



2026-02-25

2026-202977-0001

# Slutrapport

Energimyndighetens titel på projektet – svenska  
Öka klimatfördelarna med bioenergi genom att inkludera  
alternativkostnaden för koldioxid för biomassa i  
energisystemmodeller

Energimyndighetens titel på projektet – engelska  
Increasing the climate benefits of bioenergy by including the carbon  
opportunity cost of biomass in energy system models

Organisation  
Chalmers Tekniska Högskola  
Fysisk Resursteori  
412 96 Göteborg

Nyckelord: 5–7 stycken  
Biomassa, kolinbindning, energisystem, bioenergi, markanvändning



2026-02-25

2026-202977-0001

## Förord

Detta projekt, "Öka klimatfördelarna med bioenergi genom att inkludera alternativkostnaden för koldioxid för biomassa i energisystemmodeller", har genomförts vid avdelningen Fysisk Resursteori på Chalmers tekniska högskola under perioden 2023–2025. Projektet har finansierats av Energimyndigheten inom ramen för utlysningen Bioplus 2023 Analyser.

Vi vill rikta ett stort tack till Energimyndigheten för det ekonomiska stödet och för ett konstruktivt samarbete under projektets gång. Ett varmt tack riktas även till Göran Berndes (Chalmers), Markus Millinger (RISE) och alla utvecklare av den öppna energisystem-modellen PyPSA för värdefulla synpunkter och diskussioner som bidragit till projektets genomförande och resultat. Vi vill också särskilt lyfta fram de givande diskussioner som fördes under workshopen med kollegor på Chalmers och representanter för PREEM, vilka har gett oss viktiga perspektiv på hur våra modelleringsresultat kan omsättas i praktisk verksamhet och beslutsunderlag.

Göteborg, februari 2026

Lina Reichenberg, Fysisk Resursteori

Chalmers tekniska högskola



2026-202977-0001 2026-02-25

## Innehåll

1	Inledning/bakgrund	5
2	Genomförande	7
3	Resultat	7
4	Diskussion	9
5	Publikationslista	11
6	Referenser, källor	11
7	Bilagor	11



2026-02-25

2026-202977-0001

## Sammanfattning

Vad är kostnadseffektiva sätt att använda biomassa från jord- och skogsbruk för energiändamål? Här vidgar vi perspektivet och analyserar konsekvenserna för framtida energisystem om man tar med förändring av kolstocken i mark, levande biomassa och atmosfär för att beräkna klimateffekten av att använda råvara från jord- och skogsbruk för energiändamål.

Vi har använt en detaljerad energisystemmodell för Europa (PyPSA) och beräknat kostnadseffektiv användning av biomassa i en framtid med noll-utsläpp av koldioxid från energisektorn. Till skillnad från tidigare studier har vi tagit med effekterna av markanvändning för att beräkna koldioxidutsläpp från vind, sol, samt olika former av biomassa.

Analysen visar att ett dylikt perspektiv för med sig en halvering av användningen av biomassa. Den medför också att vissa typer av bioråvara inte används, främst gäller det råvara från stamved.

Att även ta hänsyn till kolalternativkostnaden ändrar dock inte i vilka sektorer som biomassa används: den används främst för att producera värme i industrin och för att producera flytande bränsle, oavsett perspektiv på landanvändning.

## Summary

[[Klicka här och skriv](#)]

# 1 Inledning/bakgrund

Forskning om framtidens energisystem visar att biomassa är en attraktiv energibärare. I den absoluta

## 2 Bakgrund och problemformulering

Bioenergi har en central roll i många scenarier för att nå ambitiösa klimatmål. Internationella och europeiska färdplaner för nettonollutsläpp lyfter fram biomassa som en flexibel och mångsidig energibärare som kan bidra till elektrifiering, produktion av värme och el samt tillhandahålla biogent kol för flytande bränslen i svårelektrifierade sektorer såsom flyg och sjöfart. Biomassa framhålls även som en möjlig källa till negativa utsläpp genom bioenergi med koldioxidavskiljning och lagring (BECCS).

Samtidigt är bioenergins faktiska klimatpåverkan föremål för en intensiv vetenskaplig och politisk debatt. Den centrala frågan gäller hur förändringar i kolstocken i mark och biomassa – så kallade kolstocksförändringar – ska värderas när biomassa odlas och skördas. När skog avverkas eller mark tas i anspråk för energigrödor kan kol som annars hade varit lagrat i vegetation och mark frigöras till atmosfären eller utebli från framtida inlagring. Detta kan beskrivas som en alternativkostnad för kol – det vill säga värdet av den kolinlagring som går förlorad när mark används för bioenergi.

Hur stora dessa effekter är beror på typ av råvara, geografisk kontext, skogstillväxt, markförhållanden samt tidsperspektiv. Vissa resurser, såsom restprodukter från skogsbruk och jordbruk, har generellt låg alternativkostnad, medan exempelvis stamved eller energigrödor på tidigare skogsmark kan medföra betydande kolstocksförändringar.

### Kunskapsläge och metodologiskt gap

Trots den omfattande debatten modelleras bioenergi ofta som klimatneutral i energisystemanalyser. Många högupplösta energisystemmodeller antar att biomassa ger noll nettoutsläpp vid användning och begränsar i stället tillgången genom exogena potentialtak. Detta innebär att förändringar i markens och skogens kolstock i praktiken inte internaliseras i energisystemets optimering.

Integrerade bedömningsmodeller (IAM:er) som kopplar samman energi- och markanvändningssystem fångar i viss utsträckning samspelet mellan bioenergi och kolinlagring [1, 2, 3]. Dessa modeller arbetar dock ofta med grov sektor- och tidsupplösning och kan därför inte analysera tekniskspecifika och timvisa



### 3 Genomförande

Projektet har genomförts vid Chalmers tekniska högskola på avdelningen Fysisk Resursteori under perioden 2023-11-01 till 2025-12-31, med finansiering från Energimyndigheten inom utlysningen Bioplus 2023 Analyser (delområde Systemanalyser).

Metodmässigt har projektet kombinerat:

1. Beräkningar av kolstocksförändringar för olika biomassaresurser med hjälp av etablerade modeller och litteratur, samt
2. Implementering av dessa resultat i den europeiska energisystemmodellen PyPSA-Eur.

Genom detta angreppssätt möjliggörs en analys där markens kolbalans och energisystemets tekniska och ekonomiska struktur integreras i ett sammanhållet optimeringsramverk.

Resultat från projektet har presenterats vid internationella möten och konferenser vid tre olika tillfällen:

1. TRANS-ATLANTIC INFRADAY CONFERENCE (Dublin, 5-6 juni 2025)
2. MIT Center for Sustainability Science and Strategy seminar (Boston, 24 oktober 2025)
3. Malmsten Workshop in Sustainability Economics (Göteborg, 21-23 januari 2026)

Resultat från projektets har diskuterats med intressenter från industri, akademi och näringsliv på en workshop:

- PREEM- Chalmers workshop (Göteborg, 7 maj 2025)

### 4 Resultat

Studien analyserar hur användningen av biomassa i ett framtida europeiskt energisystem påverkas när alternativkostnaden för kol (förändringar i kolstock i mark och biomassa) inkluderas i systemanalysen. Med hjälp av den detaljerade

energisystemmodellen PyPSA-Eur optimeras ett europeiskt energisystem med nettonollutsläpp av koldioxid, där olika biomassaresurser konkurrerar med andra tekniker såsom elektrifiering, vätgas samt vind- och solkraft.

#### Minskad total biomassaanvändning

Det mest centrala resultatet är att den kostnadsoptimala användningen av biomassa minskar kraftigt – ungefär en halvering – när kolalternativkostnaden inkluderas. Detta beror på att användning av biomassa medför en alternativ klimatkostnad genom att kolinlagring i skog och mark uteblir. När denna effekt internaliseras i modellen blir biomassa mindre konkurrenskraftig jämfört med andra fossilmfria tekniker.

#### Andra typer av biomassa blir mer attraktiva

Analysen visar att vissa typer av biomassa i stort sett fasas ut när kolalternativkostnaden beaktas. Detta gäller särskilt stamved (stemwood), som har högt alternativvärde i form av kolinlagring. Restprodukter och avfallsbaserade biomassaflöden påverkas i betydligt mindre grad, eftersom deras alternativkostnad är lägre. Resultaten visar därmed att det inte enbart är den totala biomassamängden som är avgörande, utan även vilken typ av biomassa som används.

#### Oförändrad sektoriell användning

Trots den minskade totala biomassaanvändningen används biomassas i samma sektorer, oavsett om man räknar med kolstockförändringar eller inte. Biomassa används främst:

- För högtemperaturvärme inom industrin
- För produktion av flytande bränslen (t.ex. för flyg och sjöfart)

I dessa sektorer finns begränsade alternativ för att producera energitäta bränslen eller högvärdig förbränning, vilket gör att biomassa även med inkluderad kolalternativkostnad förblir konkurrenskraftig just där.

#### Systemeffekter och tekniksamspel

När biomassaanvändningen minskar kompenserar energisystemet genom:

- Ökad elektrifiering

- Större utbyggnad av vind- och solkraft
- Ökad användning av vätgasbaserade lösningar

Detta visar att energisystemets struktur påverkas av hur biomassa värderas ur ett klimatperspektiv, men att nettonollmålet fortfarande kan uppnås genom teknisk substitution.

#### Metodologiskt bidrag

Ett viktigt resultat är att inkludering av förändringar i kolstock (mark, levande biomassa och atmosfär) ger en mer heltäckande bedömning av bioenergins klimatpåverkan än traditionella systemmodeller. Studien visar att energisystemanalyser riskerar att överskatta biomassans roll om markanvändning och kolalternativkostnad inte beaktas.

## 5 Diskussion

Resultaten visar att hur biomassa värderas i energisystemmodeller har avgörande betydelse för dess framtida roll i ett nettonollsystem. När alternativkostnaden för kol, det vill säga värdet av utebliven kolinlagring i mark och levande biomassa, inkluderas minskar den kostnadsoptimala användningen av biomassa med cirka hälften. Detta pekar på att tidigare studier sannolikt har överskattat bioenergins roll genom att inte fullt ut beakta markanvändningens klimatpåverkan.

#### Betydelse för energisystemets utveckling

Trots den minskade biomassaanvändningen kvarstår biomassa i de sektorer där alternativen är begränsade: högtemperaturvärme inom industrin samt produktion av flytande bränslen för exempelvis flyg och sjöfart. Detta stärker bilden av att biomassa är en begränsad resurs som bör prioriteras till så kallade svårelektrifierade sektorer.

I övriga delar av energisystemet visar resultaten att elektrifiering, vindkraft, solkraft och vätgas är mer kostnadseffektiva lösningar när även markens kolvärde beaktas. Detta innebär att en strategi med omfattande bioenergianvändning riskerar att tränga undan mer klimat- och resurseffektiva alternativ.

#### Policyimplikationer

Studien pekar på ett behov av att bättre integrera markanvändningsperspektivet i energi- och klimatpolitik. Om styrmedel enbart fokuserar på utsläpp vid



2026-02-25

2026-202977-0001

förbränning, utan att ta hänsyn till förändringar i kolstock, finns en risk för suboptimering ur klimatsynpunkt.

Resultaten stödjer därför:

- Att biomassa betraktas som en knapp resurs
- Att restflöden och avfallsbaserade resurser prioriteras
- Att styrmedel utvecklas som reflekterar alternativkostnaden för kol

Detta kan exempelvis innebära att klimatpolitiska ramverk i högre grad kopplar samman energi-, skogs- och markanvändningspolitik.

#### Osäkerheter och begränsningar

Det finns samtidigt osäkerheter kopplade till antaganden om framtida teknikkostnader, biomassapotentialer och hur snabbt kolstockar återbildas. Resultaten bygger på modellantaganden om Europa som helhet och fångar inte alla regionala skillnader i skogstillväxt, markförhållanden och industriell struktur.

Vidare behandlas kolalternativkostnaden genom modellering av förändrad kolstock, men verkliga ekologiska processer är mer komplexa och tidsberoende än vad som fullt ut kan representeras i ett optimeringsramverk.

#### Samhälleliga effekter och nästa steg

Projektets resultat bidrar med ny kunskap om hur bioenergins klimatnytta bör värderas i ett systemperspektiv. Detta kan få betydelse för långsiktiga investeringsbeslut, särskilt inom skogsindustri, biodrivmedelsproduktion och energiinfrastruktur.

Nästa steg i forskningen bör inkludera:

- Fördjupad analys av tidsdimensionen för kolinlagring
- Integrering av biologisk mångfald och andra ekosystemtjänster
- Regionalt mer detaljerade analyser av biomassaresurser
- Analys av hur styrmedel kan utformas för att internalisera kolalternativkostnaden

Sammanfattningsvis visar projektet att bioenergins roll i framtidens hållbara energisystem är mer begränsad än vad många tidigare studier antytt, men samtidigt strategiskt viktig i vissa sektorer. En effektiv klimatstrategi kräver därför att biomassa används selektivt och med fullt beaktande av dess påverkan på kolbalansen i mark och biomassa.

## 6 Publikationslista

Renzelmann, T., Reichenberg, L., Wirsenius, S., Hedenus, F. (2026). Reassessing the Value of Bioenergy: Carbon Stock Changes Matter. *Manuscript submitted to Joule March 2026.*

Renzelmann, T., Johansson, D., Persson, M., Reichenberg, L. (2026). Weighting Emissions and Removals over Time: Introducing WE-CO<sub>2</sub> and a Welfare-Equivalent CO<sub>2</sub> Weighting Rate. *Manuscript to be submitted to Nature Climate Change April 2026.*

Hedenus, F. (2026). When Models Outrun Politics: Biofuels as a Stress Test for Scenario Plausibility. *Manuscript submitted to Energy Research and Social Science December 2025.*

## 7 Referenser, källor

1. Mandley, S., Wicke, B., Junginger, H., Vuuren, D. van, Daioglou, V. (2022). Integrated assessment of the role of bioenergy within the EU energy transition targets to 2050. *GCB Bioenergy 14*, pp. 157–172. doi: 10.1111/gcbb.12908.321.
2. Merfort, L., Bauer, N., Humpeöder, F., Klein, D., Strefler, J., Popp, A., Luderer, G., Kriegler, E. (2023). Bioenergy-induced land-use-change emissions with sectorally fragmented policies. *Nature Climate Change 13*, pp. 685–692. doi: 10.61038/s41558-023-01697-2.722.
3. Zhao, X., Mignone, B. K., Wise, M. A., McJeon, H. C. (2024). Trade-offs in land-8based carbon removal measures under 1.5 °C and 2 °C futures. *Nature Communications 15*, p. 2297. doi: 10.1038/S41467-024-46575-3.

## 8 Bilagor

[Klicka och skriv]