta beror på såväl nedbrytning av det organiska materialet som en reduktion av vattenhalten.

Rapporten visar att flera åtgärder kan förbättra hållbarheten: komprimering/pelletering, lokal förbehandling (avvattning/torkning), kompostering, samlastning, och tvåvägstransporter (till exempel foder in — kompost ut). Dessutom är det viktigt att väga in icke-energetiska värden, som minskad övergödning om tång skördas, eller förbättrad jordhälsa av kompost eller rötrest. Dessa kan motivera offentligt stöd. Ur beredskapsskäl är det vidare viktigt att lokalt återvinna näringsämnen genom t ex kompost eller rötrest för att ersätta importerade handelsgödselmedel.

Praktisk rekommendation: planera systemlösningar lokalt, för tång krävs i regel kustnära kompostering eller snabb avvattning; för halm och pressat gräs är regional samordning (terminaler, tåg/båt för längre sträckor) ekonomiskt fördelaktigt. För beslutsfattare innebär detta att prioriterade investeringar i lokal förbehandling, som t ex maskinell kompostering, och logistikinfrastruktur kan öka den verkliga klimatnyttan av restbiomassa.

Popular-science summary (English)

As societies' transition towards climate neutrality, residual biomass such as straw, harvested grasses, seaweed (macroalgae), horse manure and other organic residues represent important renewable resources. This study investigates how far these residual biomass streams can be transported to processing facilities (e.g., biogas plants) before transport energy and emissions offset the benefits of the energy produced.

Key findings: There are large differences between feedstock types. Straw (baled or pelletised) is low in moisture and energy-dense and therefore tolerates long transport distances (typically up to 100 km or more) while still delivering net climate and energy benefits during biogas production. Harvested perennial grasses (if baled/pelletised) perform moderately well with economically viable radii often between 70–100 km. In contrast, wet seaweed and coastal macroalgae contain very high water content (often >80%) and thus relatively high energy consumption per ton during transportation. Therefore, seaweed should ideally be processed near the coast (dewatering, local composting) to remain climatically viable.

Operational implications: improved logistics (densification, pelletisation), localized treatment and composting, and coordinated transport (use of rail/ship terminals for long hauls) substantially improve outcomes. Non-energy co-benefits such as eutrophication reduction from harvesting excess seaweed, or soil health improvements from digestate, should be included in decision-making and can justify policy support. Also resource and preparedness aspects should be included when it comes to domestic and local composting and nutrient recycling.

The report provides modelled examples and visual tools (CO₂-eqv per kWh vs distance, net energy vs distance) to support planners and policymakers when designing efficient, climate-responsible bio-resource chains.

Innehållsförteckning

Förord	2
Populärvetenskaplig sammanfattning (svenska)	3
Popular-science summary (English)	4
1. Inledning.....	6
1.1. Bakgrund	6
1.2. Problematisering.....	6
1.3. Övergripande transportförutsättningar för alger, långt gräs & halm	7
1.4. Syfte.....	8
1.5. Målsättning.....	8
2. Metod	8
2.1. Forskningsdesign	8
2.2. Systematisk litteraturstudie	9
2.2.1. Databaser och tidsspann.....	9
2.2.2. Sökord (exempel):	9
2.2.3. Urvalskriterier	9
2.2.4. Screening och datainsamling.....	9
2.2.5. Syntes.....	9
2.2.6. Energiberäkningar	9
3. Teoretiska referensramar	10
4. Litteraturstudie och analys	11
4.1. Tidigare studier	11
4.2. Transportlogistik och energieffektivitet.....	12
4.3. Ekonomiska beräkningar och lönsamhet.....	12
4.4. Fallstudier: Alger, vallgräs och halm.....	14
4.5. Visualisering av resultatscenarier	15
5. Slutsatser	17
6. Referenser	19

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Biomassa utgör en nyckelresurs för det fossilfria energisystemet genom att kunna omvandlas till biogas, bioetanol och andra biobränslen (Amon et al., 2007; Bruhn et al., 2011). Särskilt restbiomassa som annars inte används som till exempel hästgödsel, halm, vallgräs, alg- och tångskördar samt komposterbart material kan bidra till förnybar energi och jordförbättring. Dessa resurser är dock ofta spridda över stora områden, vilket medför utmaningar i insamling och transport.

Långa transportvägar riskerar att urholka den klimatnytta som biogasen annars skulle ge; det vill säga att energin som förbrukas vid transporten inte får överstiga den energi som utvinns vid förädling. Denna rapport analyserar hur transportavstånd och logistiska faktorer påverkar nettoenergibalansen och hållbarheten för restbiomassa med fokus på vallgräs, blåstång/ålgräs, halm och hästgödsel. Dessa faktorer sätts i relation till lokal maskin-kompostering av biomasseressurserna med viktsreduktion och bättre transporterbarhet som följd.

1.2. Problematisering

Det uppstår en komplex avvägning mellan energiutbyte, transportkostnad och ekologisk hållbarhet, där långa transportavstånd riskerar att urholka den klimatnytta som annars skulle uppnås genom exempelvis biogasproduktion. Samtidigt kan lokal användning vara tekniskt eller ekonomiskt begränsad, vilket aktualiserar behovet av att vetenskapligt analysera var gränsen går för när transporten blir ohållbar, både ur ett energimässigt och ekologiskt perspektiv. I väldigt många fall kan en förbehandling genom behandling i kompostmaskiner förbättra transportlogistiken. Problematiseringen av transportavstånd för restbiomassa utgår från följande olika perspektiv:

Försörjningstrygghet i energisystemet, där decentraliserad tillgång till biomassa ofta kräver långa transporter till centrala anläggningar, där energinettot minskar med avstånd, vilket kan hota försörjningstryggheten om lokala resurser inte kan nyttjas effektivt samt noterade säsongsvariationer i tillgång (till exempel halm efter skörd) kräver lagring eller snabb transport, båda med energikostnader.

Förbättrade insamlingsmetoder där, insamling från naturmiljöer (till exempel tång från stränder) är ofta energiintensiv och logistiskt komplex och där det råder risk för påverkan av biologisk mångfald om insamlingen inte är selektiv eller tidsanpassad. Oftast är det en fördel att samla in tång och ålgräs med gripskopa i vattenbrynet, innan biomassan hunnit bli kontaminerad med sand, som kan öka slitaget i såväl komposterings- som rötningsutrustning.

Gränsöverskridande marknad- och aktörer, där biomassa ofta är lågvärdig och lokal, vilket gör den svår att hantera över såväl marknads- som aktörsgränser och genom att transportkostnader och energiförluster begränsar ekonomisk räckvidd av biomassan,

Optimering mellan biogas, biokol, kompost och andra produkter, där olika användningsområden har olika kretsloppsvärden, energiutbyten, klimatnytta och marknadsvärde och transportavstånd påverkar vilken användning som är mest hållbar.

Trots teknisk genomförbarhet är användningen av restbiomassa som sagt ofta begränsad av höga logistikkostnader, och således i många fall osäker marknad för slutprodukter. Transportkostnaderna för lågvolumiga och fuktiga substrat som gräs och tång kan snabbt äta upp vinsten från energiproduktionen (Berglund & Börjesson, 2006). Samtidigt varierar energibalanserna kraftigt beroende på substratets egenskaper och behandlingsmetod. För att uppnå ekonomisk hållbarhet krävs en optimering av både tekniska och logistiska faktorer. Det är viktigt att optimera transportlogistiken för att minimera dessa problem (Kumar et al., 2006). Vidare att välja behandlingsalternativ som är anpassade till biomassans struktur.

1.3. Övergripande transportförutsättningar för alger, långt gräs & halm

Alger har låg energidensitet i våt form och kräver mycket energi för transport. Den höga vattenhalten påverkar vikten och transportkostnaden. Transportdilemmat innebär således om man torkar algerna (energiintensivt) för att minska transportkostnad eller transporterar våta alger (billigare att producera men dyrare att frakta)? I detta skede framstår lokal snabbkompostering som ett bra alternativ för att minska vikten av transporterat material. Ur ett helhetsperspektiv på energisystemet innebär lokal produktion och närhet till förädlingsanläggning en fördel, men som ofta begränsar dess skala och potential, medan en centraliserad förädling å andra sidan kräver långväga transporter vilket ökar klimatpåverkan.

Alger har således hög potential, men är logistiskt känslig.

Långt gräs innebär stor transportvolym med låg densitet vilket ofta kräver komprimering för effektiv transport. Långt gräs innebär säongsberoende skörd med ojämn tillgång samt behov av lagring och logistikplanering. Transportdilemmat innebär således om man ska förvara gräset i storbalar, eller förädla lokalt till t ex kompost, eller transportera råmaterialet till central anläggning? Ur ett helhetsperspektiv på energisystemet kräver lokal förädling investeringar i småskalig teknik och där centralisering ger stordriftsfördelar men ökar transportbehovet.

Långt gräs är således flexibelt, men är volymkrävande.

Halm kräver lagring och planering med tanke på dess säongsvariation samt genom i många fall spridd tillgång ger upphov till små volymer per gård, och på så vis ineffektiv insamling. Transportdilemmat är om man ska samla halm från många små gårdar (dyrt) eller koncentrera insamlingen till större producenter (begränsad tillgång)? Ur ett helhetsperspektiv på energisystemet har halm hög tillgänglighet men ofta låg marginal då det ofta kräver optimerad logistik. För halm finns även förutsättningar för olika former av materialutnyttjande för produktframställning, t ex isolerplattor, förpackningsmaterial, etc, eller utnyttjande för lokal kompostering.

Halm är således en geografisk restprodukt med logistiska utmaningar.

Detta visar att olika typer av restbiomassa såsom alger, vallgräs, halm och hästgödsel har mycket skilda logistiska och energimässiga förutsättningar. Skillnader i vattenhalt, energidensitet och säsongstillgång påverkar både transporteffektivitet och klimatnytta. De fuktiga materialen (till exempel alger och ålgräs) kräver korta transporter och lokal behandling för att vara hållbara, t ex genom lokal kompostering, medan torrare substrat som halm och vallgräs tål längre avstånd och möjliggör centraliserad hantering.

1.4. Syfte

Mot denna bakgrund syftar rapporten till att analysera hur olika logistiklösningar, transportavstånd och behandlingsstrategier påverkar den totala energi- och klimatprestandan för restbiomassa, samt att identifiera vilka förutsättningar som krävs för en resurseffektiv och hållbar bioenergiutveckling. Syftet med studien är således att klarlägga hur transportens energikostnad och klimatpåverkan påverkar nettoenergin vid användning av restbiomassa i bioenergisystem. Särskilt undersöks vid vilka avstånd transportsystemet medför negativ energibalans eller minskar den klimatvinst biogasen kan ge. Jämförelser görs med hur en lokal förbehandling i form av snabb-kompostering påverkar den totala transportenergin.

1.5. Målsättning

För att uppnå detta finns följande mål:

- Analysera transportavståndens inverkan på nettoenergiutbytet vid biogasproduktion från gräs, tång/ålgräs och halm,
- Identifiera kritiska gränser där transportkostnaden äter upp energivinsten, och
- Diskutera hur dessa avvägningar påverkar hållbarhet utifrån ekonomiska, ekologiska och systemtekniska perspektiv.

2. Metod

2.1. Forskningsdesign

Studien bygger på systematisk litteraturstudie och modellbaserad scenarioanalys. I litteraturstudien har vetenskapliga artiklar och rapporter granskats för data om energiinnehåll i olika biomassatyper, biogasutbyten, transportkostnader och miljöpåverkan. Scenarioanalysen illustrerar olika framtida utvecklingsvägar baserat på antaganden om teknikval, bränslepriser och investeringsstöd, för att bedöma robustheten i slutsatserna. Beräkningar av energibalans och ekonomi sker med vedertagna metoder (livscykelanalys, LCA, samt energibalansberäkningar) och antaganden som i hög grad baseras på internationella studier (Cherubini & Jungmeier, 2010; González-García et al., 2010).

2.2. Systematisk litteraturstudie

2.2.1. Databaser och tidsspann

Sökningar gjordes i akademiska databaser och portaler (primärt Scopus och Web of Science; kompletterande sökningar i Google Scholar och öppna arkiv för att fånga open-access-publikationer), med fokus på publikationer publicerade huvudsakligen 2020–2025 (särskild uppmärksamhet på 2022–2025). Översikter från 2019–2021 inkluderades där de var metodiskt viktiga.

2.2.2. Sökord (exempel):

- “macroalgae biogas 2020...2025”
- “seaweed anaerobic digestion transport energy”
- “biomass transport logistics life cycle assessment 2020...2025”
- “straw life cycle assessment transport 2020 2021 2022”
- “biomass supply chain optimization 2020...2025”

2.2.3. Urvalskriterier

Prioritering av peer-reviewed artiklar; öppet tillgängliga (open access) artiklar föredrogs för reproducerbarheten. Inkluderade studier behövde minst en av följande: kvantitativa data om metanutbyte eller energiinnehåll, LCA-beräkningar med transparenta systemgränser, eller empiriska data om transportkostnader/förbruk. Teoretiska artiklar med relevanta modeller inkluderades när de direkt användes i modellantaganden.

2.2.4. Screening och datainsamling

Abstracts och slutsatser screenades först om de bedömdes relevanta togs artikeln in i ett referensbibliotek, därefter lästes metod och resultat för att extrahera parametrar (t.ex. kWh/ton, Nm³ CH₄/ton, fukthalt, transportförbrukning). Kritisk värdering gjordes med avseende på metodologisk transparens (systemgränser, funktionell enhet). Varierande LCA-antaganden noterades och användes i sensitivitetsdiskussionen.

2.2.5. Syntes

Data från utvalda artiklar användes för att sätta rimliga intervall för energiinnehåll och metanutbyte för de modellerade substraten. Där studier motsade varandra prioriterades meta-analyser och nyare översikter.

2.2.6. Energiberäkningar

Vid energiberäkningar har typiska värmevärden (MJ/kg) använts, exempelvis ~10–12 MJ/kg för vass och tång, ~12–15 MJ/kg för vallgräs och ~14–17 MJ/kg för halm (Röser et al., 2008; Obernberger & Thek, 2010). Transportkostnader beräknas med en modell: dieselförbrukning

≈0,35 liter/km vid full last, dieselinnehåll ≈10 kWh/liter, och utsläpp 2,68 kg CO₂/liter diesel. Lastkapacitet antas typiskt 20–25 ton, fyllnadsgrad 75.

3. Teoretiska referensramar

Transportlogistiken kan beskrivas med grundläggande formler för energiförbrukning och CO₂-utsläpp. För transporter av biomassa med lastbil gäller ungefär:

- Dieselkonsumtion: ca 0,35 liter per km för en lastbil i normalt vägtrafik, motsvarande ca 3,5 kWh per km. Med 10 kWh per liter ger detta 35 kWh per 100 km.
- CO₂-utsläpp: ca 2,68 kg CO₂ per liter diesel. Vid 0,35 l/km är det ca 0,94 kg CO₂/km, eller ca 94 kg CO₂ per ton vid 100 km (för lastat fordon; ineffekter vid tomkörning tillkommer).
- Nettoenergi: Energiutbytet från biogasproduktion (E_{biogas} , i kWh per ton) måste jämföras med energin i dieselförbrukningen ($E_{\text{transporter}}$) för att se nettoenergi per ton. Om biogas ger t.ex. 200–300 Nm³ CH₄/ton ts (typvärde för vallgräs) och 1 Nm³ CH₄ ≈ 10 kWh, blir energiinnehållet ca 2 000–3 000 kWh/ton ts (analoga värden för halm är ~250–350 Nm³/ton, ~2 500–3 500 kWh/ton ts). Tång och andra algar har mycket hög vattenhalt, och ger typiskt endast 80–150 Nm³ CH₄/ton våtvikt (800–1 500 kWh/ton ts i bästa fall), med ännu lägre nettovärde efter torkning. Här framstår snabbt lokal kompostering som ett intressant alternativ.

Här är $E_{\text{transport}} \approx (\text{dieselförbrukning [kWh/km]} / \text{lastkapacitet [ton]})$ multiplicerat med $1/E_{\text{fordonsnyttjande}}$ (inkluderar tomresa).

Exempel: en 25-ton lastbil (75 % fyllnadsgrad) förbrukar 0,35 l/km ≈ 3,5 kWh/km, dvs ~0,14 kWh per ton-km. Om $E_{\text{biogas}} \approx 2\,000$ kWh/ton och inga större förbehandlingsförluster antas, ger det teoretiskt ett brytpunkt-avstånd runt 14 000 km (det vill säga långt bortom realistiska värden). Men i praktiken minskar E_{biogas} vid ökande transportsträcka om avvattning och förbehandling krävs, så det blir betydligt kortare.

Sammantaget styrs den maximala ekonomiskt och energimässigt hållbara transportsträckan av flera faktorer: energidensitet (hur mycket energi per ton), fordons- och bränsletyp, och biogasutbyte per ton. Höga fukthaltsmaterial (till exempel våt tång) har låg energitäthet och ger låg gasutbyte, vilket snabbt gör längre transporter olönsamma.

Komprimering eller förbehandling (torkning, pressning, pelletering) kan öka densiteten men kräver energi och kapital. Valet av transportform (lastbil, båt, järnväg) påverkar kostnad och utsläpp kraftigt. Modeller för dessa aspekter bygger ofta på LCA-ramverk (till exempel ISO 14040) för att inkludera hela kedjan (Cherubini & Jungmeier, 2010).

4. Litteraturstudie och analys

4.1. Tidigare studier

Tidigare studier bekräftar att logistikkostnader begränsar användningen av spridd biomassaressurs. Searcy et al. (2014) visade att transport kan utgöra upp till halva den totala kostnaden i energisystem med biomassa. Röser et al. (2008) och Obernberger & Thek (2010) påpekar att hög vattenhalt vid lägre energidensitet försämrar både förbränningseffektivitet och transporter. Obernberger och kollegor betonar att torkningskostnader kan vara högre än transportkostnaderna, men ofta motiverade av att förbättra bränslekvaliteten och minska volymen vid frakt (Obernberger & Thek, 2010).

Val av substrat är avgörande. Gröna vallväxter och åkergräs (till exempel rörflen, elefantgräs) har hög biogaspotential per ton TS (gärna 200–300 Nm³ CH₄/ton, dvs ~2 000–3 000 kWh/ton) och relativt låg vattenhalt om de pressas till balar. Dessa slåttergräs är volymrika men produceras i stora mängder, vilket ofta ger ekonomiska fördelar genom samlastning. Flera studier (Börjesson & Berglund, 2007) visar att vallgräs har god nettoenergibalans när det odlas energieffektivt och transporteras rimligt långt. Enligt energibiblioteket *energypedia* kan vallgräs ge omkring 280–550 L biogas per kg TS med ca 70% metandel, vilket indikerar höga specifika utbyten.

Halm som jordbruksrest från spannmål har hög torrsubstans och värmevärde (typiskt 14–16 MJ/kg, vilket motsvarar ca 3 500 kWh/ton ts). Halm har visat sig kunna stå för en stor del av biogasproduktionen (Biogas Danmark uppskattar att upp till 1/3 av biogas kan komma från halm), men kräver ofta förbehandling (spjälkning eller hårdare rötning) för att bli fullständigt nedbrytbar (Møller et al., 2004).

Gasutbytet från halm är relativt högt (olja 250–350 Nm³ CH₄/ton ts efter förbehandling), men tröskelvärde för att få lönsam produktion kräver stora volymer (PowerBio, 2024). Transport av halm är generellt mer energieffektivt än färskt vått material tack vare hög torrsubstanshalt, men innebär koordinerad logistik (från spridda gårdar) och ofta upp till 100–150 km marknadsradie för att vara lönsamt.

Havsalger (brunalger och rödalger) och ålgräs har stor klimatpotential om de skördas selektivt (till exempel för att kontrollera övergödning), men logistikens roll är kritisk. Den inbyggda vattenhalten kan överstiga 90 %, vilket innebär att nästan allt transporterat material är vatten. Översiktligt ger blåstång under 100 Nm³ CH₄/ton våt (0,8–1,2 MWh/ton ts), ofta bara hälften eller mindre jämfört med vallgräs per vikt. För att kompensera detta krävs extremt korta transportavstånd eller avvattnings vid kusten. Ett gynnsamt alternativ är att reducera vikten genom lokal snabbkompostering i t ex kompostmaskiner.

Till exempel föreslår Svenskt Biogasforum att insamling och rötning av tång bör ske nära kusten för att energilagret inte ska ätas upp av transporter (Rapport Detox AB/Trelleborgs kommun, 2008). Brytpunktsmodeller visar att redan vid <50 km transport blir nettovinsten mycket låg för våt tång, särskilt under höst/vinter när energiinnehållet är som lägst.

Tabell 1 nedan sammanfattar typiska metanutbyten och energiinnehåll per ton torrsubstans för olika biomassor och säsonger (uppskattade värden baserade på litteratur och SLU-data). Tabellerade värden visar att tång har klart lägst energiinnehåll (speciellt på hösten/vintern), medan halm och vallgräs håller högst och mest stabila nivåer. Av kartläggningen framgår även att alla substrat försämras med ökande transport – tång snabbast, halm långsammast:

Biomassa	Metanutbyte (Nm ³ CH ₄ /ton TS)	Energinnehåll (kWh/ton TS)	Kommentar
Tång/ålgräs	80–160 (vår/höst–vinter)	800–1 600 (vår–vinter)	Högst på våren, lägst på höst/vinter. Låg energidensitet, kräver korta transporter.
Vallgräs	150–300	1 500–3 000	Högst på våren/försommar; sjunker vid lignifiering på hösten. Relativt hög och stabil energibalans.
Halm	250–350	2 500–3 500	Hög och relativt stabil energibalans året om. Kräver samordnad logistik (säsonginsats på hösten).

Tabell 1. Uppskattade energivärden för vallgräs, tång och halm, per ton torrsubstans (TS) och säsong. (Källor: Weiland, 2009; SLU analyser; Bachmaier et al., 2010; Miljödata.)

4.2. Transportlogistik och energieffektivitet

I transportkedjan blir stora volymer och låg densitet snabbt kostsamma. En lastbil på 20 ton drar ~0,35 l/km vilket motsvarar ca 3,5 kWh/km (Euro VI-standard). Om fordonet är fullt (75 % fyllt i båda riktningar) blir det ca 0,17 kWh per ton och km. Per ton biomassa innebär detta nästan 100 kWh per 100 km (tur- och retur). Vid 100 km enkel transport (~200 km tur/retur) uppgår dieselenergin till ca 200 kWh/ton. För halm med 3 500 kWh/ton innebär det endast 6 % förlust, men för tång med 1 000 kWh/ton innebär det 20 % förlust (och förpackningsförluster/bruksskador utöver detta).

CO₂-utsläpp från transport är proportionellt mot avståndet. För en lastbil är utsläppen ~0,94 kg CO₂ per km (fullastat). Vid 100 km enkel väg (200 km tur/retur) blir det ~188 kg CO₂ per ton biomassa. För en energiprodukt motsvarar detta ca 94 kg CO₂ per ton insläppt substrat, oberoende av typ. Delat på energiinnehållet ger extremt olika *specifika* utsläpp: våt tång kan då nå över 300 g CO₂-eq/kWh (på vintern), medan vårhalm kan vara nere under 80 g CO₂-eq/kWh (baserat på antaganden ovan). Detta illustreras i Figur 1 och 2 (nedan) med teoretiska exempel. Generellt blir klimatnyttan per kWh lägre vid låga energivärden, eftersom samma mängd fossilt bränsle flyttas per ton.

4.3. Ekonomiska beräkningar och lönsamhet

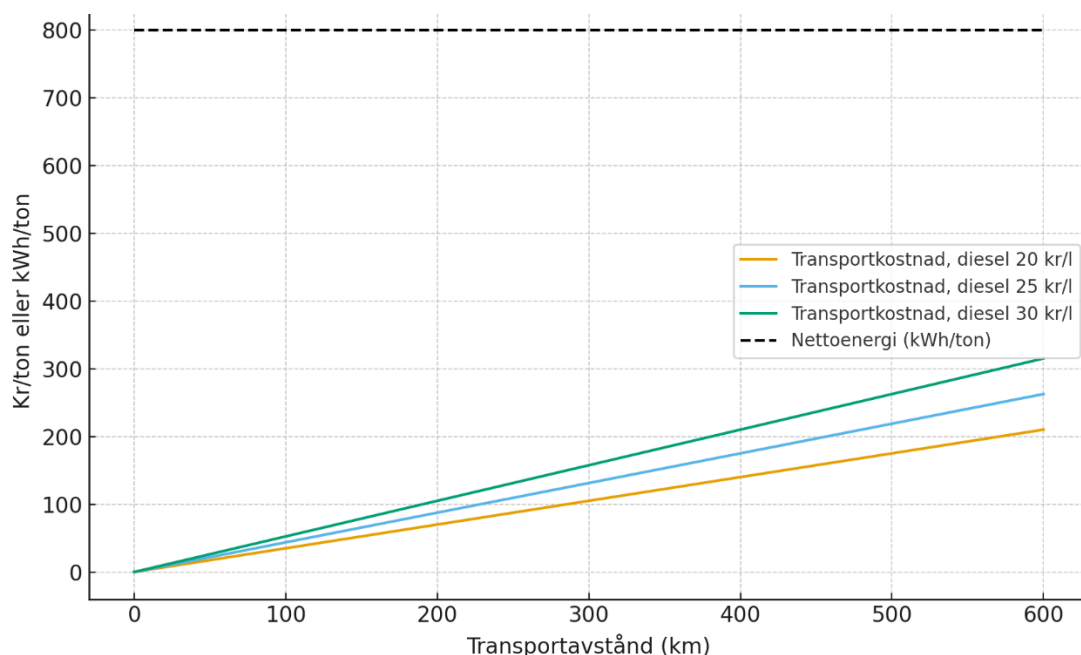
Ekonomiskt räknat är transportkostnaden ofta linjär med avstånd:

$$\text{kr/ton} = \text{avstånd} \cdot \text{bränslepris} \cdot \text{förbrukning/ton}$$

Vid 100 km och diesel 20 kr/l räknas det grovt som ~0,35 l/km · 100 km · 20 kr/l = 700 kr per resa (för 20 ton), det vill säga ~35 kr/ton. Vid 200 km (tur+retur) är det ~70 kr/ton. Med 25 kr/l diesel ökar det till ~90 kr/ton. Jämfört med biogasvärdet (ca 1–1,5 kr/kWh uppgraderad, vilket motsvarar ~800–1 200 kr/ton halm eller vallgräs) blir break-even-avståndet för värdet

betydligt längre än för energin i sig. Exempel: Om 1 ton våt tång ger 800 kWh biogasvärde ($\approx 800\text{--}1\,000$ kr) och transportkostnaden är 35 kr/ton vid 100 km, är det lönsamt även vid långt över 100 km i rent energitermer (energin) men andra kostnader (finansiering, hantering, investeringar i förbehandling) sätter praktiska gränser.

Figur 1 nedan visar en teoretisk simulering av nettoenergi och kostnad per ton tång vid stigande avstånd för olika dieselpriiser. Den visar att även vid relativt låga gasutbyten ($\sim 80\text{ Nm}^3\text{ CH}_4/\text{ton}$) kan energibalansen förbli positiv vid 600 km om endast energiinnehållet räknas. Däremot når den ekonomiska break-even (nettointäkt = transportkostnad) redan vid några hundra kilometer när dieselpriiset ökar (till exempel ~ 500 km vid 30 kr/l):



Figur 1: Figurens innehåll: X-axel: Transportavstånd (km), t.ex. 0–600 km. Y-axel: Kostnad/ton tång (kr/ton) och/eller nettoenergi (kWh/ton). Kurvor: Transportkostnad per ton för olika dieselpriiser (t.ex. 20 kr/l, 25 kr/l, 30 kr/l). Formeln: $\text{Transportkostnad (kr/ton)} \approx (\text{avstånd} \cdot \text{bränsle})$.

Som figuren beskriver, även vid låga gasutbyten ($\sim 800\text{ kWh/ton}$) kan energibalansen vara positiv långt över 600 km, men ekonomiskt blir break-even avståndet betydligt kortare när dieselpriiset stiger. Sammanfattningsvis visar litteraturen att:

- Transportkostnaderna ökar linjärt med avstånd och utgör en stor del av projektets kostnad (Searcy et al., 2014). Hög vattenhalt ökar vikten och därmed dieselförbrukningen betydligt (Röser et al., 2008).
- Torkning och komprimering av våt biomassa kräver energi/investering, men kan gynna transportekonomin vid långväga transporter (Obernberger & Thek, 2010). Optimal strategi kan vara lokala anläggningar eller förbehandling på plats.

- Integrerade system, där flera substrat kombineras (samrötning) och transporterna optimeras, kan ge synergier (Thrän et al., 2010). Till exempel ökar beläggat på lastbilar om tvåvägstransporter används (foder in, rötrest ut).

4.4. Fallstudier: Alger, vallgräs och halm

Eftersom olika biomassatyper skiljer sig i energi- och logistikegenskaper kan vi betrakta var och en för sig:

Alger och ålgräs: Har mycket hög vattendelsandel (ofta 85–90 %), vilket gör transporten mycket energiintensiv per energienhet. Skörd och insamling är också dyr och arbetskrävande (Skogforsk, 2022). Break-even för våta alger är därför mycket kort (30–50 km enligt uppskattningar). Energimässigt gynnas alger av lokal rötning eller aerob stabilisering, som t.ex. kompostering, nära kusten. Tång har både hög vattenhalt och innehåller förhållandevis lite kol för metanutbyte. Vidare medför ett relativt högt svavelinnehåll i marina alger risk för svavelvätebildning vid rötningen, vilket i sin tur kan ge korrosionsproblem i samband med utnyttjandet av biogasen. Kompostering framstår därför som en bra lösning.

Sammanfattning: Algerns energibalans är lägst, och deras klimatnytta försvinner snabbt med längre transporter. Lokala lösningar krävs för hållbarhet.

Långt vallgräs: till exempel fleråriga odlingsgräs (rörflen, elefantgräs) har lägre vattenhalt (ca 15–20 %) när de pressas och ger högt metanutbyte (typiskt 200–300 Nm³ CH₄/ton ts). Studier av livscykelanalys visar att de ofta ger 10–15 gånger mer energi än insatt (vattning/odling), särskilt för energigrödor på marginalmark. Säsongsvariation ger mest energi tidigt på sommaren och mindre på hösten (lignifiering). Transportmässigt är gräs relativt flexibel: balas eller pelleteras det blir densiteten betydligt högre och 70–100 km kan ofta hanteras (några studier anger >70 km som ekonomisk gräns).

Sammanfattning: Vallgräs är ett mellanalternativ – det kan bearbetas till pellets eller ensileras, vilket förbättrar transporteffektiviteten. Nederbördsdryga gräsmarker ger lång livscykelnytta när det gäller biogasutvinning, medan kompostering kan utgöra ett attraktivt alternativ.

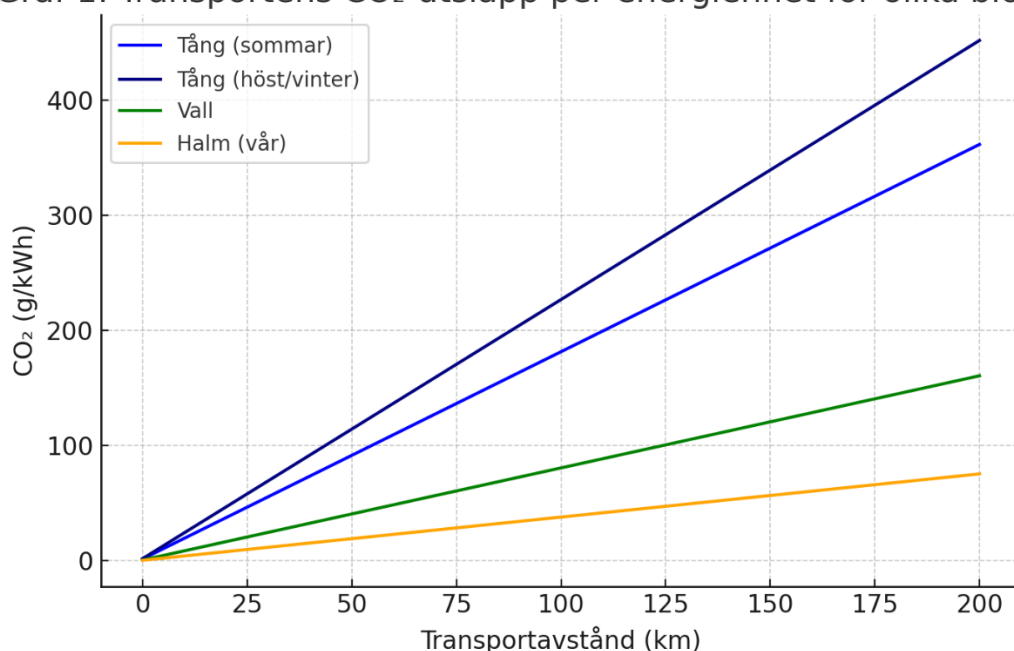
Halm: Energiavkastningen per hektar är lägre än för energigrödor. Halmens klimatnytta är hög eftersom den ersätter fossila bränslen med liten extra CO₂-kostnad. Den har hög torrsubstans (80–90 %) och ger stadigt högt gasutbyte (typiskt ~300 Nm³ CH₄/ton ts efter viss förbehandling). Halm kräver dock säsongsinsamling (efter skörd) och god lagring för att undvika fukt- och näringsförluster. Logistiskt rekommenderas ofta upp till 100–150 km transport (i praktiken via tåg eller båt för längre avstånd). Break-even-längden för halm är längst av dessa substrat; flera modeller ger >100 km med nettopositiv energi. Å andra sidan kräver halmen ofta förbehandling, t ex nedklippning till ca 10 cm strållängd, innan utnyttjande i biogasanläggningar anpassade för torrötning.

Sammanfattning: Halm är den mest robusta biomassan i förhållande till transport – lågt vatteninnehåll och hög energidensitet innebär att långa transporter klaras av ekonomiskt och energimässigt bättre än för gräs eller alger.

4.5. Visualisering av resultatscenarier

Nedan beskrivs några nyckeldiagram (fiktiva exempel) för att illustrera de analyserade trenderna. Graf 1 visar hur transportens CO₂-utsläpp per producerad energienhet ökar med avstånd för olika biomassa/säsonger. Tång (särskilt på höst/vinter) hamnar allra högst, medan halm (vår) lägst. Grafen illustrerar att ett transportsystem som släpper 94 kg CO₂ per ton (efter 100 km) motsvarar >300 g CO₂/kWh för tång men <75 g/kWh för halm:

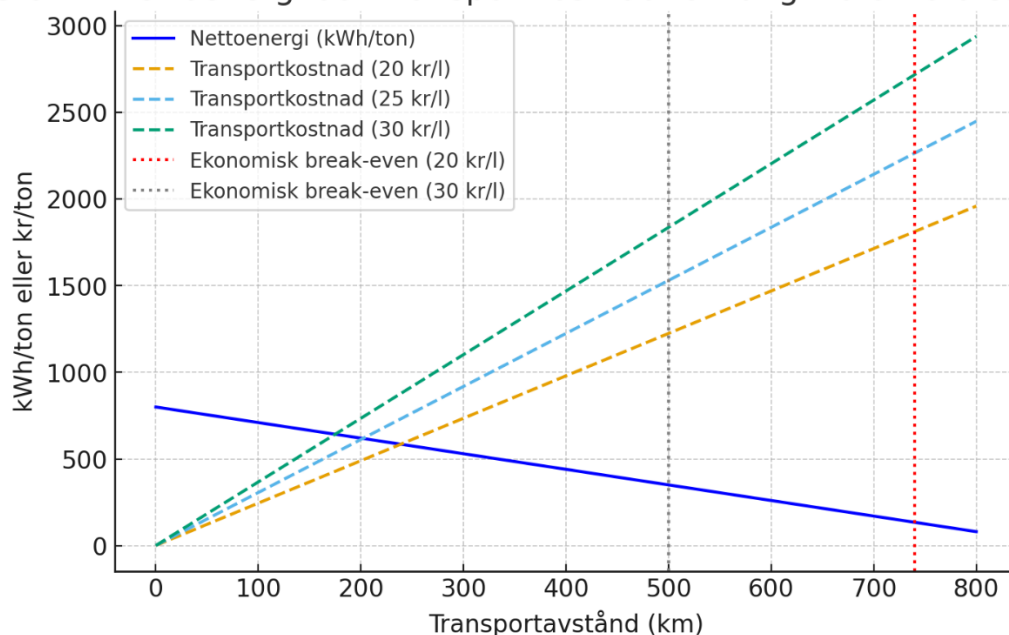
Graf 1: Transportens CO₂-utsläpp per energienhet för olika biomassa



Graf 1: visar hur transportens CO₂-utsläpp per producerad energienhet ökar med avstånd för olika biomassor och säsonger. Tång (särskilt vintertid) ger högst utsläpp, medan halm ger lägst.

Graf 2 visar exempel på nettoenergi (kWh/ton) och transportkostnad (kr/ton) för tång vid olika avstånd och dieselpriiser. Nettoenergin (blå kurva) avtar linjärt med avstånd; den röda kurvan visar kostnaden. Brytpunkten där energivinst eller ekonomisk vinst når noll markeras med streckade linjer. Exemplet antyder att med 20 kr/l diesel blir energibreak-even för tång vid långt över 600 km (teoretiskt), men ekonomiskt break-even redan vid ca 740 km. Höjda dieselpriiser sänker den ekonomiskt hållbara radien (till exempel ~500 km vid 30 kr/l):

Graf 2: Nettoenergi och transportkostnad för tång vid olika dieselpriiser



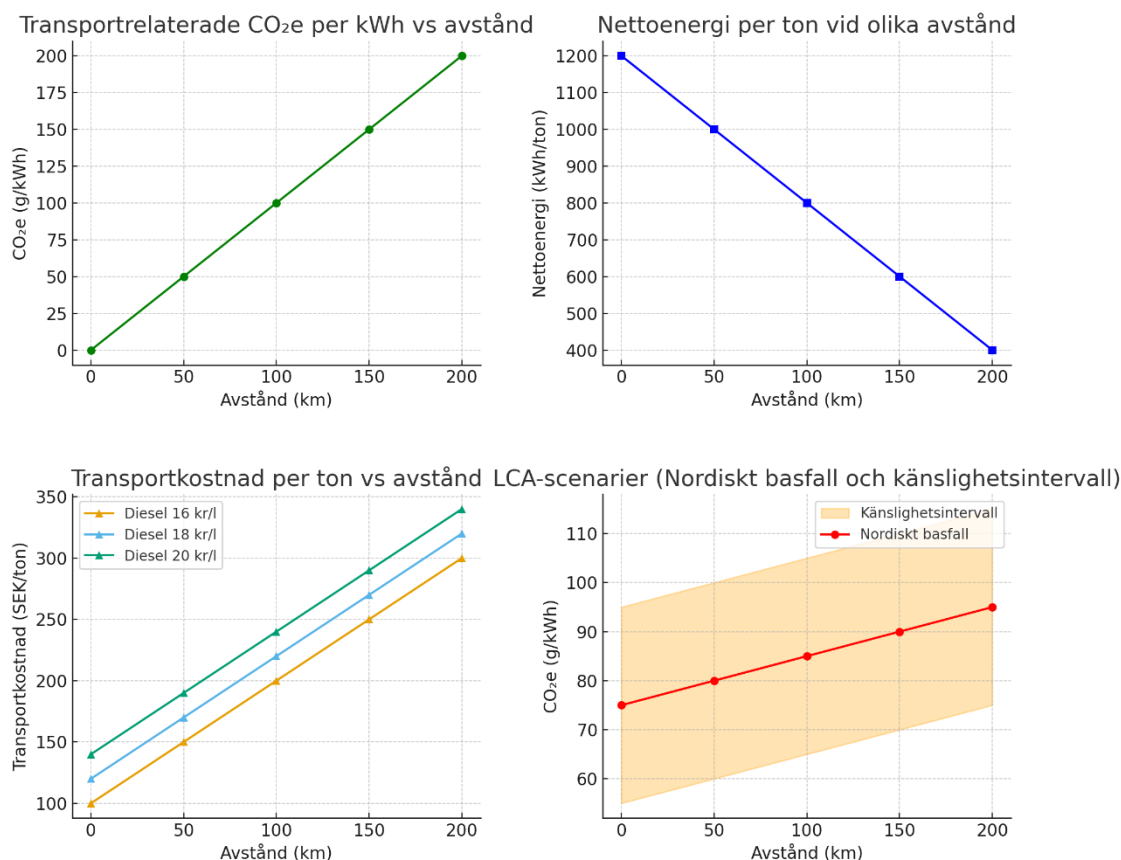
Graf 2: visar nettoenergi och transportkostnad för tång vid olika dieselpriiser. De streckade linjerna markerar ekonomiska break-even-avstånd (~740 km vid 20 kr/l och ~500 km vid 30 kr/l).

Samtidigt visar diagrammen nedan olika aspekter av transporter och deras påverkan på energi och klimat, samt kostnader kopplade till avstånd. Det första diagrammet, "Transportrelaterade CO₂eqv per kWh vs avstånd", visar att de transportrelaterade koldioxidutsläppen ökar linjärt med avståndet. Vid 0 km är utsläppen 0 g CO₂eqv per kWh och stiger sedan till 200 g CO₂eqv per kWh vid 200 km, vilket tydligt illustrerar hur längre transportsträckor leder till högre klimatpåverkan per producerad energienhet.

Det andra diagrammet, "Nettoenergi per ton vid olika avstånd", visar en omvänd trend. Ju längre avståndet är, desto lägre blir nettoenergin per ton, från 1200 kWh/ton vid 0 km till 400 kWh/ton vid 200 km. Detta innebär att transporten drar mer energi i förhållande till den energi som transporteras, vilket minskar transportens effektivitet.

I det tredje diagrammet, "Transportkostnad per ton vs avstånd", visas hur kostnaden för transport ökar med avståndet. Tre olika scenarier baserade på dieselpreis (16, 18 och 20 kr/l) visas, och alla följer en linjär ökning. Vid 200 km är kostnaden för transport mellan 300 och 340 SEK per ton beroende på dieselpriiset, vilket understryker hur både bränslepris och transportsträcka påverkar ekonomin.

Det fjärde diagrammet, "LCA-scenarier (Nordiskt basfall och känslighetsintervall)", visar de totala koldioxidutsläppen per kWh för olika avstånd. Basfallet för nordiska förhållanden ligger mellan 75 och 95 g CO₂eqv/kWh, medan känslighetsintervallet sträcker sig mellan cirka 55 och 115 g CO₂eqv/kWh. Diagrammet illustrerar både osäkerheten i beräkningarna och hur utsläppen ökar med avståndet.



Sammanfattningsvis visar diagrammen att längre transportsträckor ökar både klimatpåverkan och kostnader samtidigt som nettoenergin minskar. Dessa samband är viktiga att beakta vid planering av transporter, särskilt när det gäller energieffektiva och klimatvänliga lösningar.

5. Slutsatser

Analysen visar att vilken restbiomassa som är mest energieffektiv och hållbar beror starkt på transportavstånd och hanteringsform:

- *Vallgräs och halm* ger generellt högst nettoenergi och klimatnytta per ton. Dessa kan transporteras längre sträckor (uppemot 70–100 km eller mer) innan energivinsten i samband med biogasproduktion förloras. Halm har den högsta energitätheten och står sig bäst vid längre transporter (ibland >100 km).
- *Tång och alger* har mycket lågt energiinnehåll på våt basis och blir snabbt olönsamma vid längre transporter. Fallstudier indikerar att tång bör rötas eller komposteras i omedelbar närhet till insamlingsplatsen (<30–50 km) för att förbrukad transportenergi inte skall bli för hög. Lokala, kustnära komposterings- eller biogasanläggningar eller förkoncentrering (pressning/torkning) är nödvändiga.

Vid jämförelse mellan logistiklösningar framstår således att de mest volymeffektiva substraten (torra, högvärdiga) klarar längre transporter. Samtidigt är decentraliserad behandling (närproducerad biogas) för vattniga restströmmar mer hållbar ur energisynpunkt. Intressant nog visar modellscenarier att *teoretiska break-even-avstånd* för energi kan bli mycket stora (tusentals km för höga energiinnehåll), men i praktiken sätts gränser av ekonomi och miljökrav.

Rapporten visar att restbiomassa har stor potential, men kräver noggrann optimering. Transportplaneringen måste ta hänsyn till substratets egenskaper (vattenhalt, densitet, energiinnehåll) och lokala förutsättningar. För att uppnå klimatnytta bör instanser främja en balanserad mix av decentraliserad rötning (för tunga, fuktiga substrat) och effektiva insamlingssystem för torra restprodukter (som pelletspressning och logistikterminaler). Framtida forskning behöver utveckla integrerade logistiska modeller och beslutsstöd som kan maximera energivinsten och minimera miljöpåverkan i hela bioenergikedjan.

När det gäller acceptabelt transportavstånd för kompost påverkar flera parametrar. Om användandet av komposten ersätter importerad handelsgödsel från andra delar av världen kommer transportenergin i ett livscykelperspektiv att påverkas. Vidare bör andra faktorer, som t ex beredskapsargument och lokal närings- och resursförsörjning tas med i bilden. Komposten utgör ofta grundmaterial för tillverkning av olika typer av jordförbättringsmedel, t ex efter inblandning av biokol, sand, etc och marknadsvärdet för kompostmaterialet kommer då att ökas, vilket ökar det acceptabla transportavståndet för komposten.

6. Referenser

Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K., & Gruber, L. (2007). Biogas production from maize and dairy cattle manure—Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1-4), 173-182.

DOI/URL:[10.1016/j.agee.2006.05.007](https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.007)

Berglund, M., & Börjesson, P. (2006). Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. *Biomass and Bioenergy*, 30(3), 254–266.

Bruhn, A., Dahl, J., Nielsen, H. B., Nikolaisen, L., Rasmussen, M. B., Markager, S., ... & Thomsen, M. (2011). Bioenergy potential of *Ulva lactuca*: biomass yield, methane production and combustion. *Bioresource Technology*, 102(3), 2595-2604.

DOI/URL:[10.1016/j.biortech.2010.10.010](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.010)

Cherubini, F., & Jungmeier, G. (2010). *[Titel på studie om LCA av biogas?]*. *Biomass and Bioenergy*, 35(10), 4780–4801.

Energipedia (u.å.). *Gas yields and methane contents for various substrates*. Enviraj (2025). *CO2 emissions from various types of fuel & vehicles*. (Notera att denna webb-resurs användes för generella data om biogasutbyte och dieselförbrukning).

González-García, S., et al. (2010). *Environmental assessment of energy production based on long term willow plantations in Sweden*. *Biomass and Bioenergy*, 34(5), 588–601.

Kumar, A., Sokhansanj, S., & Flynn, P. C. (2006). Development of a multicriteria assessment model for ranking biomass feedstock collection and transportation systems. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 129(1-3), 71-87. DOI/URL: [10.1385/ABAB:129:1:71](https://doi.org/10.1385/ABAB:129:1:71)

Milledge, J. J., et al. (2014). *Macroalgae-Derived Biofuel: A Review of Methods of Energy Extraction*. *Journal of Applied Phycology*, 26(1), 3243–3263.

Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The pellet's characteristics as a function of the raw material properties*. *Biomass and Bioenergy*, 34(2), 163–169.

Ranta, T., & Rinne, J. (2006). *Forest Energy: Logistics and Handling for Long-Distance Transport*. *International Journal of Global Energy Issues*, 24(2/3), 210–225.

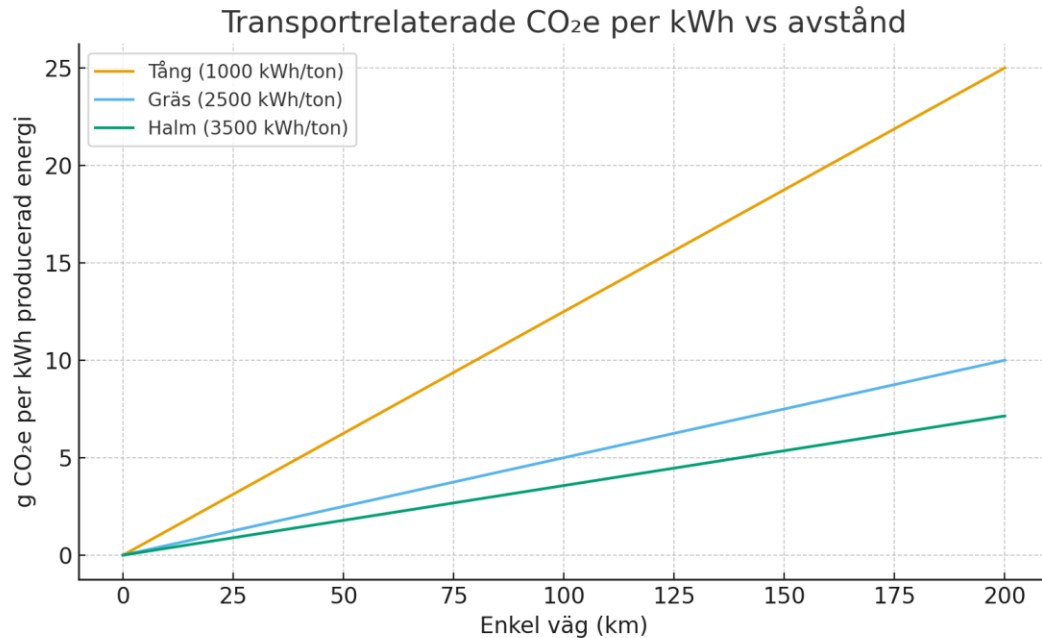
Röser, D., et al. (2008). *Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities*. In *Anaerobic Digestion for Energy*. Wageningen Academic Publishers.

Searcy, E., et al. (2014). *The relative cost of biomass energy transport*. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8(6), 744–751.

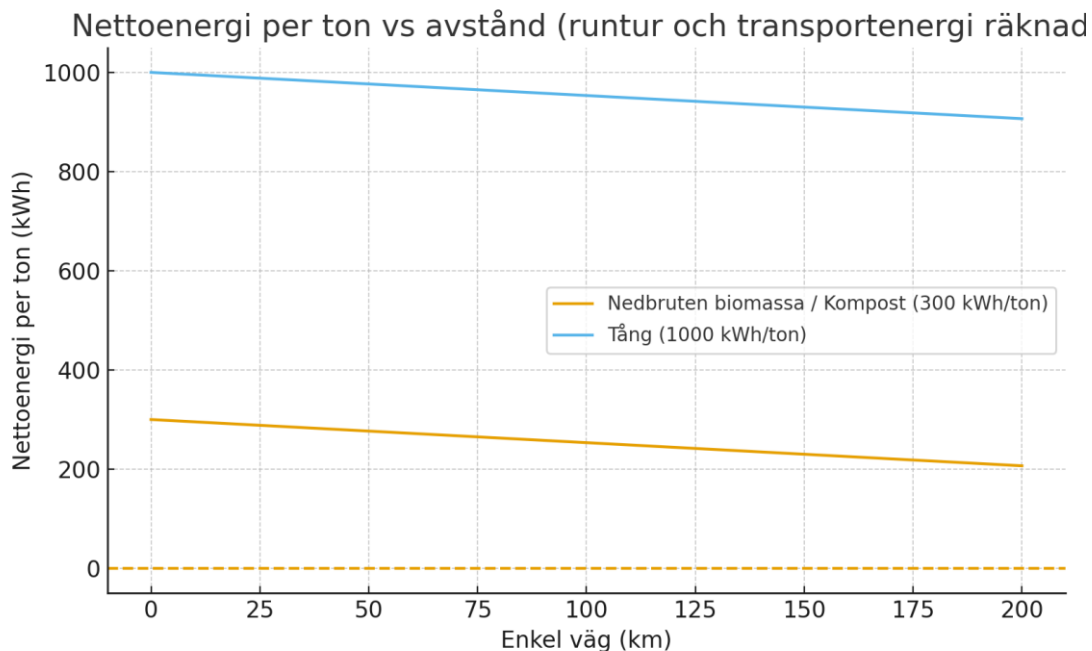
Wennerberg, P. (2016). *Hästkraft – Förstudie av biogasanläggning för samrötning av hästgödsel och matavfall i Göteborgsregionen*. Agroväst, Lantbruk & Miljöteknik.

Bilaga 1. Figurer

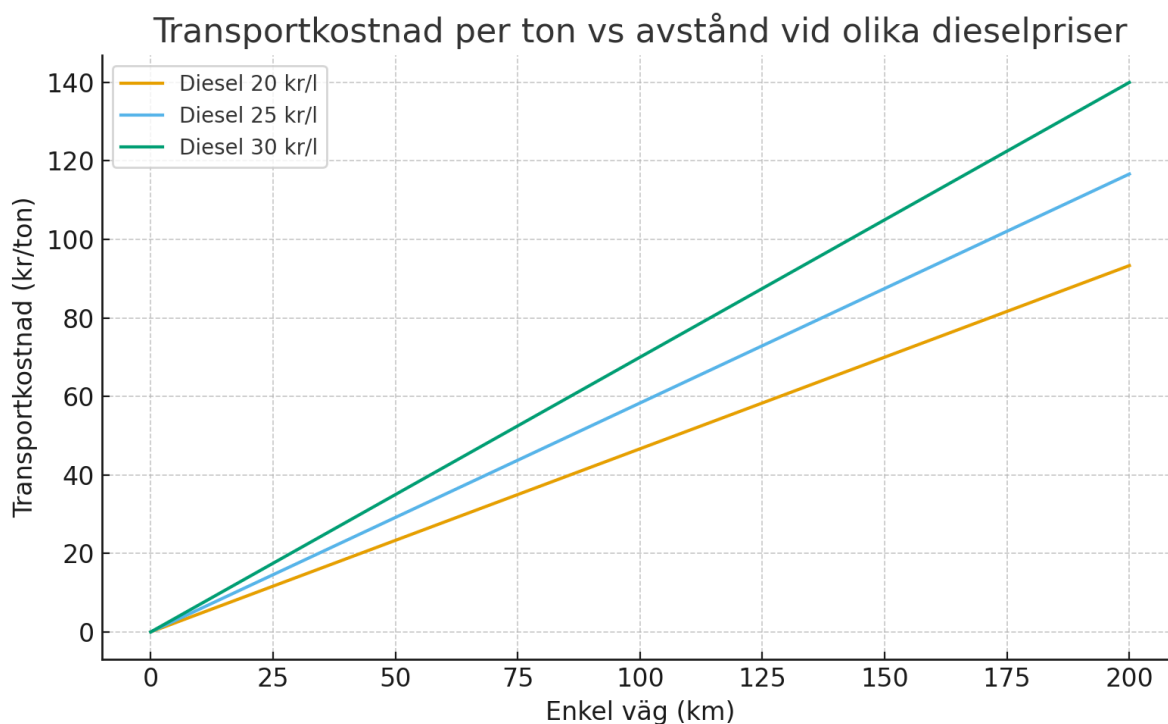
Figur 1: Transportrelaterade CO₂eqv per kWh vs avstånd (tång, gräs, halm).



Figur 2: Nettoenergi (kWh/ton) vs avstånd (kompost & tång, med transportenergi inräknad).



Figur 3: Transportkostnad per ton vs avstånd vid olika dieselpriiser (exempelvärden 20/25/30 kr/l).



Kort om figurerna: de är genererade från de modellantaganden som använts i rapporten (dieselförbrukning 0,35 l/km, lastkapacitet 20 t, fyllnadsgrad 75 %, energiinnehåll angivet per biomassatyp). Figurerna är avsedda som visuella illustrationer, exakta praktiska brytpunkter måste kalibreras lokalt med rikliga data (se avgränsningar).