



Livscykelanalys av träkol

En jämförande analys mellan traditionell och förbättrad produktion och användning av träkol i Etiopien och Kenya.

Life cycle assessment of charcoal - A comparative analysis between traditional and modern production and usage of charcoal in Ethiopia and Kenya.

Andrea Brodd Sund
Sebastian Granath Wendt

Fördjupande projektarbete i energisystem • 15 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap, Institutionen för energi och teknik
Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Projektarbete i energisystem, 2025:1
Uppsala 2025



Livscykelanalys av träkol - En jämförande analys mellan traditionell och förbättrad produktion samt användning av träkol i Etiopien och Kenya.

Life cycle assessment of charcoal - A comparative analysis between traditional and modern production and usage of charcoal in Ethiopia and Kenya.

Andrea Brodd Sund & Sebastian Granath Wendt

Handledare: Lisa Zakrisson, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för energi och teknik

Ämnesgranskare: Cecilia Sundberg, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för energi och teknik

Examinator: Åke Nordberg, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för energi och teknik

Omfattning: 15 hp

Nivå och fördjupning: A1F

Kurstitel: Fördjupande projektarbete i energisystem

Kurskod: TE0023

Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem

Kursansvarig inst.: Institutionen för energi och teknik

Utgivningsort: Uppsala

Utgivningsår: 2025

Upphovsrätt: Alla bilder har skapats av författarna
(Andrea Brodd Sund, Sebastian Granath Wendt)

Serietitel: Projektarbete i energisystem, Institutionen för energi och teknik, SLU

Delnummer i serien: 2025:1

Nyckelord: akacia, energi, energibrikett, Etiopien, försurning, Kenya, klimatpåverkan, markanvändning, pyrolys, träkol

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för energi och teknik

Sammanfattning

Träkol är ett av de viktigaste bränslena för Kenya och Etiopien då det möjliggör matlagning för en majoritet av befolkningen i båda länderna. Förbränning av träkol leder till mindre rök och partiklar, vilket gör det mer lämpligt än ved för användning inomhus och i tätbebyggda områden. Dessutom har träkol högre energidensitet än ved och kan vara en koldioxidneutral produkt om tillverkning sker på rätt sätt. Dock kan olaglig avverkning av naturskog leda till problem för träkolet ur ett hållbarhetsperspektiv. Därför har en livscykelanalys (LCA) och en energi- och massflödesanalys gjorts för att undersöka och förstå träkolets energi- och miljörelaterade problem och möjligheter.

Rapporten undersöker klimatpåverkan, markanvändning och utsläpp av försurande ämnen för att laga en måltid för fem personer, med träkol från olika system. Träkol produceras genom pyrolys av biomassa. Massan avverkas antingen från naturskog utan återplantering eller från plantage med återplantering. LCA:n undersöker miljöpåverkan från fyra olika pyrolyslugnar; traditionell kolmila, Casamancemila, Green Mad Retort (GMDR) tegelugn och en Monitoring, Reporting and Verification (MRV) stålugn. Respektive pyrolysmetod analyseras både med och utan brikettproduktion, som utnyttjar träkolsdamm tillsammans med jord för att skapa briketter.

Resultatet visar att den viktigaste klimatmässiga faktorn för träkol är skogsbruk med återplantering. Resultaten tyder på att miljöpåverkan per måltid minskar proportionellt mot en ökad skörd på plantagen och att utsläppen av koldioxidekvivalenter (CO₂ekv) per måltid minskar proportionellt med andel återväxt av naturskog. Utnyttjandet av träkolsdamm för att producera briketter resulterade i en sänkning inom alla miljöpåverkanskategorier hos respektive pyrolysmetod som korrelerar med andelen träkolsdamm som bildas. Ytterligare syns en trend att bättre utvecklade pyrolystekniker ger både lägre utsläpp och kan producera mer träkol per mängd biomassa. MRV-stålugnar resulterade i lägst miljöpåverkan inom alla kategorier och kan därför anses vara det bästa alternativet för träkolsproduktion ur ett miljöperspektiv. En känslighetsanalys tyder på att antalet gånger som pyrolyslugnarna och matlagningsutrustningen används har en minimal påverkan för miljöpåverkan per måltid på grund av den relativt lilla mängden träkol som används per måltid jämfört med träkolet som utrustningen hanterar under sin livstid. Vidare enligt resultaten påverkar transportsträckan både utsläppen av försurande ämnen och växthusgaser proportionellt mot sträckan men har inte märkbar påverkan på markanvändningen per måltid.

Energi- och massflödesanalysen redogör energiåtgången och energiinnehållet för träkolet vilket visar att verkningsgraden för överföringen av energi i biomassa till energin som används under matlagning för en kolmila, Casamancemila, GMDR-tegelugn respektive MRV-stålugn är 32%, 44%, 46% respektive 53%. Vid dessa verkningsgrader producerar respektive ugn tillräckligt mycket träkol för 71, 98, 101 respektive 118 måltider per 100 kg biomassa. MRV-stålugnar kan anses därför vara det bästa alternativet för träkolsproduktion ur ett energiperspektiv. MRV-stålugnen visar störst potential för produktion och vidareanvändning av tjära och rökgaser.

Nyckelord: akacia, energi, energibrikett, Etiopien, förurning, Kenya, klimatpåverkan, markanvändning, pyrolys, träkol.

Abstract

Charcoal is one of Kenya and Ethiopia's most important fuels, as it enables cooking for a majority of their populations. Burning charcoal produces less smoke and particulate matter than wood, making it more suitable for use indoors and densely populated areas. Charcoal also has a higher energy density than wood and can be a carbon-neutral product if manufactured properly. However, illegal logging of natural forests can lead to sustainability problems for charcoal. A life cycle assessment (LCA) and an energy and mass flow analysis has therefore been carried out to investigate and understand the energy and environmental problems and opportunities that charcoal presents.

This report examines the climate impact, land use and acidification of producing a meal for five people cooked with charcoal from different systems. Charcoal is produced via pyrolysis of biomass which can be harvested either from natural forest where there is no replanting, or from plantations where replanting takes place after each harvest. The LCA examines the environmental impact from four different pyrolysis kilns; a traditional Earth mound kiln, a Casamance, a Green Mad Retort (GMDR) and a Monitoring, Reporting and Verification (MRV) steel kiln. Each method is analyzed; with and without briquette production, where charcoal dust is utilized together with soil.

The results show that the most important climate related factor for charcoal is sustainable forest management. The results indicate that the environmental impact per meal is inversely proportional to the yield from the plantation, and that the emissions of carbon dioxide equivalents (CO₂eq) per meal decreases linearly as larger parts of natural forests regrow. The utilization of charcoal dust to produce briquettes resulted in a reduction in all environmental impact categories. This reduction is correlated with the proportion of charcoal dust produced in each pyrolysis method. Additionally, the results show trends that better developed pyrolysis techniques do not only produce less emissions but are also more efficient. MRV-steel kilns resulted in the lowest environmental impact in all categories and can therefore be considered the best alternative for charcoal production from an environmental perspective. A sensitivity analysis suggests that the number of times the pyrolysis kilns and cooking equipment are used has a minimal impact on the environmental impact per meal due to the relatively small amount of charcoal used per meal compared to the amount of charcoal that the equipment handles during its lifetime. Furthermore, the results suggest that the transport distance affects both the emissions of acidifying substances and greenhouse gases proportionally to how much the distance changes but has no considerable impact on land use per meal.

An energy and mass flow analysis, accounting for the energy input and energy content of the charcoal, shows that the efficiency of the transfer of energy in biomass to the energy used when cooking is 32%, 44%, 46% and 53% with charcoal produced using an Earth mound kiln, Casamance, GMDR and MRV-steel kiln respectively. At these efficiencies, each kiln produces enough charcoal for 71, 98, 101 and 118 meals per 100 kg of biomass, respectively. MRV-steel kiln can therefore be considered the best option for charcoal production from an energy perspective. The MRV-steel kiln shows the greatest potential for the production and use of tar and flue gases.

Keywords: *Acacia, acidification, charcoal, climate impact, energy, energy-briquettes, Ethiopia, Kenya, land use, pyrolysis.*

Innehållsförteckning

Förkortningar.....	
Begreppslista.....	
Arbetsfördelning.....	
1. Bakgrund.....	1
1.1. Mål och omfattning.....	1
1.2. Avgränsningar.....	2
2. Metod.....	3
2.1. Livscykelanalys.....	3
2.2. Funktionell enhet.....	3
2.3. Systemindelning.....	3
2.4. Mjukvaruimplementering.....	5
2.5. Miljöpåverkanskategorier.....	6
2.6. Klassificering av utsläpp från biomassa.....	6
2.7. Inventeringsanalys.....	7
2.7.1. Råvaruutvinning.....	7
2.7.2. Biomassarester.....	8
2.7.3. Träkolsproduktion.....	8
2.7.4. Transporter.....	10
2.7.5. Användning.....	11
2.8. Känslighetsanalys.....	11
2.9. Energi- och massflödesanalys.....	12
3. Resultat.....	13
3.1. Energi- och massflödesanalys.....	13
3.2. Traditionell träkolsproduktion.....	15
3.3. Förbättrade system.....	16
3.3.1. Klimatpåverkan.....	16
3.3.2. Markanvändning.....	17
3.3.3. Försurning.....	18
3.4. Känslighetsanalyser.....	19
3.4.1. Skörd från plantage.....	19
3.4.2. Materialanvändning.....	20
3.4.3. Transportsträcka.....	20
3.4.4. Återväxt av naturskog.....	23
3.5. Sammanfattning resultat.....	23
4. Diskussion.....	25
4.1. Felkällor.....	25
4.1.1. Subjektiva bedömningar.....	25
4.1.2. Råvaruutvinning.....	25
4.1.3. Träkolsproduktion.....	25
4.1.4. Transporter och bränsleanvändning.....	26
4.1.5. Användning.....	26

4.2. Energi- och massflödesanalys.....	26
4.3. Biprodukter.....	26
4.3.1. Tjära.....	26
4.3.2. Rökgaser.....	27
4.4. Övriga aspekter.....	27
4.4.1. Ekonomi.....	27
4.4.2. Social hållbarhet.....	27
4.4.3. Biologisk mångfald.....	28
Slutsatser.....	29
Referenser.....	30
Publicering och arkivering.....	33
Bilagor.....	34

Förkortningar

Förkortning	Förklaring
<i>LCA</i>	Livscykelanalys
<i>CO₂ekv</i>	Koldioxidekvivalenter
<i>SO₂ekv</i>	Svaveldioxidekvivalenter
<i>crop-ekv</i>	Skördeekvivalent
<i>GWP</i>	Global warming potential
<i>AP</i>	Acidification Potential
<i>TSO</i>	Total surface occupation
<i>ALO</i>	Agricultural land occupation
<i>IPCC</i>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
<i>GMDR</i>	<i>‘Green Mad Retort’</i>
<i>MRV</i>	<i>‘Monitoring, Reporting and Verification’</i>
<i>KCJ</i>	<i>‘Kenyan Ceramic Jiko’</i>
<i>Grot</i>	Blandning av löv, rötter och små grenar

Begreppslista

<i>Naturskog</i>	Naturligt förekommande skog som växer fritt.
<i>Traditionell framställning av träkol</i> <i>/ Traditionell träkolsystem</i>	Avverkning av naturskog för framställning av träkol i en kolmila utan återplantering av skog.
<i>Kolmila / Jordmila</i>	Vedklabbar staplas och täcks med ett lager halm och därefter jord för att skapa en pyrolysuugn, en mila. (eng. <i>Earth mound kilns</i>)

Arbetsfördelning

Figurer

Figur 1-3, 8-17.....	A. Brodd Sund
Figur 4-7	S. Granath Wendt

Tabeller

Tabell 1, 2.....	A. Brodd Sund
Tabell 3.....	S. Granath Wendt

Bilagor

Bilaga 1.....	Delat
Bilaga 2, 3, 5-11.....	A. Brodd Sund
Bilaga 4.....	S. Granath Wendt

Text

Förkortningar.....	Delat
Begreppslista.....	Delat
1. Bakgrund.....	S. Granath Wendt
1.1. Mål och omfattning.....	Delat
1.2. Avgränsningar.....	Delat
2. Metod	
2.1. Livscykelanalys.....	A. Brodd Sund
2.2. Funktionell enhet.....	Delat
2.3. Systemindelning.....	A. Brodd Sund
2.4. Mjukvaruimplementering.....	A. Brodd Sund
2.5. Miljöpåverkanskategorier.....	A. Brodd Sund
2.6. Klassificering av utsläpp från biomassa.....	A. Brodd Sund
2.7. Inventeringsanalys	
2.7.1. Råvaruutvinning.....	A. Brodd Sund
2.7.2. Biomassarester.....	A. Brodd Sund
2.7.3. Träkolsproduktion.....	Delat
2.7.4. Transporter.....	A. Brodd Sund
2.7.5. Användning.....	A. Brodd Sund
2.8. Känslighetsanalys.....	A. Brodd Sund
2.9. Energi- och massflödesanalys.....	S. Granath Wendt
3. Resultat	
3.1. Energi- och massflödesanalys.....	S. Granath Wendt
3.2. Traditionell träkolsproduktion.....	A. Brodd Sund
3.3. Förbättrade system	
3.3.1. Klimatpåverkan.....	A. Brodd Sund
3.3.2. Markanvändning.....	A. Brodd Sund
3.3.3. Försurning.....	A. Brodd Sund
3.4. Känslighetsanalyser	
3.4.1. Skörd från plantage.....	A. Brodd Sund
3.4.2. Materialanvändning.....	A. Brodd Sund
3.4.3. Transportsträcka.....	A. Brodd Sund

3.4.4. Återväxt av naturskog.....	A. Brodd Sund
3.5. Sammanfattning resultat.....	Delat
4. Diskussion	
4.1. Felkällor	
4.1.1. Subjektiva bedömningar.....	S. Granath Wendt
4.1.2. Råvaruutvinning.....	Delat
4.1.3. Träkolsproduktion.....	Delat
4.1.4. Transporter och bränsleanvändning.....	Delat
4.1.5. Användning.....	Delat
4.2. Energi- och massflödesanalys.....	S. Granath Wendt
4.3. Biprodukter	
4.3.1. Tjära.....	S. Granath Wendt
4.3.2. Rökgaser.....	S. Granath Wendt
4.4. Övriga aspekter	
4.4.1. Ekonomi.....	S. Granath Wendt
4.4.2. Social hållbarhet.....	S. Granath Wendt
4.4.3. Biologisk mångfald.....	S. Granath Wendt
Slutsatser.....	Delat
Referenser.....	Delat

1. Bakgrund

Träkol är ett av de viktigaste bränslena i många låg- och medelinkomstländer som Kenya och Etiopien då det möjliggör matlagning. Jämfört med ved genererar träkol mindre rök och partiklar vid förbränning, vilket gör det mer lämpligt för användning inomhus och i tätbebyggda områden. Träkol kan nästan uppnå koldioxidneutralitet beroende på tillverkningsmetod och resurshantering. Träkolet har dock sina brister som att det ofta härstammar från olaglig avverkning av naturskog.

Framställning av träkol sker genom pyrolys, en process där biomassa upphettas i en syrefattig miljö. Under pyrolysen frigörs ämnen i biomassan som metan, väte och svavel samt andra restprodukter beroende på vilken typ av biomassa som används. Kvar blir grundämnet kol i koncentrerad form, träkol.

I både Kenya och Etiopien är akaciaträd ett av de vanligaste träslaget för träkolstillverkning. I ett hållbart skogsbruk drivs träden upp från frö för att sedan odlas och avverkas för produktion och användning inom landet, vilket skapar en sluten produktionskedja som genererar arbetstillfällen och ekonomiska värden inom länderna och deras regioner. Ett hållbart skogsbruk i kombination med förbättrade produktionsmetoder kan bidra till minskade utsläpp, högre energieffektivitet och träkol av bättre kvalitet.

Trots detta sker en stor del av träkolsproduktionen med olagligt skördad biomassa från naturskog, vilket leder till miljömässigt negativa konsekvenser och påverkar träkolets totala klimatpåverkan och markanvändning. Traditionella system är ofta ineffektiva resursmässigt, bidrar till avskogning och saknar miljömässiga och säkerhetsmässiga kontrollmekanismer. Eftersom denna produktion inte regleras formellt, förlorar lokala samhällen också viktiga intäkter och arbetstillfällen.

Träkolets miljöpåverkan för både produktion och användning är kopplad till utsläpp av växthusgaser och partiklar, vilket påverkar både klimat och folkhälsa. Med rätt åtgärder, såsom återplantering av träd, reglerat skogsbruk och teknikutveckling, finns möjligheter att minska miljöpåverkan och samtidigt förbättra livsvillkoren för de människor som är beroende av träkol.

1.1. Mål och omfattning

Målet med denna rapport är att analysera livscykeln för träkol från råvaruutvinning till användning i de östafrikanska grannländerna Etiopien och Kenya. Insamlad data från lokala forskningsprojekt används för att klargöra skillnaden mellan traditionella system som ofta baseras på illegalt skogsbruk med avverkning av naturskog och ineffektiva produktionstekniker, samt system som utnyttjar förbättrad teknik samt hållbart skogsbruk ur ett miljö- och energiperspektiv.

Syftet med rapporten är att besvara hur stor klimatpåverkan, föroreningen samt användning av markareal och markresurser är per måltid för 5 personer som använder träkol i traditionella respektive förbättrade träkolsystem. Rapporten redovisar även energi- och massbalans för respektive pyrolyssystem för att få fördjupad förståelse för energi och resurseffektivitet.

1.2. Avgränsningar

En produkts ekonomiska och/eller sociala aspekter tas vanligtvis inte med i en LCA eftersom det är ett miljöledningsverktyg enligt ISO 14040:2006 (SIS, 2006). Livscykelanalysen tar därför ingen hänsyn till ekonomiska och kulturella faktorer som kan vara av relevans för resultaten eller tolkningen. Eventuell användning av gödsel exkluderas från systemet eftersom de flesta källor uppger att det inte används. Produkter som rökgaser, tjära och värme exkluderas från systemets gränser som restprodukter och används inte för att allokera bort utsläpp från träkol, trots att de i verkligheten kan ses som värdefulla biprodukter. Detta på grund av att det är svårt att hitta trovärdiga data för mängden producerade restprodukter som produceras i de olika pyrolyssystemen.

Träkolsdamm ingår i systemen då det kan användas till att skapa energibriketter för bland annat matlagning. Systemen kommer att inkludera utsläpp av växthusgaser och försurande ämnen samt markanvändning och primära energin för resurser som används direkt i processerna, som exempelvis bränslen, halm, metall, tegel och maskiner.

Energin som går åt för att producera matlagningsutrustningen har försumrats då nästan ingen ändring i någon av miljöpåverkanskategorierna vid mer eller mindre användning av matlagningsutrustning (*Bilaga 8, 9, och 10*). Vidare antaganden kommer att beskrivas löpande i texten.

2. Metod

2.1. Livscykelanalys

Enligt den gällande globala standarden *Miljöledning – Livscykelanalys – Principer och struktur* ISO 14040:2006 kan livscykelanalys (LCA) används för "identifiering av möjligheter till förbättring av miljöprestandan hos produkter vid olika tidpunkter i deras livscykel" (SIS, 2006). En LCA består av fyra faser: definition av mål och omfattning, inventeringsanalys, miljöpåverkansbedömning, och livscykeltolkning. Rapporten undersöker ett antal träkolsystem som kan ses och beskrivs närmare under kapitel 2.3 *Systemindelning*. Analysen förväntas visa hur mycket hållbara och effektiva produktionsmetoder kan minska träkolets energi- och miljöpåverkan ur ett klimat- och energiperspektiv.

2.2. Funktionell enhet

Då systemet innefattar hela livscykeln för träkol och har funktionen att laga en måltid med träkol har funktionell enheten satts till per måltid för 5 personer. Detta grundar sig på att matlagning i de valda regionerna ofta görs för hela familjer och data som använts från liknande studier som exempelvis Njenga et al. (2014) baseras på måltider för 5 personer.

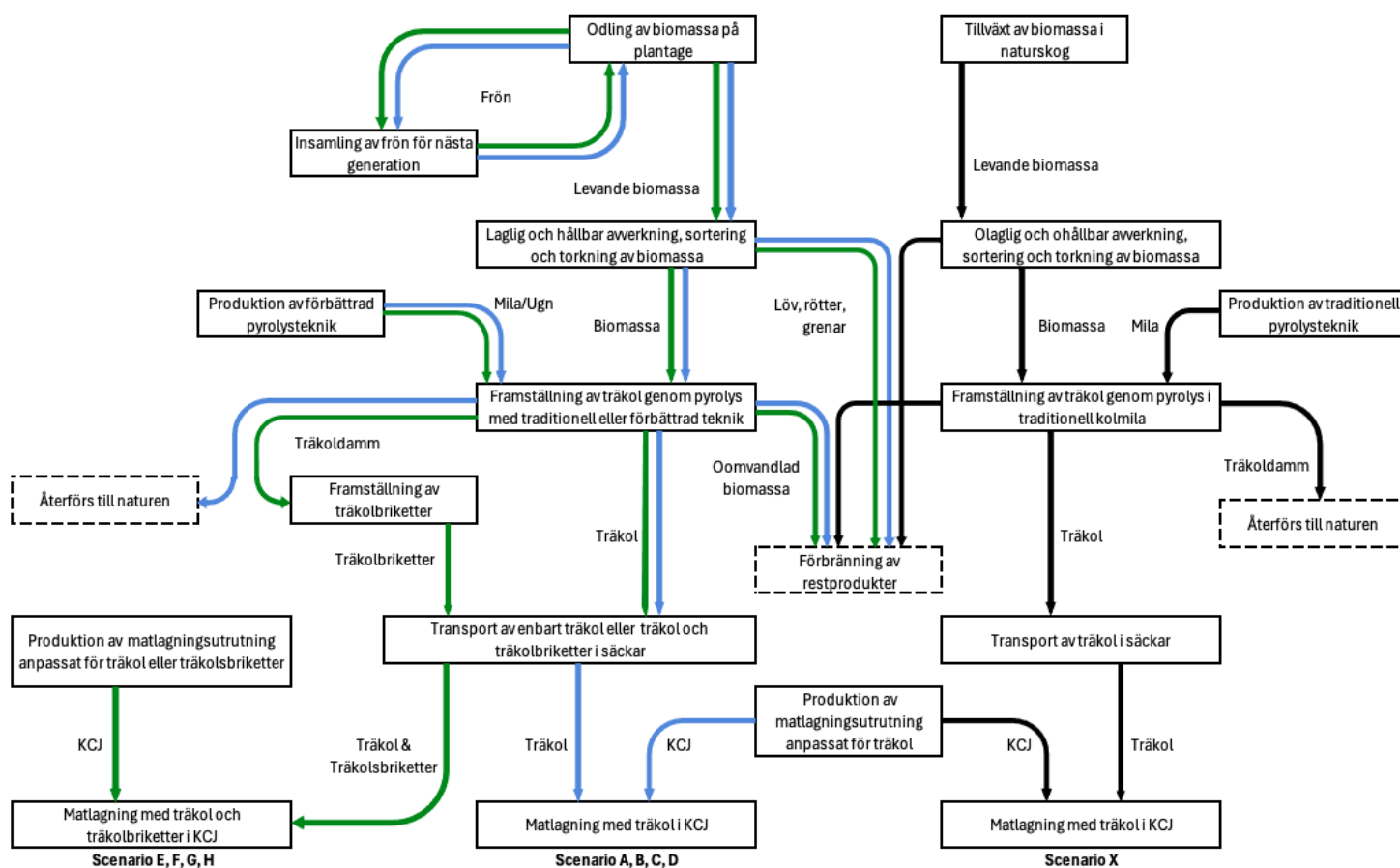
2.3. Systemindelning

De system som analyseras i denna rapport kan ses i *Tabell 1* nedan. All data som används i respektive process och system inventeras i *Bilaga 1*. Beskrivningar av möjliga val som kan göras i varje process förklaras vidare i texten.

Tabell 1 : System som analyserats i rapporten uppdelat baserat på biomassans ursprung, produktionsmetod, och formen som träkolet är i vid matlagningssteget.

Scenario	Biomassans ursprung	Produktionsmetod	Matlagning	Systemtyp
X	Naturskog	Traditionell kolmila	Träkol	Referens
A	Akaciaplantage	Traditionell kolmila	Träkol	Förbättrat system
B	Akaciaplantage	Casamancemila	Träkol	Förbättrat system
C	Akaciaplantage	GMDR-tegelugn	Träkol	Förbättrat system
D	Akaciaplantage	MRV-stålugn	Träkol	Förbättrat system
E	Akaciaplantage	Traditionell kolmila	Träkol och briketter	Förbättrat system med brikettproduktion
F	Akaciaplantage	Casamancemila	Träkol och briketter	Förbättrat system med brikettproduktion
G	Akaciaplantage	GMDR-tegelugn	Träkol och briketter	Förbättrat system med brikettproduktion
H	Akaciaplantage	MRV-stålugn	Träkol och briketter	Förbättrat system med brikettproduktion

Samtliga scenarion byggs upp av fem grundläggande steg; avverkning, sortering och torkning av biomassa; framställning av träkol genom pyrolys; förbränning av restprodukter; transporter av träkolet från producent till marknad; och matlagning med träkol. *Figur 1* illustrerar ett sammanslaget flödesschema för samtliga scenarion som presenterats i *Tabell 1*. Referenssystemet, scenario X, representerar ett traditionellt träkolsystem och följer de svarta pilarna. Här skördas naturskog som inte ersätts aktivt och har en naturlig cykel på cirka 14 år (Njenga et al., 2014). Lämplig biomassa används sedan för att framställa träkol i en traditionell kolmila (även kallad jordmila) som sedan transporteras via lastbil i säckar till marknad. Det antas att träkolsdamm som skapas under framställning återförs till naturen. Säckarna fyllda med träkol köps av privatpersoner som använder träkolet i en *Kenyan Ceramic Jiko* (KCJ) för att laga mat. Biomassa som är olämplig för pyrolys (små grenar, löv och rötter) samt biomassa som inte blir till träkol under pyrolys antas brännas på plats eller i hem.



Figur 1: Flödesschema över livscykeln för träkol i olika scenarion som presenterats i Tabell 1: referenssystemet, Scenario X (svart); förbättrade system, Scenario A, B, C, D (blå); förbättrade system med brikettproduktion Scenario E, F, G, H (grön). Streckade rutorna indikerar processer som behandlar restprodukter.

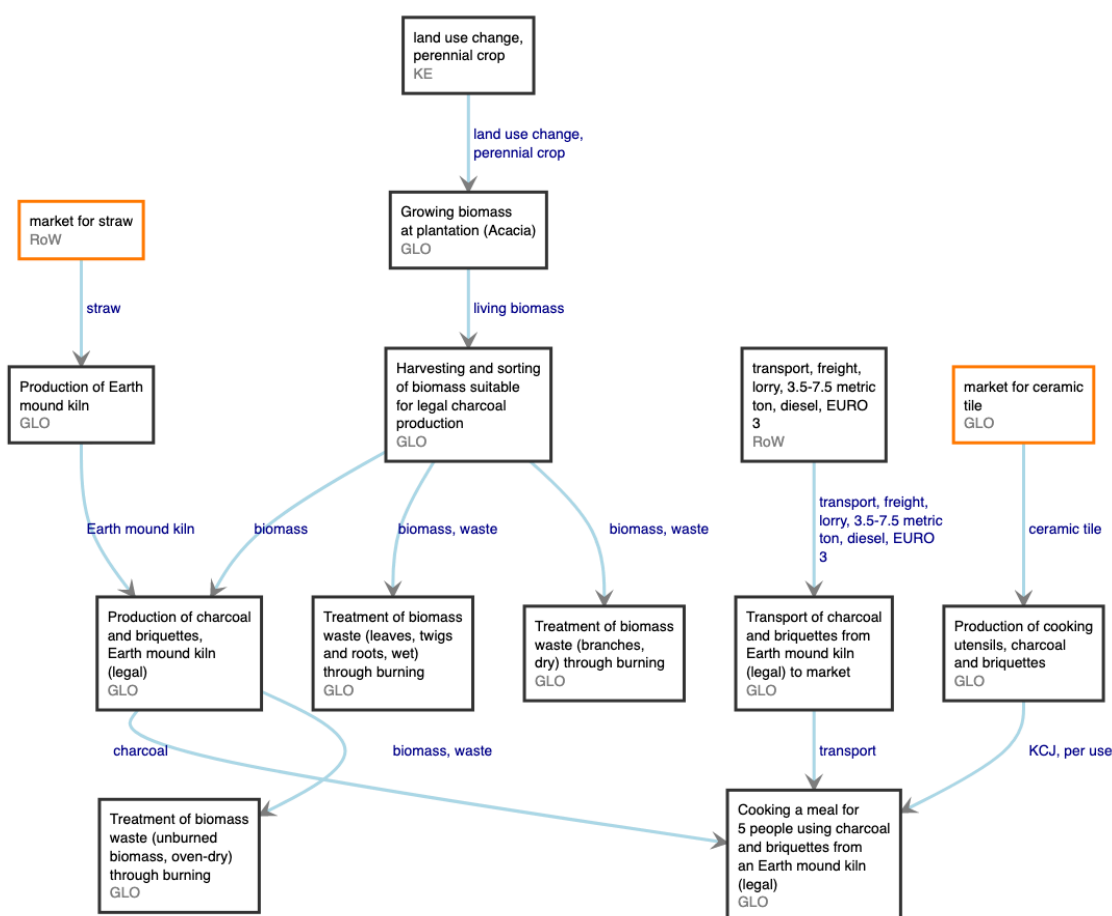
Förbättrade träkolsystem, scenario A-D, följer blåa pilarna i *Figur 1*. Här skördas snabbväxande akacia på mindre plantage med hållbart skogsbruk var femte till sjätte år. Skördade träd ersätts med hjälp av insamlade frön. Lämplig biomassa används för att framställa träkol i antingen en kolmila eller med en förbättrad teknik som Green Mad Retort (GMDR), Casamance eller MRV-steel kiln. Även i dessa fall bränns biomassarester från skörd och pyrolys på plats eller i hem och träkolsdamm återförs till naturen.

Scenario E-H, förbättrade träkolsystem med brikettproduktion, följer gröna pilarna i *Figur 1*. Till skillnad från scenario A-D används nu träkolsdamm från pyrolysisprocessen för att framställa träkolsbriketter. Som kan ses i *Figur 1* fraktas briketterna till marknader tillsammans med träkol i samma fordon.

2.4. Mjukvaruimplementering

Systemen modelleras i grafiska användargränssnittet Activity-Browser som används tillsammans med python-programmet *Brightway2*. Programmet agerar som en LCA-ram och utnyttjar databasen *Ecoinvent 3.11* samt *Biosphere 3* tillsammans med litteraturvärden och offentliga pythonbiblioteket *lca_algebraic* (Steubing et al., 2019). *Brightway2* utför olika beräkningar mellan matriser för att omvandla fysiska mängder till relevanta enheten för respektive påverkanskategori (Mutel, 2017). Inom *Brightway2* varierar nyckelparametrar inom bestämda sannolikhetsintervaller i iterationer för att således ta fram resultat för de olika påverkanskategorierna. Activity Browser-projektet och tillhörande Pythonkoden kan återfinnas i *Bilaga 2* respektive 3. Mer djupgående information om hur *Brightway2* bygger upp modeller och utför beräkningar kan återfinnas på deras hemsida.

Sammanlagt har nio system undersökts baserat på *Figur 1*. Ett exempel på hur ett system kan se ut visas i *Figur 2*, som är en grafisk representation av scenario E i *Tabell 1*.



Figur 2: Flödesschema över träkolsystem i Graph Explorer, Activity Browser (Scenario E). Systemet använder en kolmila och producerar både briketter och träkol.

2.5. Miljöpåverkanskategorier

I samband med produktionen och användningen av träkol emitteras växthusgaser som koldioxid, metan och lustgas samt försurande ämnen som svaveldioxid och kväveoxider. Gaserna leder till global uppvärmning i atmosfären. Storskaligt skogsbruk för träkolsproduktion kräver stora ytor och bristande utrustning vid både produktion och användning leder till onödigt stora utsläpp. Av dessa skäl har klimatpåverkan, försurning, markanvändning valts som miljöpåverkanskategorier.

För att kvantifiera påverkan inom respektive miljöpåverkanskategori har följande LCIA-metoder använts:

- Klimatpåverkan: *IPCC 2021, climate change: total (excl. biogenic CO₂, inkl. SLCFs), global warming potential (GWP100)*

Metoden använder uppvärmningspotentialer (GWP) för att uttrycka klimatpåverkan i koldioxidekvivalenter per måltid (CO₂ekv/måltid) hos respektive system. Hos en specifik gas kvantifierar GWP100 hur mycket värme den absorberar relativt koldioxid på 100 år. Metodens utsläppsfaktorer för GWP uppdateras regelbundet utifrån Assessment Reports från Förenta nationernas Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Vidare inkluderar metoden "short-lived climate forcers" (SLCFs) som exempelvis kolmonoxid.

- Försurning: *CML v4.8 2018, acidification (incl. fate, average Europe total, A&B) (AP)*.

Metoden används för att uttrycka försurningspotentialen (AP) för systemen i svaveldioxidekvivalenter per måltid (SO₂ekv/måltid). Hos specifika ämnen är deras AP baserat på hur väl de skapar försurande ämnen relativt svaveldioxid.

- Markanvändning (total yta): *Inventory results and indicators, resources, total surface occupation (TSO)*.

Metoden används för att bestämma totala markytan som tas i anspråk (TSO) av samtliga processer i respektive system uttrycket i kvadratmeter mark per måltid (m²/måltid).

- Markanvändning (resurs): *ReCiPe 2016 v1.03, midpoint (H), land use, agricultural land occupation (ALO)*.

Metoden används för att uttrycka användningen av mark som en resurs i en hierarkisk kultur baserat på markens karakteristiska värde relativt åkermark. Detta görs i kvadratmeter skördekvivalenter per måltid (m² crop-ekv/måltid). Exempelvis är naturskog av mindre värde för jordbruk och resulterar därmed i en lägre användning av m² crop-ekv än plantagens mark.

2.6. Klassificering av utsläpp från biomassa

Utsläpp som härstammar från biomassa hanteras på olika sätt beroende på utformningen av systemet som studeras. Relevanta utsläpp för denna studie kan ses i *Tabell 2. Ecoinvent* räknar inte med 'non-fossil' koldioxid i system som använder den IPCC-metoden som valts för denna studie (Sonderegger, 2024). Koldioxid från system som använder biomassa från plantage klassas därför enbart som 'non-fossil'. Koldioxiden som inte återabsorberas i referenssystemet sägs istället komma

‘from soil or biomass stock’ och inkluderas således i systemet. Resterande gaser antas inte absorberas av de nyplanterade träden och behandlas därför som ‘from soil or biomass stock’.

Tabell 2: Sammanfattning av de gaser som inkluderats i studien tillsammans med respektive miljöpåverkan enligt IPCC 2021, climate change: total (excl. biogenic CO₂, inkl. SLCFs), global warming potential. Processer: (1) förbränning av biomassarester, (2) träkolsproduktion, (3) transporter och (4) matlagning.

Utsläpp (Eng. IPCC klassificering)	Miljöpåverkan	Processer med direkta utsläpp
Koldioxid (Carbon dioxide, from soil or biomass stock)	GWP100 = 1	Referenssystemet: (1), (2), (3), (4)
Koldioxid (Carbon dioxide, non-fossil)	GWP100 = 0	Samtliga system: (1), (2), (3), (4)
Koldioxid (Carbon dioxide, fossil)	GWP100 = 1	Samtliga system: (3)
Kolmonoxid (Carbon monoxide, from soil or biomass stock)	GWP100 = 4,0624	Samtliga system: (1), (2), (3), (4)
Kolmonoxid (Carbon monoxide, fossil)	GWP100 = 4,0624	Samtliga system: (3)
Metan (Methane, from soil or biomass stock)	GWP100 = 29,8	Samtliga system: (1), (2)
Metan (Methane, fossil)	GWP100 = 29,8	Samtliga system: (3)
Lustgas (Dinitrogen monoxide, air)	GWP100 = 273	Samtliga system: (1), (3), (4)
Svaveldioxid (Sulfur dioxide, air)	AP = 1,2	Samtliga system: (1), (2), (3)
Kväveoxider (Nitrogen oxides, air)	AP = 0,5	Samtliga system: (1), (2), (3), (4)

2.7. Inventeringsanalys

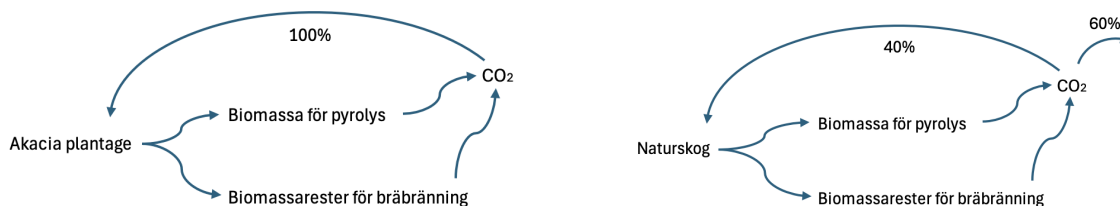
En fullständig lista över samtliga parametrar, deras medel-, max- och minvärde samt källor kan ses i Bilaga 1. Rödmarkerade värden hålls konstanta då de påverkar respektive system på samma sätt medan grönmärkade parametrar varierar då de påverkar specifika system oberoende.

2.7.1. Råvaruutvinning

Alla verktyg som exempelvis skottkärror, yxor och marknadsstånd antas ha en minimal påverkan på utsläpp som därför kan försummas. Inga fordon eller maskiner antas användas under odling eller skörd.

Naturskogen som undersöks liknar skogssavannen i Kenya bestående av *Acacia drepanolobium* som under 14 år genererar 18,3 ton biomassa lämplig för träkolsproduktion per hektar (Njenga et al., 2014). Koldioxiden som frisätts under träkolets livscykel eller när trärester förbränns kommer då vara delvis cirkulärt beroende på hur stor del av naturskogen som växer tillbaka. Andelen av utsläppen som behandlas som ‘non-fossil’ för referenssystemet och använder biomassa från naturskogen antas ha samma värde som andelen av naturskogen som växer tillbaks efter en skörd. Denna studie antar att ny biomassa krävs var femte till sjätte år baserat på odlingscykeln för Akacia (Tiruneh et al., 2025a). Naturskogen antas ha en naturlig rotation på 14 år enligt Njenga et al. (2014) och antas naturskogen vara återställd till ca 40% vid nästa skörd jämfört med ursprungliga naturskogen. Detta innebär att

40% av koldioxidutsläppen kommer att klassas som ‘*non-fossil*’ och 60% som ‘*from soil or biomass stock*’. Processen illustreras till höger i *Figur 3*.



Figur 3: Koldioxidkretsloppet för system mellan två skördar med biomassa från akaciaplantage med 100% återplantering (vänster) och naturskog med 40% återväxt (höger).

Biomassan som behövs för att framställa träkol kan antingen införskaffas genom avverkning av naturskog, där ingen återplantering sker, eller via cirkulärt skogsbruk av snabbväxande akaciaträd på åkermark. Akaciasläkten står för större delen av både naturskog och energiträd i Kenya och Etiopien och därför används data från (Tiruneh et al., 2025a) för att bedöma total skörd av biomassa från plantage respektive naturskog. Mass- och ämnesfördelningen i Akacia används för att beräkna utsläpp samt mängden biomassarester. I samtliga fall antas stammar och bark vara lämpliga för pyrolys, medan grenar, rötter och löv anses som biomassarester som förbränns. Etiopiska odlingar kan på 5-6 år generera ca 151 ton biomassa per hektar varav 128,5 ton anses lämpligt för framställning av träkol (Tiruneh et al., 2025a).

Enligt en studie i Etiopien har det visats att inga märkbara förändringar sker i markkolsnivåer vid plantering av *Acacia mearnsii* (Tiruneh et al., 2025a). Odlade träd kan under sina växande år användas för att samla in frön till nästa odlingscykel. Insamlingen sker manuellt och odling görs till en början i återvunna plaströr (exempelvis PET-flaskor) tills plantering av träd kan ske i odlingsmarken. Utsläpp av koldioxid som härstammar från plantagens biomassa klassas som *biogenic*, då nyplanterade träd absorberar koldioxid som emitterats från föregående generation och således blir processen koldioxidneutral. Processen illustreras till vänster i *Figur 3*.

2.7.2. Biomassarester

Resterande grot, rötter och grenar från skörd samt oomvandlad biomassa från pyrolys betraktas som rester. Det antas att löv, små grenar och rötter bränns upp vid produktionsplatsen medan de är färska med ett värmevärde på 10,9 MJ/kg (IPCC, 2006a). Grenar antas torka med stammen tills de har ett värmevärde på ca 16,05 MJ/kg (ibid.). Sedan tas grenarna med hem till arbetare som eldningsved. Biomassa som ansetts som lämplig men inte omvandlas under pyrolysen bränns upp efter processen och har då ett värmevärde på 20 MJ/kg (ibid.). Alla biomassarester antas förbrännas på ett eller annat sätt och utsläppen därifrån allokeras till träkolet.

2.7.3. Träkolsproduktion

Biomassan skördas manuellt och saltorkas i två till tre veckor för att sänka fukthalten till under 20% (Tazebew et al., 2023). Därefter klyvs träet och transporteras via skottkärra till en form av pyrolysuugn då produktionen antas ske intill odlingarna/naturskogen och därmed inte kräva någon transport (Tazebew et al., 2023). Pyrolysmetoden som används för att framställa träkol har stor betydelse för mängden biomassa som behövs per mängd träkol, utsläpp och primäre energi. Samtliga ugnar/milor antas användas en gång i veckan och lastas då med 2750 kg biomassa (3,72 m³) (ibid.).

Traditionella kolmilor består av en organiserad hög av biomassa där det kluvna träet staplas och täcks av ett lager halm från sädesslaget teff. Därefter ett lager jord med ventilationshål i botten. Mängden teff som används per kolmila har antagits till 100 kg baserat på uppskattning från bilder inkluderade i Njenga et al. (2014) och Tazebew et al. (2023). Processen tar fem till femton dagar beroende på storlek på milan, men då studien undersöker mindre milor antas det att processen inte tar mer än sju dagar (Nturanabo et al., 2011).

Casamansmilan är lik den traditionella kolmilan men har en skorsten av stål som sätts vid sidan av milan vilket förbättrar luftflödet och gör det möjligt att ta vara på tjära som också bildas under pyrolysen. Skorstenen gör att processen tar ungefär hälften så lång tid som för en traditionell kolmila. En typisk skorsten är gjord av ca 100 kg stål samt att det går åt 100 kg teff per sats (Nturanabo et al., 2011).

Green Mad Retort, GMDR, är en ugn som är gjord av tegel och murbruk och kan variera i storlek. Materialåtgången utgår från en GMDR som kan laddas med 10 m³ biomassa och kräver ca 7,5 ton tegel och 4 ton murbruk. Dessa tegelugnar kan hålla i 10 år innan murbruket spricker och ugnen måste rivas. Därefter kan samma tegel återbrukas i ytterligare två omgångar men ett nytt murbruk krävs för varje GMDR (Bailis et al., 2013).

'Monitoring, Reporting and Verification' (MRV)-stålugnar är gjorda av stål och kan användas i ca 10 år; efter 10 års användning antas en ny ugn installeras. En stålugn som kan lastas med 35 m³ är byggd med 12 ton stål bestående av plåt som är 25 mm tjockt. Vissa stålugnar kan även samla upp rökgaser som kan användas för att producera värme och el men de modelleras inte i denna studie (Bailis et al., 2013).

Materialåtgången för respektive ugn/mila har viktats mot volymen 3,72 m³ som motsvarar 2750 kg biomassa (Tabell 3). Tabell 3 redovisar även effektiviteten för respektive metod, vilket innebär hur mycket träkol i massprocent som bildas av torr biomassa enligt Tazebew et al. (2023).

Tabell 3: Effektivitet och materialåtgång för olika pyrolysuagnar med volymen 3,72m³. Viktning har gjorts baserat på biomassa med densitet 739 kg/m³ enligt Asmare et al. (2022).

Mila/Ugn	Effektivitet (träkol)	Effektivitet (träkol & koldamm)	Materialåtgång	Livslängd
Traditionell mila	20,09 %	21,2 %	teff: 100 kg	1 pyrolys
Casamancemila	28,6 %	29,33 %	teff: 100 kg stål: 100 kg	teff & jord: 1 pyrolys skorsten: 10 år
GMDR-tegelugn	29,67 %	30,23 %	tegel: 2,97 ton murbruk: 1,49 ton	tegel: 30 år murbruk: 10 år
MRV-stålugn	34,83 %	35,31 %	stål: 1,28 ton	10 år

Under framställning skapas även biprodukter som tjära, träkolsdamm och rökgaser. Tjära och rökgaser bortses från LCA. Träkolsdamm, pulveriserad träkol, kan vid effektivare produktionsmetoder samlas för att framställa energibriketter som kan användas tillsammans med träkolet i matlagningen. Produktionen av briketter antas ske manuellt i samband med träkolsframställningen och använder vatten och oorganisk jord från lokala vattendrag. Jord står för 20% av brikettens slutmassa (Njenga et al., 2014). Briketterna formas genom att använda återvunna plaströr (t.ex PET-flaskor) och torkas i

solen. Träkolsdamm antas i denna studie utgöra mellan 1,5-5% av det totala framställda träkolet. Studier som Njenga et al. (2014) tittar på kenyanska produktionskedjor där briketter skapas efter transport och då kan koldammet utgöra 10-15% av träkolet på grund av att produkten smulas under transport men då denna studie antar att produktion sker före transport är andelen träkolsdamm lägre.

Mängden biomassa som krävs för att framställa 1 kg träkol för respektive pyrolysugn samt utsläppen som orsakas baseras på data från Tazebew et al. (2023). I samma källa presenteras även mängden oomvandlad biomassa och icke-säljbar träkol, det sistnämnda har i denna rapport tolkats som träkolsdamm. Andelen av totala träkolet som kan användas i briketter beräknas enligt ekvation (1a) och andelen träkol som framställs per pyrolys enligt (1b).

$$X_{damm} = \frac{m_{damm}}{m_{damm} + m_{träkol}} \quad (1a)$$

$$X_{träkol} = \frac{m_{träkol}}{m_{damm} + m_{träkol}} \quad (1b)$$

2.7.4. Transporter

Efter framställning läggs säljbart träkol i återvunna tygsäckar för att kunna transporteras till en marknad (Njenga et al., 2014). Det antas att allt träkol och eventuella briketter från en pyrolys transporteras samtidigt. Vid transporter av träkolsbriketter utgör jord 20% av vikten som fraktas. Transporternas miljöpåverkan allokeras därför till det träkolet som är inbunden i briketterna (80% av massan som fraktas). Etiopien och Kenya har tillsammans en landareal på över 1,6 miljarder hektar (The True Size, 2025). Att köra mellan Etiopiens huvudstad, Addis Ababa och Addis Kidam Town nära Fagta Lokoma är över 460 km (Google Maps, 2025). I Kenya ligger odlingarna som studerades inom 200 km av Kenyas huvudstad Nairobi (Njenga et al., 2014). Då rapporten fokuserar på mindre akaciaplantage och utsläpp från transportsträckan påverkar systemen lika mycket sätts sträckan till 150 km och använder *Ecoinvents 'Lorry 3.5- 7.5 ton, diesel, EURO 3/RoW'*. Detta då Njenga et al. (2014) hävdar att träkol oftast transporteras av individer som använder mindre lastbilar. Eventuell transport mellan marknad och slutanvändning försummas.

Massan som lastas på fordon är avgörande för utsläppen då en frakt med *Ecoinvents 'Lorry 3.5- 7.5 ton, diesel, EURO 3/RoW'* beräknas med transportarbete i tonkm. Vid transporter av all träkol som framställts utan att skapa briketter beräknas transportarbetet, $W_{träkol}$, med ekvation (2a), där D är ett konstant avstånd (150 km). Då 20% av massan hos färdiga briketter utgörs av jord bestäms transportarbetet för träkol och briketter, $W_{brikett}$, med ekvation (2b).

$$W_{träkol} = D \cdot m_{träkol} \quad (2a)$$

$$W_{brikett} = D \cdot (m_{träkol} + \frac{m_{damm}}{0,8}) \quad (2b)$$

Väl framme allokeras utsläppen från frakten endast till träkolet som transporterats. Andelen av frakten som allokeras till en viss mängd träkol, x , om inga briketter har framställts, beräknas med ekvation (3a). Vid framställning av briketter beräknas andelen som, $X_{T,brikett}$, med ekvation (3b).

$$X_{T,träkol} = \frac{x}{m_{träkol}} \quad (3a)$$

$$X_{T,brikett} = \frac{x}{m_{träkol} + m_{damm}} \quad (3b)$$

2.7.5. Användning

I Kenya används traditionellt en keramisk Jiko för matlagning. Det är en portabel grill som väger mellan 3-6 kilo och är gjord av återvunnen metall och keramik. Materialåtgången har antagits till 1,5 kg keramik samt 1,5 kg återvunnen metall. Då metallen och keramiken är återanvänd räknas den inte med utsläppsfaktor i LCA:n (The Ceramic Jiko Stove, u.å.). Det antas att samma eller liknande utrustning används i Etiopien.

Rent träkol från *Acacia mearnsii* och briketter innehållande 80% träkol har genomsnittliga värmevärden på 29 kJ/g respektive 24,5 kJ/g (Njenga et al., 2014). Enligt samma källa kan 0,89 kg träkol motsvaras av 0,85 kg briketter. Anledningen till att det går åt mer träkol jämfört med briketter vid matlagning är då träkolet brinner snabbare och mer av värmen går till spillo. För att laga en måltid för 5 personer krävs det mellan 277,8 g - 308,2 g rent träkol beroende på utrustningens effektivitet (Kirimu et al., 2023). Således krävs ca 265,3 - 294,4 g briketter (innehållande ca 212,3 - 235,5 g träkol) för att laga en måltid för 5 personer.

Mängden träkol respektive briketter som krävs för att laga en måltid är givna, $m_{M, \text{träkol}} = 277,8 \text{ g} - 308,2 \text{ g}$ och $m_{M, \text{brikett}} = 212,25 - 235,48 \text{ g}$. Observera att $m_{M, \text{brikett}}$ enbart avser massan av träkol i briketterna, inte den totala massan. För att beräkna miljöpåverkan per måltid vid brikettproduktion baseras andelen av varje måltid som förbrukar briketter respektive träkol på mellan andelen träkol och träkolsdamm som framställs per pyrolys, X_{damm} och $X_{\text{träkol}}$. Totala mängden träkol som krävs per måltid för ett hushåll som både förbrukar träkol och briketter beräknas därför enligt ekvation (4).

$$m_{A, \text{träkol}} = (X_{\text{damm}} \cdot m_{M, \text{brikett}}) + (X_{\text{träkol}} \cdot m_{M, \text{träkol}}) \quad (4)$$

Samtliga utsläpp från briketterna allokeras till träkolet. Utsläppsvärden från IPCC:s utsläppsdatabas för förbränning av träkol i hem i g/MJ används för att beräkna utsläppen per måltid (IPCC, 2006b).

2.8. Känslighetsanalys

Fyra känslighetsanalyser utfördes för att visa hur resultaten varierar till följd av ändringar av individuella parametervärden:

- Skörd av biomassa per hektar på plantage: $\pm 20 \%$.
- Livslängd på matlagningsutrustningen och ugnarna: $\pm 50 \%$.
- Transportavståndet mellan produktionsplatsen och marknaden: $\pm 50 \%$.
- Andelen av naturskogen som växer tillbaka: 0-100 %

Skörd av biomassa per hektar på plantage undersöks då mängden varierar beroende på geografi. Exempelvis kan Kenyanska *Acacia mearnsii*-odlingar generera totalt 65 ton biomassa per hektar genom skörd av enbart mogna träd på ca 9 år (Njenga et al., 2014). Andelen av naturskogen som växer tillbaka undersöks då det bestämmer hur stor del av koldioxidutsläppen som klassas som 'non-fossil' respektive 'from soil or biomass stock' i referenssystemet. Transportavståndet mellan produktionsplatsen och marknaden analyseras då transporter med fossila bränslen kan påverka resultaten för samtliga system. Till sist undersöks livslängden på matlagningsutrustningen och ugnarna (dvs hur många gånger utrustningen kan användas) då produktion av material som exempelvis murbruk och tegel är koldioxidintensiva.

2.9. Energi- och massflödesanalys

Energimängden som bevaras i produkten under framställning av träkol varierar beroende på val av produktionsmetod. Vidare är stegen i livscykeln olika material- och energiintensiva beroende på hur de utförs. Materialen och energin kan i sin tur kräva fossil eller förnybar primärenergi. En energi- och massbalans utförs därmed för att kunna följa den inre energin hos produkten samt fossila- och förnybara primärenergiåtgången.

Flödet av energi och konvertering av massa har analyserats för de fyra olika pyrolysmetoderna: kolmila, casamancemila, GMDR-tegelugn och MRV-stålugn. Energiflödesanalysen redogör hur mycket energi från biomassa som omvandlas i en pyrolys till tjära, rökgaser respektive träkol samt hur mycket energi som tillsätts i systemet via transport. Massflödesgraferna redovisar hur biomassan omvandlas i ett pyrolyssystem och hur mycket av biomassan som övergår till träkol, träkolsdamm och oomvandlad biomassa. Rökgaserna har antagits till en brännbar gas istället för att delas upp i olika gaser på grund av dess komplexitet samt att det inte är huvuduppgiften i rapporten. Tjäran är förenkligad på liknande sätt men de är inkluderade i syfte att beskriva hur de potentiellt kan användas. Briketternas värmevärde har likställts med träkolets värmevärde då energivärdet bedöms vara försumbar efter beräkning. Relevanta värden för energidensitet och mängder träkol som använts i beräkningarna har sammanställts i *Bilaga 4*.

Ekvation (5) används för att beräkna energiverkningsgraden η_e där $E_{matlagning}$ är energin i det totala kolet som används för matlagning. $E_{biomassa}$ är den potentiella kemiska energin i biomassan och E_{diesel} är energin i dieseln som används för transport.

$$\frac{E_{matlagning}}{E_{biomassa} + E_{diesel}} = \eta_e \quad (5)$$

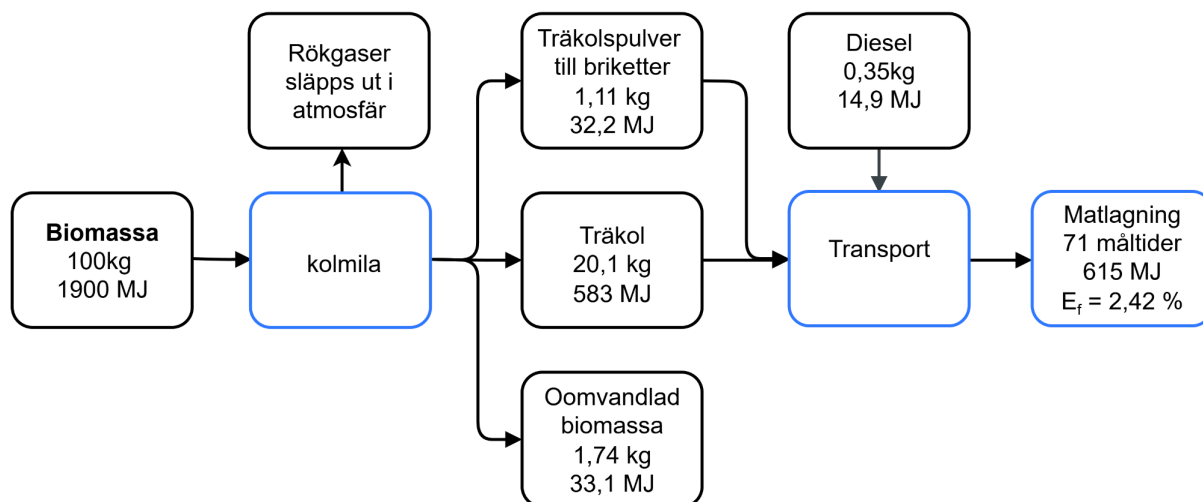
Ekvation (6) jämför kolmilan med MRV-stålugnen med avseende på mängd producerad träkol och kolpulver. Där $C_{kolmila}$ är mängden kol som produceras av 100 kg biomassa i kolmilan och C_{MRV} är mängden kol producerad av 100 kg biomassa i MRV-stålugnen. Resultatet (μ) blir skillnaden procentuellt i producerad kol i en MRV-stålugn jämfört med en kolmila.

$$\frac{C_{MRV} - C_{kolmila}}{C_{kolmila}} = \mu \quad (8)$$

3. Resultat

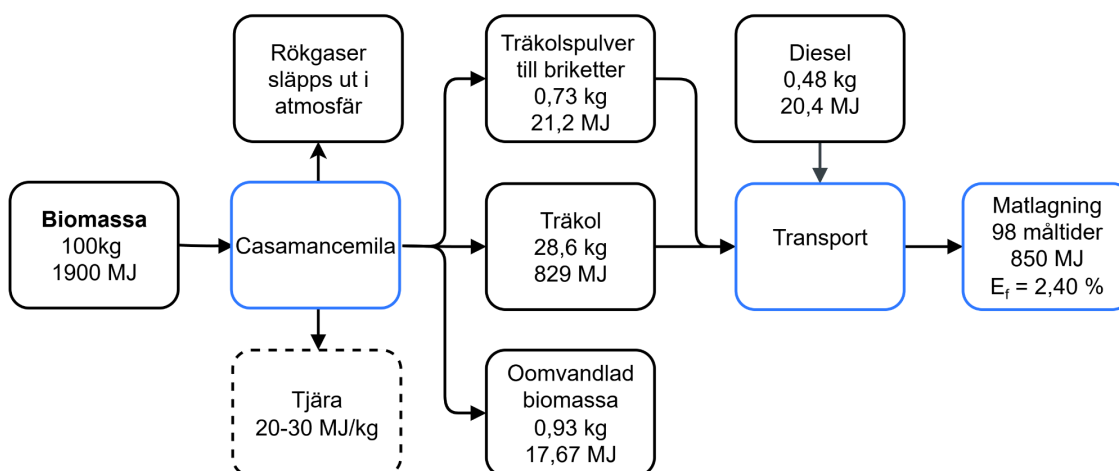
3.1. Energi- och massflödesanalys

Figur 4, 5, 6 och 7 illustrerar överföringen av massa samt energi från biomassa till träkol för matlagning när en kolmila, Casamancemila, GMDR-tegelugn respektive MRV-stålugn används med brikettproduktion. Dessa system motsvarar scenario E, F, G respektive H i Tabell 1.



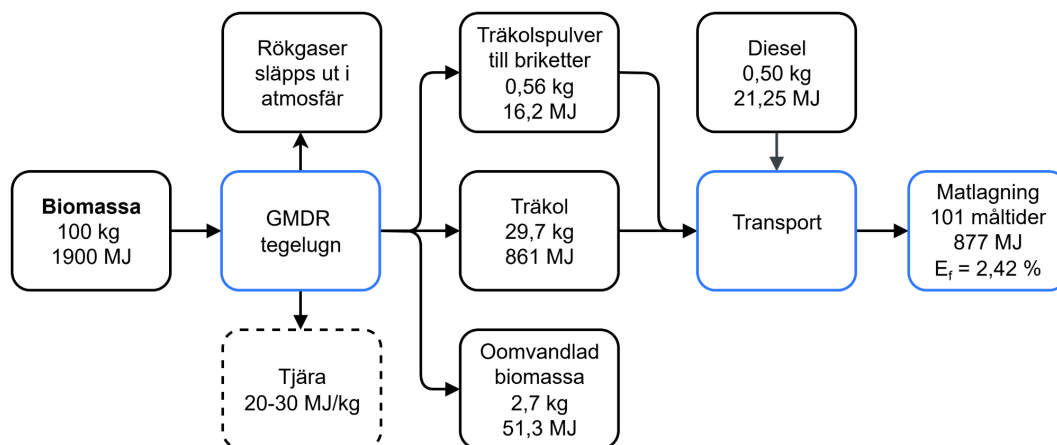
Figur 4: Energi- och massflödet från torr biomassa till träkol för matlagning i en kolmila med brikettproduktion (Scenario E). Processer och materialens mängd samt energi representeras av blåa respektive svarta rutor.

Kolmilan i Figur 4 producerar 21,2 kg träkol och träkolsdamm från 100 kg biomassa vilket möjliggör matlagning av 71 måltider. Den tar inte vara på tjäran som bildas i processen samt släpper ut rökgaser direkt i atmosfären. Det totala bidraget av energi från biomassan och transporten är 1915 MJ och energin från träkolet är 615 MJ vilket ger en energiverkningsgrad på 32 % från biomassans ursprungliga energi till matlagning. Andelen fossil energi från transporten är 2,42%.



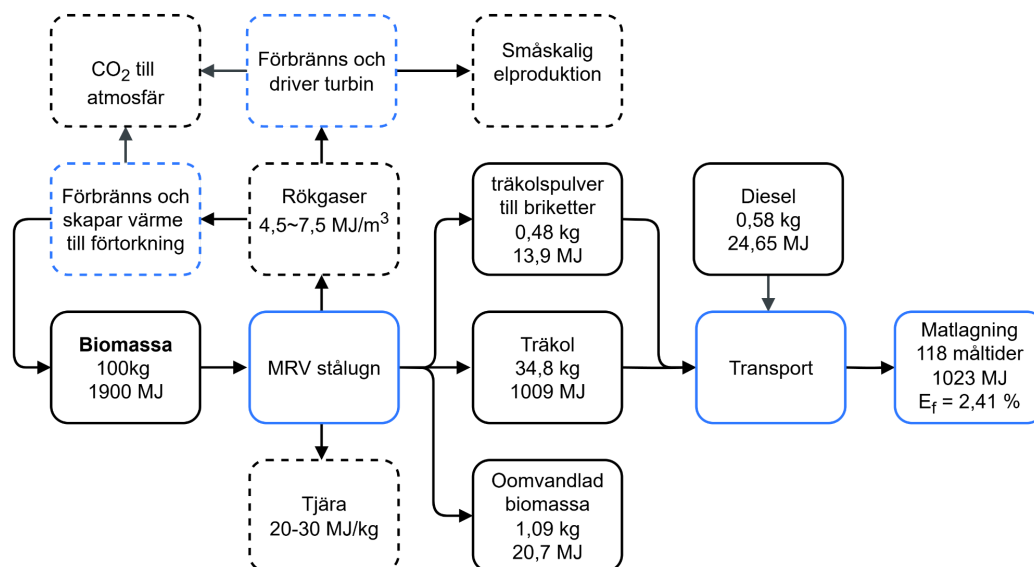
Figur 5: Energi- och massflödet från torr biomassa till träkol för matlagning i en casamancemila med brikettproduktion (Scenario F). Processer och materialens mängd samt energi representeras av blåa respektive svarta rutor. Streckade rutor indikerar material med potentiell användning.

Casamancemilan i *Figur 5* producerar 29,3 kg träkol och träkolsdamm från 100 kg biomassa vilket möjliggör matlagning av 98 måltider. Den har potential till att ta vara på tjäran som bildas i processen samt släpper ut rökgaser direkt i atmosfären. Det totala bidraget av energi från biomassan och transporten är 1920 MJ och energin från träkolet är 850 MJ vilket ger energiverkningsgraden 44 %. Andelen fossil energi är 2,4%.



Figur 6: Energi- och massflödet från torr biomassa till träkol för matlagning i en GMDR-tegelugn med brikettproduktion (Scenario G). Processer och materialens mängd samt energi representeras av blåa respektive svarta rutor. Streckade rutor indikerar material med potentiell användning.

GMDR-tegelugnen i *Figur 6* producerar 30,3 kg träkol och träkolsdamm från 100 kg biomassa vilket möjliggör matlagning av 101 måltider. Den har potential till att ta vara på tjäran som bildas i processen samt släpper ut rökgaser direkt i atmosfären. Bidraget av energi från biomassan och transporten är 1921 MJ och energin från träkolet är 877 MJ vilket ger energiverkningsgraden 46 %. Andelen fossil energi är 2,42%.



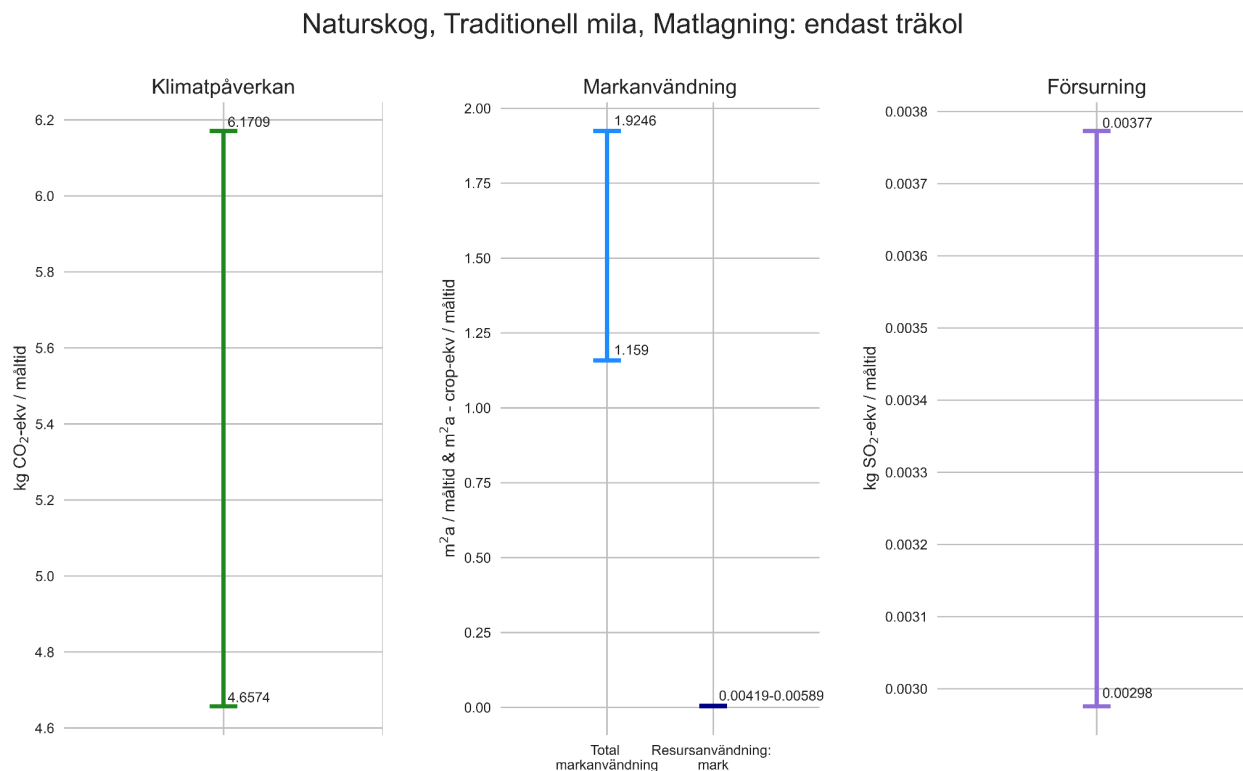
Figur 7: Energi- och massflödet från torr biomassa till träkol för matlagning i en MRV-stålu med brikettproduktion (Scenario H). Processer och materialens mängd samt energi representeras av blåa respektive svarta rutor. Svart- och blåstreckade rutor indikerar material respektive processer med potentiell användning.

MRV-stålugnen i *Figur 7* producerar 35,3 kg träkol och träkolsdamm från 100 kg biomassa vilket möjliggör matlagning av 118 måltider. Den har potential att ta vara på tjäran och rökgaserna i processen och kan teoretiskt både producera värme och el med hjälp av förbränning av rökgaserna. Det totala bidraget av energi från biomassan och transporten är 1925 MJ och energin från träkolet är 1023 MJ vilket ger en energiverkningsgrad på 53 %. Andelen fossil energi är 2,41%. En MRV-stålugn producerar 66% mer kol per pyrolys jämfört med en kolmila (ekvation (6)).

3.2. Traditionell träkolsproduktion

Resultaten som ses i *Figur 8* representerar klimatpåverkan, föroreningen och markanvändningen som yta och resursarea för en måltid lagad för 5 personer med träkol som framställts med en kolmila från naturskog. Då mer än hälften av växthusgasutsläppen från de olika stegen inte klassas som *biogenic* och inga briketter har skapats resulterar träkolet i ca 4,66-6,17 kgCO₂ekv/måltid enligt *GWP100*, beroende på bland annat effektiviteten hos milan och utrustningen för matlagning. För att framställa träkolet som krävs för måltiden behövs mellan ca 1,16-1,92 m² mark enligt *TSO*, vilket motsvarar 0,0042-0,0059 m² crop-ekv enligt *ALO*. En anledning att *TSO* och *ALO* skiljer sig kan vara att marken inte har en stor betydelse för jordbruk inom *ALO*. Föroreningen som träkolet orsakar landar mellan ca 3-3,8 gSO₂ekv/måltid. Resultaten används som en referens för de förbättrade system, som presenteras i *Figur 9-11*.

Samtliga resultat från miljöpåverkansanalysen och känslighetsanalysen redovisas i *Bilaga 11*.



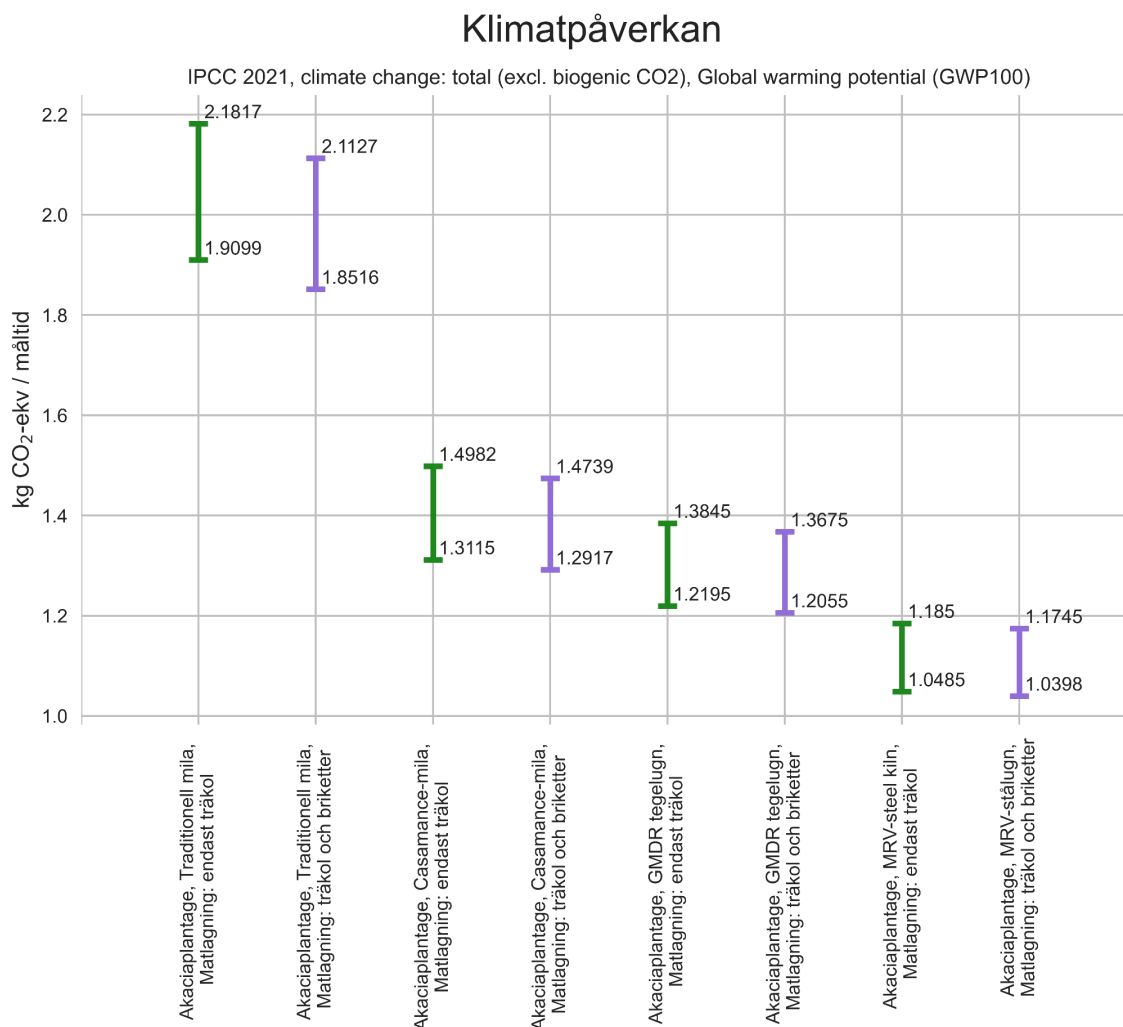
Figur 8: Klimatpåverkan, markanvändning, användning av markresurser och förorening per måltid för 5 personer för traditionella träkolsystemet, Scenario X.

3.3. Förbättrade system

3.3.1. Klimatpåverkan

Resultaten för klimatpåverkan för de förbättrade systemen redovisas i *Figur 9*. Första stapeln längst till vänster representerar ett system som är snarlikt det traditionella men använder biomassa från plantage och visar att bytet till biomassa från plantage reducerar klimatpåverkan med ca 61,8% enligt *GWP100*. Genom att byta biomassa från plantage och använda en Casamancemila, GMDR-tegelugn eller MRV-stålugn istället för en traditionell kolmila reduceras klimatpåverkan med cirka 73,8 %, 75,7 % respektive 79%.

Om även träkolsdammet tas till vara kan klimatpåverkan reduceras ytterligare jämfört med traditionellt system. Används träkolsdammet från kolmilor för att skapa energibriketter reduceras klimatpåverkan med cirka 63%. Används träkolsdammet från Casamancemilor, GMDR-tegelugnar eller MRV-stålugnar reduceras klimatpåverkan med 74,2 %, 76 % respektive 79,3 %. Dessa reduceringar reflekterar andelen som träkolsdamm utgör av den totala producerade träkolen, X_{damm} , som blir lägre för mer effektiva tekniker.



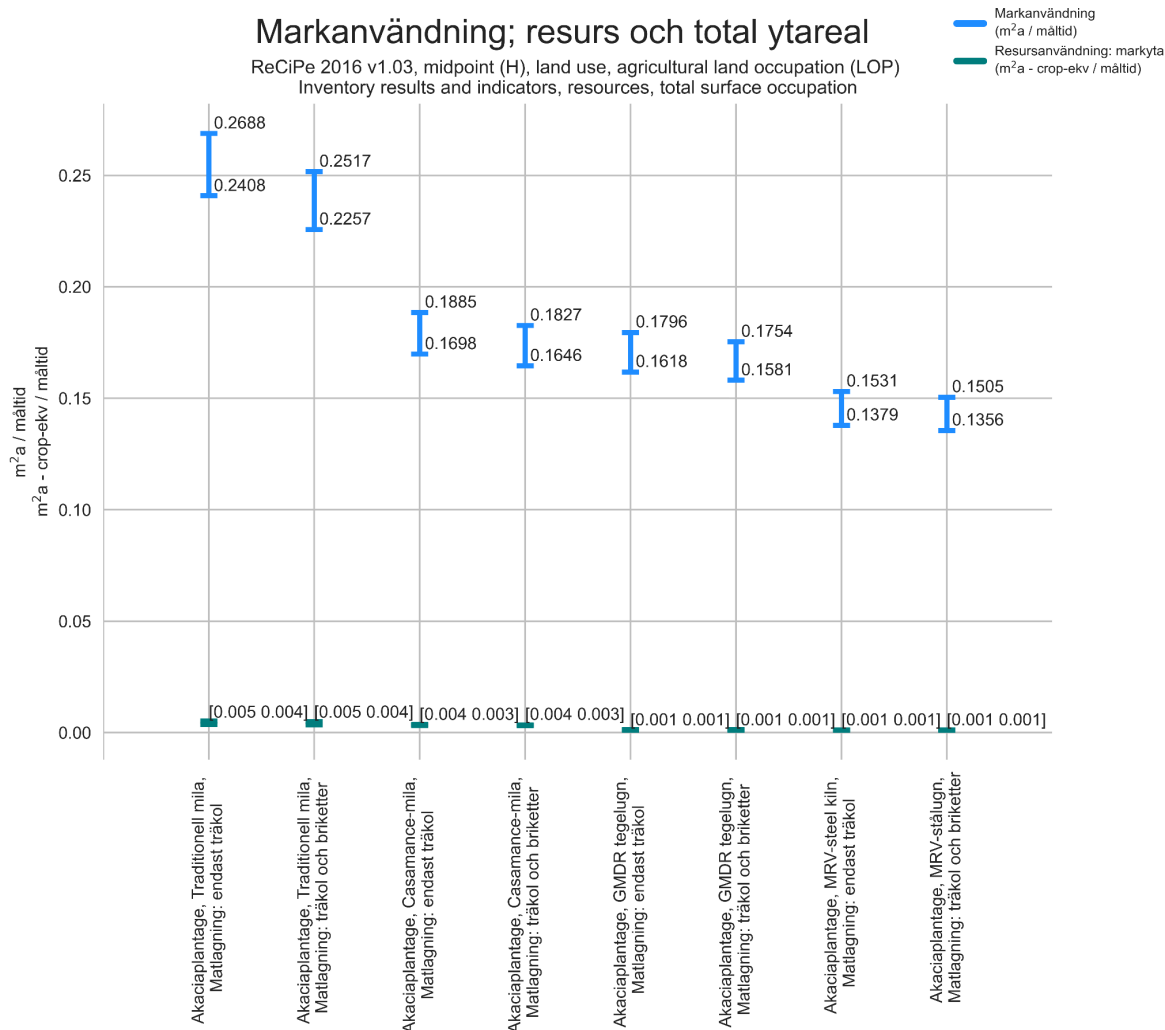
Figur 9: Klimatpåverkan per måltid för 5 personer för förbättrade system. Gröna staplar representerar Scenario A-D, som saknar brikettproduktion. Lila staplar representerar Scenario E-H, som inkluderar brikettproduktion.

3.3.2. Markanvändning

Resultaten för markanvändningen för de förbättrade systemen redovisas i *Figur 10*. Genom att byta från naturskog till plantage ger en större skörd av biomassa och således minskar markytan som krävs för att framställa träkol. Biomassa från plantage reducerar markanvändningen för träkolet som behövs för en måltid som framställts med kolmila med cirka 82,6 % och om briketter tillverkas med cirka 83,8 % enligt *TSO*.

Förhållandet mellan teknikerna som ses i *Figur 9* kan även ses i *Figur 10*. Genom att byta biomassa från plantage och använda en Casamancemila, GMDR-tegelugn eller MRV-stålugn istället för en traditionell kolmila reduceras markanvändningen med cirka 87,8 %, 88,3 % respektive 90% enligt *TSO*.

Det sker ingen större ändring i användandet av mark i form av resurser enligt *ALO* när biomassa från plantage används istället för biomassa från naturskog i en kolmila. Det sker inte heller en större ändring när en Casamancemila används jämfört med när en GMDR-tegelugn eller MRV-stålugn. Detta kan bero på att kolmilor och Casamancemilor använder teff/halm vid varje pyrolys som likt biomassan kräver jordbruksmark att växa på.

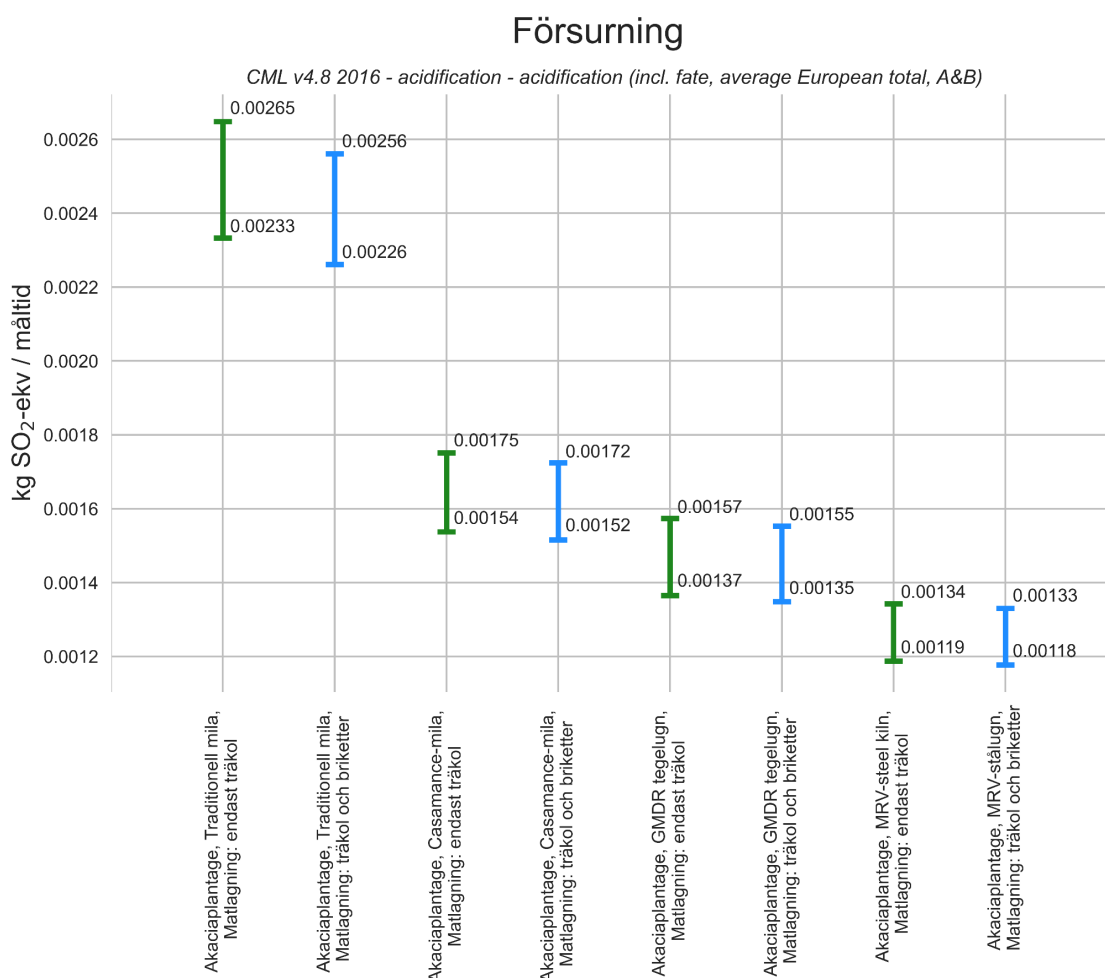


Figur 10: Markanvändning samt användning av markresurser per måltid för 5 personer för de förbättrade träkolsystemen, Scenario A-H. Värden har avrundats till 4 decimaler.

3.3.3. Försurning

Resultaten för utsläpp av försurande ämnen för de förbättrade systemen redovisas i *Figur 11*. När en kolmila använder biomassa från plantage minskar utsläppen med ca 25,8% och 34 % om briketter produceras enligt *ALO*. Genom att byta teknik till Casamancemila, GMDR-tegelugn eller MRV-stålugn istället för en traditionell kolmila reduceras utsläppen av försurande ämnen med cirka 51 %, 56,2 % respektive 62 % per måltid lagad med träkol. Även i *Figur 11* ses samma förhållande mellan teknikerna som i *Figur 9* och *10*.

Vid brikettproduktion reduceras mängden försurande ämnen per måltid hos kolmilor med ytterligare 3,2%, Casamancemilor med 1,5 %, GMDR-tegelugnar med 1,4 % och MRV-stålugnar med 0,8 % jämfört med enbart träkolsproduktion.

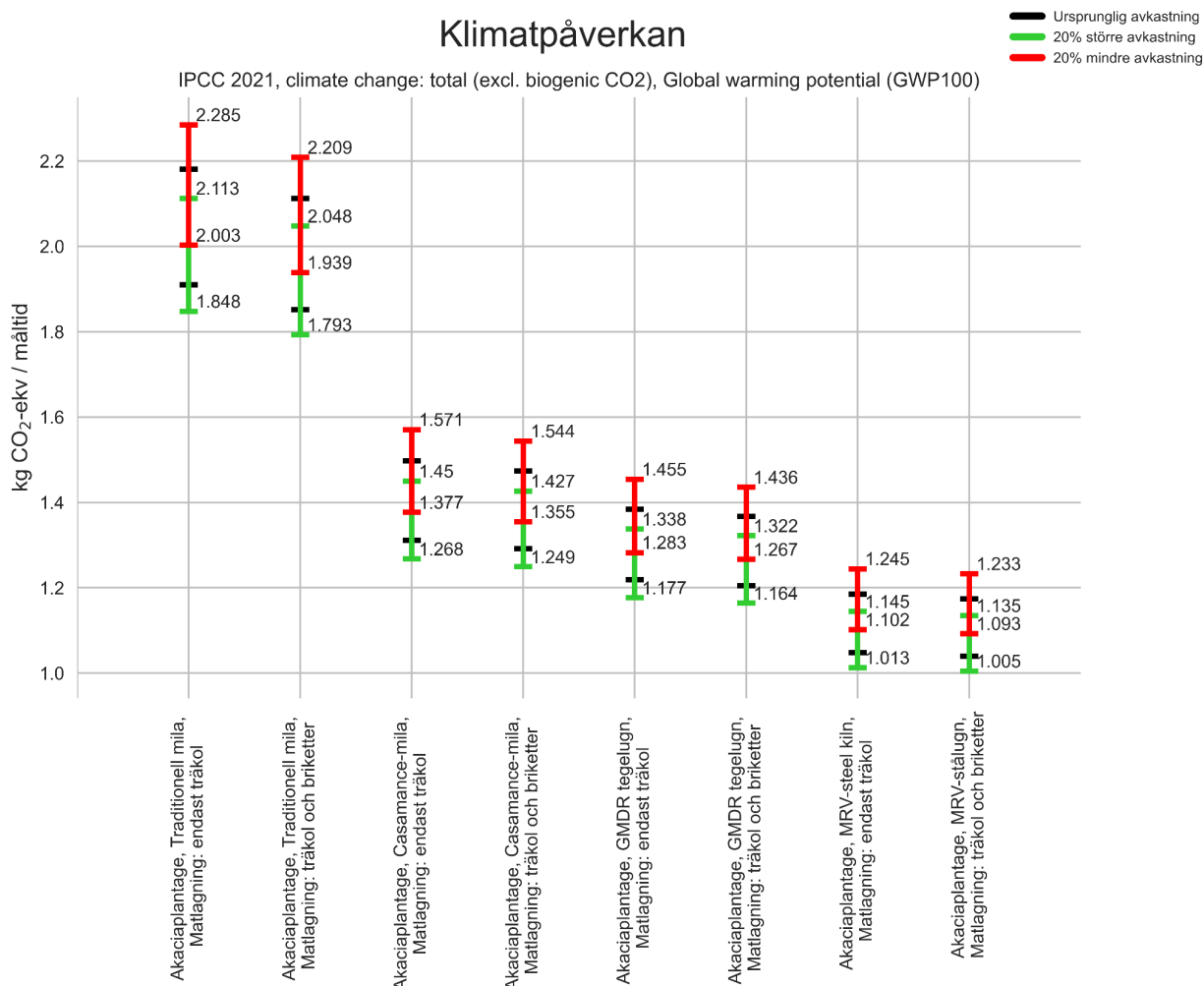


Figur 11: Försurning per måltid för 5 personer för de förbättrade träkolsystemen. Gröna staplar representerar Scenario A-D, som saknar brikettproduktion. Blåa staplar representerar Scenario E-H, som inkluderar brikettproduktion.

3.4. Känslighetsanalyser

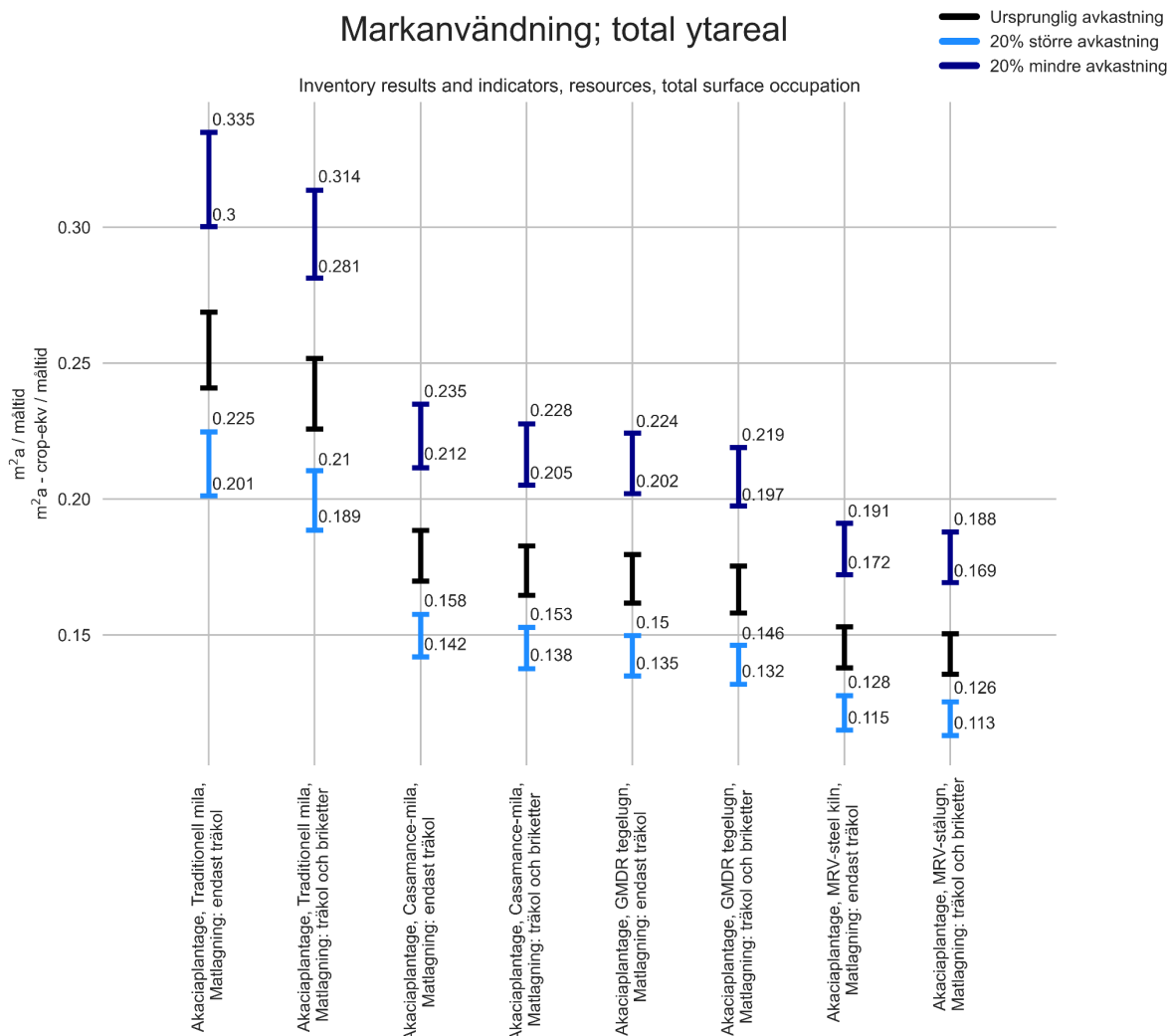
3.4.1. Skörd från plantage

Figur 12 visar klimatpåverkan per måltid lagad med träkol från de förbättrade systemen vid 20% större (grön) respektive 20% minskad (röd) skörd från plantage per hektar. För respektive teknik påverkas deras resultat med och utan brikettproduktion på ett liknande vis. Klimatpåverkan per måltid minskar för teknikerna med ca 3% vid 20% större skörd och ökade med 4,5% vid 20% mindre skörd. Liknande trend kan ses hos samtliga tekniker, vilket tyder på att skörden från plantagen har ett inflytande över träkolets klimatpåverkan.



Figur 12: Klimatpåverkan per måltid för 5 personer vid olika skörd från plantagen (Scenario A-H).

Markanvändningen för samtliga tekniker påverkas av plantagens skörd. Figur 13 visar hur markanvändningen enligt TSO ändras vid 20% mindre (mörkblå) respektive större (ljusblå) skörd från plantage. Figuren visar exempelvis att markanvändningen för en måltid med och utan briketter från samtliga tekniker ökar med cirka 25% vid 20 % minskad skörd och minskar med 17% vid 20% ökad skörd. Bilaga 5 och 6 visar hur användningen av mark som resurs enligt ALO respektive förurning enligt ALO ändras vid 20% mindre respektive högre skörd. Graferna visar en ökning och minskning av resultaten på en liten skala som i princip inte har någon påverkan på resultaten som ses i Figur 10 och 11.



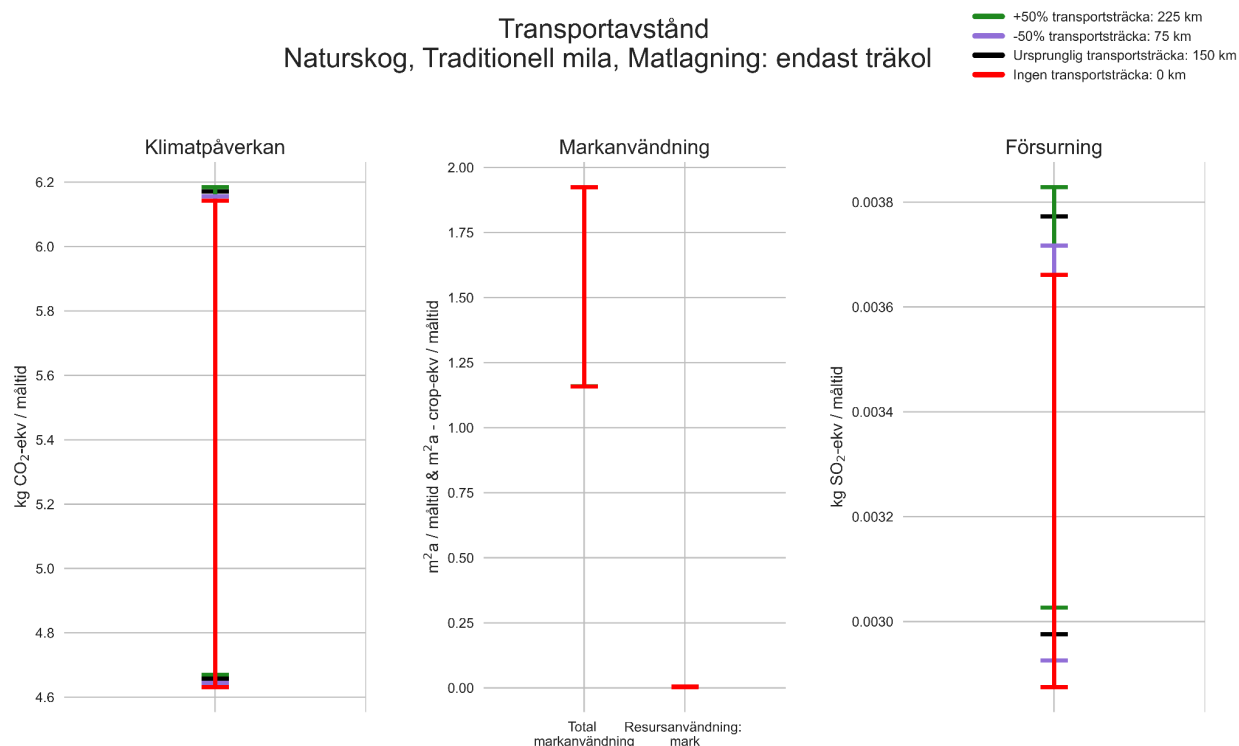
Figur 13: Markanvändning per måltid för 5 personer vid olika skörd från plantagen (Scenario A-H).

3.4.2. Materialanvändning

Ingen märkbar skillnad i resultaten för någon av miljöpåverkanskategorierna vid dubblering eller halvering av antalet gånger som matlagningsutrustningen och pyrolysugnarna används enligt *Bilaga 8*, *9* och *10*. Kolmilan är inte med i denna analys eftersom att det är en engångsstruktur.

3.4.3. Transportsträcka

Figur 14 visar hur resultaten som presenteras i Figur 8 påverkas av att ändra transportsträckan från 150 km till 0 km, 75 km (-50%) och 225 km (+50%). Ingen ändring i markanvändning sker enligt *ALO* och *TSO*. Klimatpåverkan och förorening minskar för kortare distanser men även utan transport (röd) syns att ingen stor ändring i miljöpåverkan sker på grund av transporternas minimala bidrag till mängden träkol som krävs per måltid.

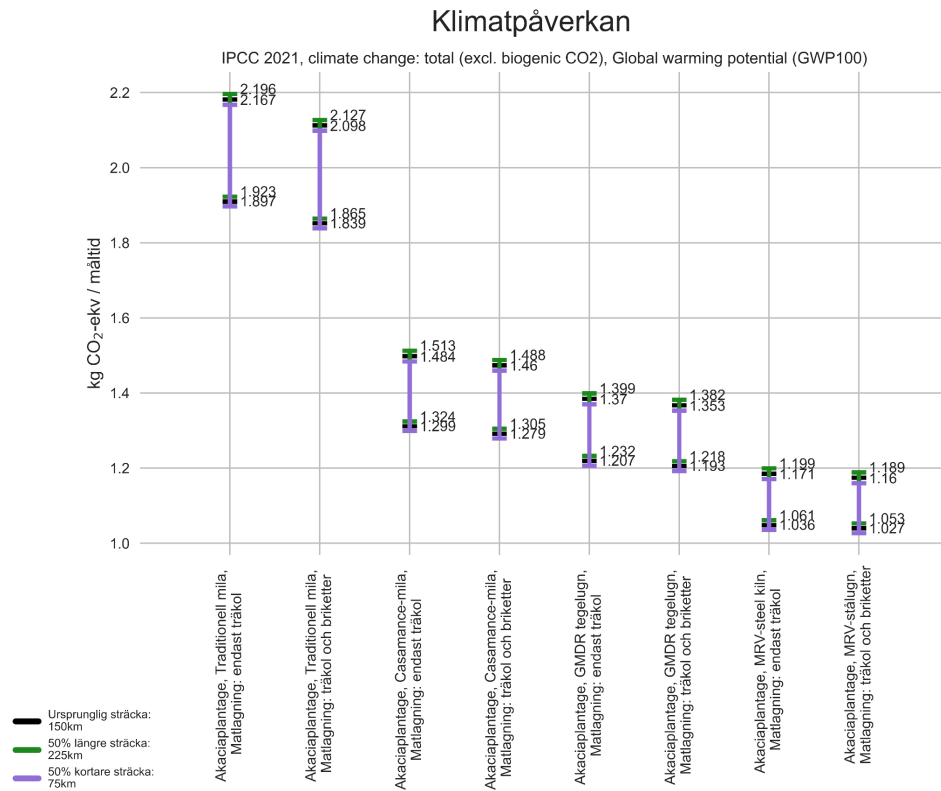


Figur 14: Klimatpåverkan, markanvändning, användning av markresurser och försurning per måltid för 5 personer för traditionella träkolsystemet, Scenario X, vid varierande transportsträckor.

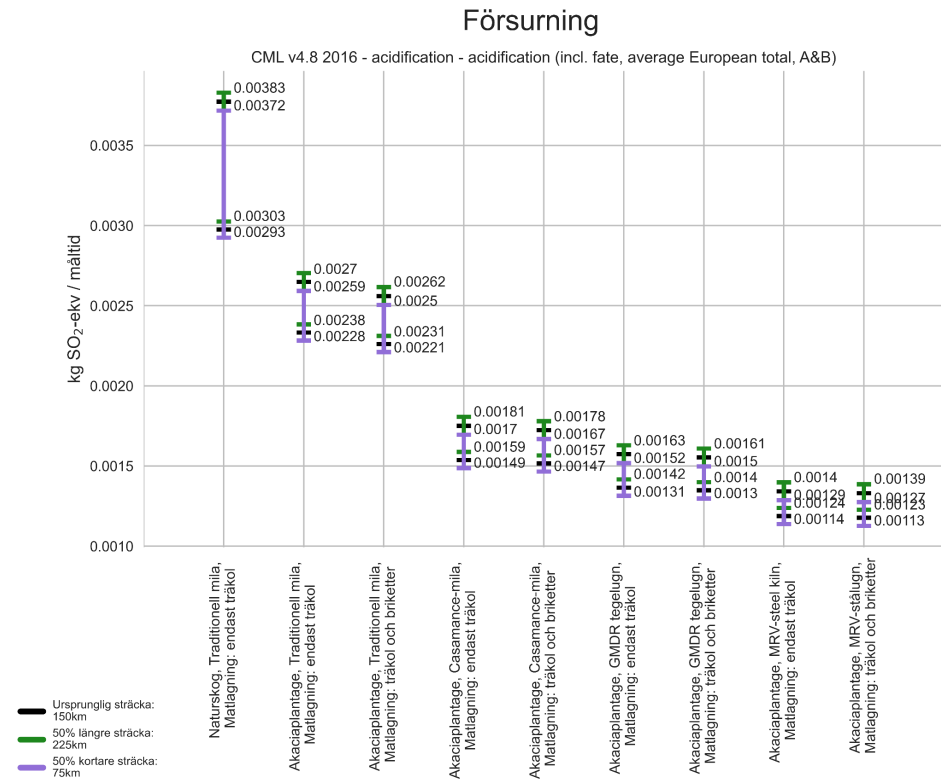
Inom de förbättrade systemen syns ett liknande resultat. Figur 15 visar ändringen i resultaten för klimatpåverkan vid 50% längre respektive kortare transportsträckor. Likt Figur 14 sker en liten och proportionerlig förändring när transportsträckan ändras. Figur 15 visar att för samtliga system så ökar respektive minskar resultaten med cirka 0,145 kgCO₂ekv/måltid när sträckan ökar eller minskar med 75 km. Detta beror på att samma lastbil används i systemen och liknande mängd träkol fraktas.

Figur 16 visar ändringen i resultaten för försurning vid 50% längre respektive kortare transportsträckor. Här syns att försurningen ökar respektive minskar med ca 0,06 gSO₂ekv/måltid när sträckan ökar eller minskar med 75 km.

Inom de förbättrade systemen sker inte någon förändring i markanvändning när transportsträckan varierar, vilket kan ses i Bilaga 7.



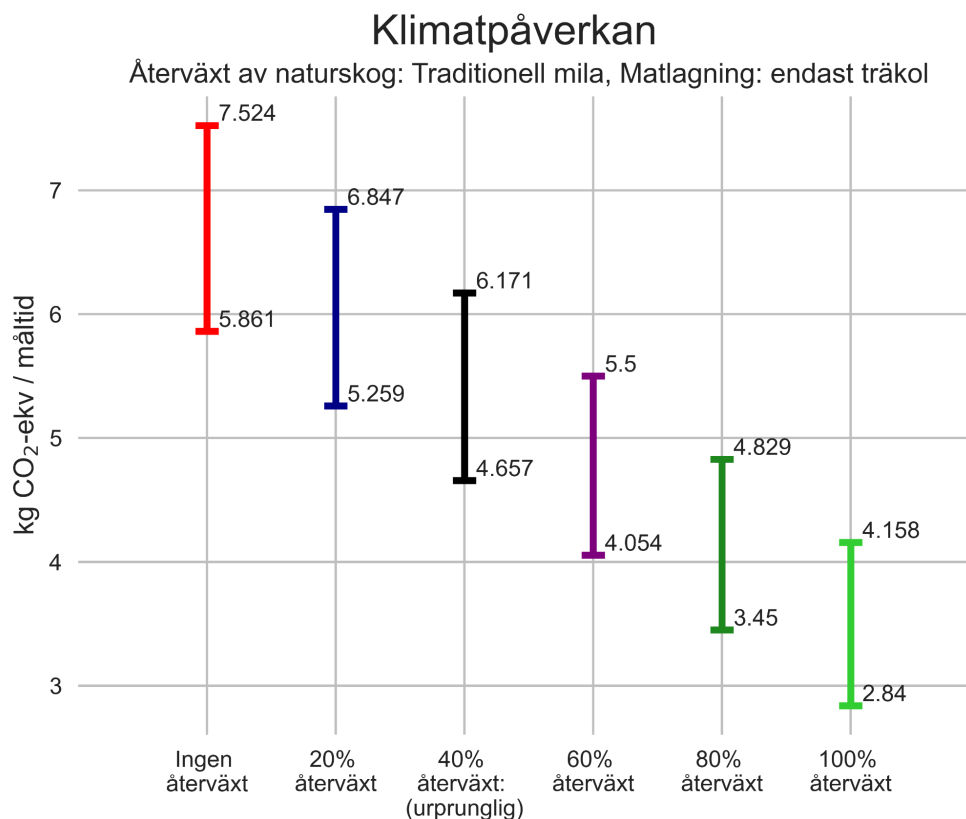
Figur 15: Klimatpåverkan per måltid för 5 personer vid varierande transportsträckor (Scenario A-H).



Figur 16: Försurning per måltid för 5 personer vid varierande transportsträckor (Scenario A-H).

3.4.4. Återväxt av naturskog

Figur 17 visar resultat då andelen återväxt av naturskog varierar mellan total avskogning och total återställning för det traditionella referenssystemet. Återväxten avgör hur mycket koldioxid som kan återupptas i biomassa därför förväntas ingen ändring i försurning eller markanvändning. Detta bekräftas av resultaten som sammanställts i *Bilaga II*. Resultaten visar att utsläppen av koldioxidekvivalenter per måltid minskar linjärt med andelen naturskog som växer tillbaka. För varje 1% som naturskogen återställs minskas klimatpåverkan per måltid med mellan 30-33,7 gCO₂ekv/måltid.



Figur 17: Klimatpåverkan per måltid för 5 personer för traditionella träkolsystemet, Scenario X, vid varierande återväxt av naturskog.

3.5. Sammanfattning resultat

Traditionella system som använder kolmilor och biomassa från naturskog resulterar i genomsnitt i ca 4,66-6,17 kgCO₂ekv/måltid medan samtliga system som använder biomassa från plantage resulterar i utsläpp mellan 1,04-2,18 kgCO₂ekv/måltid, vilket innebär att utsläppen kan reduceras upp till 80% ifall hållbart skogsbruk appliceras. Att välja biomassa från plantage reducerar även användningen av markyta med över 80%, från ca 1,16-1,92 m²/måltid till mellan 0,14-0,27 m²/måltid. Även utsläppen av försurande ämnen kan nästan halveras från 3-3,8 gSO₂ekv/måltid till ca 1,2-2,7 gSO₂ekv/måltid.

Systemen som använder en MRV-stålugn resulterade i lägst miljöpåverkan inom alla kategorier och kan därför anses vara det bästa alternativet för träkolsproduktion ur ett klimatperspektiv. Casamancemilor och GMDR-tegelugnar är bättre alternativ för träkolsproduktion än kolmilor ur ett klimatperspektiv.

Osäkerheten hos resultaten utmanas av känslighetsanalyserna. Skörden på plantage har ett relativt stort inflytande över resultatet. Klimatpåverkan och markanvändningen minskar med 3% respektive 17% vid 20% större skörd och ökar med 4,5% respektive 25% vid 20% mindre skörd. Resultaten som presenterats i *Figur 12* och *13* visar att klimatpåverkan, markanvändning och försurningen är nästan omvänt proportionerliga med skörden från plantagen.

Andelen av naturskogen som växer tillbaka har en direkt effekt på klimatpåverkan per måltid, men ingen större påverkan på försurningen eller markanvändningen. Om naturskogen avskogas helt blir klimatpåverkan mellan 5,58-7,52 kgCO₂ekv/måltid. Växer hela naturskogen tillbaka blir istället påverkan 2,84-4,16 kgCO₂ekv/måltid.

När transportsträckan varierar sker en proportionell förändring i både utsläppen av försurande ämnen och växthusgaser. Resultatet för en måltid ändras med ca 0,02 kgCO₂ekv och 0,008 gSO₂ekv för varje mil (10 km) som adderas eller subtraheras till resultaten. Däremot sker ingen tydlig förändring i markanvändningen vilket beror på att det inte krävs märkbart mer eller mindre mark för att producera dieseln som krävs för att korta ner eller förlänga körsträckan.

4. Diskussion

4.1. Felkällor

Projektet är baserat på biomassa från akacia vilket är ett specifikt träslag och därför kan det uppstå fel ifall slutsatserna skulle användas för annat träslag. Trots det bör systemet och slutsatserna vara tillämpbara på många pyrolyssystem.

4.1.1. Subjektiva bedömningar

Resultaten för LCA studier är beroende av de antaganden och val som gjorts. Dessa antaganden kan anses vara antingen rätt eller fel beroende på exempelvis hur man ser på helheten av systemet och tycker är lämpligt sätt att avgränsa den.

4.1.2. Råvaruutvinning

Akacia är en av många träarter som används för att producera träkol (Kuria et al., 2017; Muthuri et al., 2023). För att inkludera hela träkolsproduktionen i Kenya och Etiopien bör fler arter inkluderas i en vidare rapport. Både ämnessammansättningen och massfördelningen av träden varierar mellan träslag, vilket kan påverka skörden av användbar biomassa samt utsläppen. Enligt Tiruneh et al. (2025a) resulterar plantering av *Acacia mearnsii* inte i märkbara förändringar i markkolsnivåer. Denna slutsats kan inte antas vara sann för samtliga träarter som kan tänkas odlas för träkolsproduktion och skulle därför behöva tas med i en analys som utvärderar miljöpåverkan av all träkolsproduktion i regionen.

Trädplantage kan nyttja gödsel för att skynda på tillväxten, dock har det antagits att gödsling inte sker i vårt projekt eftersom flera källor uppger detta. Gödsling ger upphov till starka växthusgaser som lustgas och kan leda till övergödning. Fortsatta studier skulle därför kunna belysa hur klimatpåverkan ändras till följd av de potentiellt större utsläppen och de kortare tillväxtperioderna som gödsling innebär.

Odlingar i varmare länder som Kenya kräver mycket vatten. Enligt FNs Environmental Program försörjer regn mer än 95% av det kenyanska lantbruket, vi antar därför att konstgjord bevattning inte sker (Hornum & Bolwig, 2020). Dock kan denna siffra avta med global uppvärmning och det innebär att det i framtiden skulle vara relevant att undersöka miljöpåverkan från vattenanvändningen som behövs för att producera träkol.

4.1.3. Träkolsproduktion

I denna rapport har det antagits att traditionella system där naturskog skördas olagligt endast använder sig av traditionella kolmilor, samt att systemen med förbättrade tekniker inte förlitar sig på olagligt avverkad biomassa från naturskog. Denna slutsats kan vara problematisk då olagliga verksamheter sällan rapporterar varken materialanvändning eller framställningsprocesser. För att få en tydligare bild över hur miljöpåverkan ändras under olika förutsättningar bör träkol från samtliga pyrolysmetoder undersökas med biomassa från naturskog.

I samtliga system har det antagits att briketter produceras i samband med träkolsproduktionen och därför binds mellan ca 1,5-5 % av det producerade träkolet i briketter. I studier som Njenga et al. (2014), där det antas att brikettproduktion sker efter att träkolet har transporterats till marknaden, står träkolsdamm för mellan 10-15 % av träkolet. Anledningen till ökningen är att träkol lätt pulveriseras

av vibrationer under transporten. Produktionen av briketter kan alltså variera mer i verkligheten än vad som redovisas i rapporten.

4.1.4. Transporter och bränsleanvändning

Känslighetsanalysen av transportsträckan har proportionell effekt på både förurning och utsläpp av växthusgaser. Transportsträckan antas vara 150 km vilket kan ifrågasättas då både Etiopien och Kenya är stora länder med långa avstånd. Antagandet är grundat i att produktionen är småskalig och därför kan spridas ut i landet vilket minskar det genomsnittliga transportavståndet. Ifall storskalig produktion antas kan transportsträckorna bli längre vilket skulle öka miljöpåverkan dock kan transporterna bli mer effektiva ifall mängden träkol per transport ökas (ett större system, dvs större lastbil är ofta mer effektivt) vilket leder till en potentiell minskning i klimatpåverkan. En mer ingående analys av varierande transportavstånd och transportstorlek skulle öka relevansen för livscykelanalysen.

Projektet har fokuserat på småskaliga plantage där det antas att inga drivmedelsbehövande verktyg eller maskiner används. Skulle biomassa från storskaliga plantage med skogsmaskiner betraktas skulle fler fossila utsläpp allokeras per måltid.

4.1.5. Användning

I rapporten har ingen specifik matlagningsutrustning analyserats, istället har effektiviteten för utrustningen varierat enligt resultat från Kirimi et al. (2023). Om värdena istället hade använts för att dela in systemen ytterligare efter specifik utrustning, skulle även utrustningens påverkan kunnat analyseras. Dock hade detta troligtvis inte påverkat resultaten nämnvärt.

4.2. Energi- och massflödesanalys

Energi- och massflödesanalysen syfte är att bidra till en överblick på pyrolyssystemen och dess effektivitet samt för att bredda förståelsen kring hur systemen fungerar och att det har olika effekt inte bara utsläppsmässigt utan även resursmässigt. Dock är analysen inte lika ingående som huvuduppgiften i rapporten, LCA:n vilket gör att fler antaganden och förenklingar har gjorts så som att jorden i briketterna försummas i transportsteget eller att materialet för de olika ugnarna inte är inkluderat. Det gör resultatet mindre tillförlitligt men det hindrar inte syftet att redovisa hur energin och massan flödar och fördelas genom de olika systemen. Jämförs energiverkningsgraden mellan en traditionell kolmila (32%) och en MRV-stålugn (53%) blir skillnaden mellan mer effektiva pyrolysmetoder tydlig. Analysen tyder även på potentialen i användningen av biprodukterna vilket leder till ytterligare frågor kring vad de faktiskt har för mervärde.

4.3. Biprodukter

4.3.1. Tjära

Tjären som bildas av pyrolysen är som en slags bioråolja med mycket komplex kemisk struktur och innehåller en rad fenoliska ämnen såsom fenol, guaiacol, katekol och kresoler (Vilas-Boas et al., 2025). Dessa föreningar är industriellt värdefulla och kan, efter raffinering, användas inom produktion av plast, läkemedel, färgämnen, desinfektionsmedel och konserveringsmedel. Tjären kan användas som impregnering av trä och rep. Till exempel för att impregnera båtar, broar och hustak tack vare sina vattenavvisande och antiseptiska egenskaper. Tjärans höga energiinnehåll, ofta i intervallet 20–30 MJ/kg gör den attraktiv som flytande biobränsle i värme pannor eller industriella processer (Adhikari et al 2018).

Tjäran har en hög potential för vidareanvändning vilket gör det till en produkt med ett mervärde som bör ses över. Tjäran kan inte tas tillvara på i en vanlig kolmila, därför är incitamentet för att använda mer effektiva tegel eller stål-pyrolisugnar högre ifall man inkluderar mervärdet från tjäran.

4.3.2. Rökgas

Rökgas från pyrolys innehåller en mängd olika gaser som koldioxid (CO_2), kolmonoxid (CO), vattenånga (H_2O), metan (CH_4), vätgas (H_2) och flera olika komplexa kolväten. Metan, vätgas och många av de komplexa kolvätena är brännbara och därför är rökgasen som helhet brännbar och kan generera både värme och el. Värdet i att rökgaserna förbränns ur ett livscykelperspektiv är dubbelt. Både att värmen från förbränningen kan användas för att till exempel förtorka biomassa för att öka effektiviteten i pyrolysen samt att istället för att metan och kolmonoxid släpps ut direkt i atmosfären förbränns de och bildar koldioxid som har en mildare klimatpåverkan. Elen som potentiellt kan skapas är inte av större vikt men kan användas lokalt för t.ex belysning. (Bailis et al., 2013)

4.4. Övriga aspekter

Projektet utgår från ett livscykelperspektiv vilket innefattar ett miljöperspektiv. Men det finns fler perspektiv och konsekvenser av träkolsproduktion som inte tas upp i projektet som bör utvecklas ifall teori ska bli verklighet. Aspekter som ekonomi, sociala faktorer och biologisk mångfald är intressanta för vidareutveckling av denna uppsats.

4.4.1. Ekonomi

Träkolsproduktion är en viktig del i den kenyanska ekonomin, inte minst för de individer som arbetar i sektorn men även för landet som helhet på grund av de skattepengar som skapas av jobb och mervärdesskatt av människor som konsumerar träkol. Faktorer som jämnt fördelad skörd, produktionskedja och låga investeringskostnader gör det till en bra grundpelare i en växande ekonomi. Låga fasta investeringskostnader samt att de rörliga kostnaderna endast är lön och bränsle gör att pengarna hålls rörliga inom landet. Arbetet med träkol är intensivt och kräver mycket manuellt arbete vilket skapar mycket jobb (Luoga et al., 2000). Arbetet kan även utvecklas med mer innovativa metoder som bättre ugnar som MRV-stålugnen vilket har en potential att producera ~66% (ekvation (6)) mer träkol från biomassan jämfört med en kolmila. Dessutom har stålugnen potential för produktion av tjära, rökgas och småskalig elproduktion vilket kan generera ytterligare vinst. Mer sofistikerad träkolsproduktion har dock en större investeringskostnad.

4.4.2. Social hållbarhet

Ett hållbart skogsbruk och produktion kan leda till ekonomiskt och socialt välbefinnande. Men ifall produktionen hamnar i fel händer kan det leda till korruption och monopol av energi. Produktionen och uppbyggnaden av systemet bör ske demokratiskt och under uppsikt av pålitliga och transparenta organisationer i landet för att undvika korruption. Produktionen av träkol leder till större sysselsättningsgrad vilket är en av många faktorer som kan vara med att lyfta ett lands förhållanden. Enligt Kiruki et al. (2019) bidrar träkolsproduktion till inkomst men ofta inte tillräckligt för att komma över gränsen för fattigdom utan en bredare lösning på ett lands fattigdomsproblem krävs.

4.4.3. Biologisk mångfald

Ifall produktionen av biomassa kommer från odlingar bildas inte bara en mer effektiv produktion och lägre utsläpp utan även en produktion mer hållbar för den biologiska mångfalden. Skogsbruk i detta fall leder optimalt till att fler naturskogar lämnas i fred. Det gör att den biologiska mångfalden behålls i naturskogarna. Däremot frodas inte den biologiska mångfalden i homogena odlade skogar men vinsten att ha odlad skog jämfört med att avverka naturskog blir större för den biologiska mångfalden i sin helhet. Val av rätt plats för skogsbruket blir en viktig del för att genomföra detta projekt på rätt sätt samt en så effektiv produktion som möjligt för att minimera ytan för skogsbruket (Fontodji et al., 2011).

Slutsatser

Att använda skogsbruk för produktion av träkol istället för att avverka naturskog har störst miljövinst eftersom att naturskog inte växer tillbaka i samma grad som en planterad skog med hållbart skogsbruk, samt att mer biomassa kan produceras på samma yta. MRV-stålugnar resulterade i lägst miljöpåverkan inom alla kategorier och kan därför anses vara det bästa alternativet för träkolsproduktion ur ett miljöperspektiv. Vidare leder användningen av briketter från träkolsdamm till en sänkning inom alla miljöpåverkanskategorier. Transportsträckan påverkar både utsläppen av försurande ämnen och växthusgaser proportionellt med hur mycket sträckan ändras.

Energi- och massflödesanalysen visar att verkningsgraden för överföringen av energi i biomassa till energin som används för matlagning för en kolmila, Casamancemila, GMDR-tegelugn respektive MRV-stålugn med brikettproduktion är 32%, 44%, 46% respektive 53%. Vid dessa verkningsgrader producerar respektive ugn tillräckligt mycket träkol för 71, 98, 101 respektive 118 måltider per 100 kg biomassa. MRV-stålugnar anses därför vara det bästa alternativet för träkolsproduktion ur ett energiperspektiv. MRV-stålugnen visar även störst potential av produktion och vidare användning av tjära och rökgaser.

Referenser

- Adhikari S., H. Nam, J.P. Chakraborty (2018). *Conversion of Solid Wastes to Fuels and Chemicals Through Pyrolysis*, Waste Biorefinery, Elsevier, 239-263.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63992-9.00008-2>
- Asmare B.M., M.N. Tesemma, S.N. Gebremariam, T.B. Endalamaw (2022). *Comparison of calorific values and physico-chemical properties among three age groups and height positions of Acacia decurrens (Willd)*. Biomass Conversion and Biorefinery, 15: 21633–21642.
<https://doi.org/10.1007/s13399-021-02242-x>
- Bailis R., C. Rujanavech, P. Dwivedi, A. de Oliveira Vilela, H. Chang, R. Carneiro de Miranda. (2013). *Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil*. Energy for Sustainable Development, 17(2): 189-200.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.10.008>
- Danso-Boateng E., O-W. Achaw (2022). *Bioenergy and biofuel production from biomass using thermochemical conversions technologies—a review*. AIMS Energy, 10(4): 585-647.
<https://doi.org/10.3934/energy.2022030>
- Fontodji J.K., H. Atsri, K. Adjonou, A.R. Radji (2011). *Impact of charcoal production on biodiversity in Togo (West Africa)*. The Importance of Biological Interaction in the Study of Biodiversity, InTech.
<https://doi.org/10.5772/22969>
- Google maps (2025). *Addis Abeba to Addis Kidam Town*. <https://www.google.com/maps> [2025-06-30]
- Hornum S.T. och S. Bolwig (2020). *Executive Summary. The Growth of Small-Scale Irrigation in Kenya. The Role of Private Firms in Technology Diffusion*. Report prepared for the TEMARIN project. The UNEP DTU Partnership, Copenhagen.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006a). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Källa angiven via Emission Factor Database [Database]:
https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find_ef.php
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006b). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Energy, 2. Källa angiven via Emission Factor Database [Database]:
https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find_ef.php
- Kirimi H.M., J.K. Gitau, R. Mendum, C. Muthuri, M. Njenga (2013). *Cleaner Cooking with Charcoal in Kibera Informal Settlement in Nairobi, Kenya, and Its Implications for Livelihoods and the Environment*. Energies 2023, 16(19). <https://doi.org/10.3390/en16196808>
- Kiruki H.M., E.H. van der Zanden, P. Kariuki, P.H. Verburg (2019). *The contribution of charcoal production to rural livelihoods in a semi-arid area in Kenya*. Environment, Development and Sustainability, 22: 6931–6960 <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00521-2>
- Kumar R., K.K. Pandey, N. Chandrashekar, S. Mohan, (2011). *Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid, Acacia auriculaeformis*

and *Casuarina equisetifolia*. *Biomass and Bioenergy*, 35(3): 1339-1344.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.031>

Kuria A., S. Dawit, Y. Endale, A. Derero, M. Iiyama, C. Muthuri, K. Hadgu, R., Kinuthia, E. Betemariam, M. Asantewaa, J. Muriuki, R. Kindt, K. Dedefo, M. Senbeto, M. Njenga, G. Lamond, T. Pagella & F. Sinclair (2017). *Suitable tree species selection and management tool for Ethiopia*. [Database], World Agroforestry Centre (ICRAF).

Luoga E.J., E.T.F. Witkowski, K. Balkwill, (2000). *Economics of charcoal production in miombo woodlands of eastern Tanzania: some hidden costs associated with commercialization of the resources*. *Ecological Economics*, 35(2): 243-257. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00196-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00196-8)

Mutel C. (2017). *Brightway: An open source framework for Life Cycle Assessment*. *Journal of Open Source Software*, 2(12). <https://doi.org/10.21105%2Fjoss.00236>.

Muthuri C., D. Wakaba, S. Kuyah, C. Njoki, K. Muchoki, M. Njoki & A. Kuria (2023). *Suitable tree species selection and management tool for Kenya*. [Database], World Agroforestry Centre (ICRAF). https://apps.worldagroforestry.org/suitable-tree/kenya?title=&field_ecological_services_k_value=All&field_niche_k_value=All&field_origin_k_value=Native&term_node_tid_depth=All&term_node_tid_depth_1=All&term_node_tid_depth_3=All&term_node_tid_depth_4=All&field_products_k_value=Charcoal&term_node_tid_depth_2=All [2025-06-25].

Nektalova T. (2008). *Energy Density of Diesel Fuel*, The Physics Factbook.
<https://hypertextbook.com/facts/2006/TatyanaNektalova.shtml> [2025-08-10].

Njenga M., N. Karanja, H. Karlsson, R. Jamnadass, M. Iiyama, J. Kithinji, C. Sundberg (2014). *Additional cooking fuel supply and reduced global warming potential from recycling charcoal dust into charcoal briquette in Kenya*. *Journal of Cleaner Production*, 81: 81-88.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.002>.

Nturanabo F., G.R. Byamugisha, G.C. Preti (2011). *Performance Appraisal of the Casamance Kiln as a Replacement to the Traditional Charcoal Kilns in Uganda*. Second International Conference on Advances in Engineering and Technology. 530-536.
<https://news.mak.ac.ug/wp-content/uploads/2011/06/Nturanabo.pdf>

Sonderegger T. (2024). *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods in the ecoinvent Database v3.11*. Ecoinvent Association, Zürich, Switzerland.

Steubing B., D. de Koning, A. Haas, C. Mutel (2019). *The Activity Browser — An open source LCA software building on top of the brightway framework*. *Software Impacts*, 3.
<https://doi.org/10.1016/j.simpa.2019.100012>

Swedish Standards Institute (SIS, 2006). *Svensk Standard SS-EN ISO 14040:2006*. 2. SIS Forlag AB, Stockholm.

Tazebew E., S. Satob, S. Addisuc, E. Bekeled, A. Alemua, B. Belaye (2023). *Improving traditional charcoal production system for sustainable charcoal income and environmental benefits in highlands of Ethiopia*. *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19787>

The Ceramic Jiko Stove (u.å.) <https://wgbis.ces.iisc.ac.in/energy/paper/tech101/jikostove.html> [2025-07-25].

The True Size (2025). *The True Size of ...* <https://thetruesize.com> [2025-06-15].

Tiruneh G.G., A. Alemu, J. Barron, F. Yimer, E. Karlun. (2025a). *Short rotation forestry expansion drives carbon sequestration in biomass but not in soil*. Global Change Biology Bioenergy, 17(7). <https://doi.org/10.1111/gcbb.70054>

Tiruneh G.G., A. Alemu, J. Barron, F. Yimer, E. Karlun (2025b). *Nutrient budgets in short rotation black wattle (*Acacia mearnsii*) stands for charcoal production as compared with teff (*Eragrostis tef*) cultivation*. Forest Ecology and Management, 588. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122762>

Vilas-Boas A.C.M., L.A.C. Tarelho, J.M.O. Moura, H.G.M.F. Gomes, C.C. Marques, D.T. Pio, M.I.S. Nunes, A.J.D. Silvestre (2025). *Methodologies for bio-oil characterization from biomass pyrolysis: A review focused on GC-MS*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 185. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106850>

Zakrisson L., C. Sundberg, G. Larsson, E.S. Azzi, S.S. Dalahmeh (2024). *Life cycle assessment of biochar filters for on-site wastewater treatment*, Journal of Environmental Management, 371. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123265>

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU kan publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver i sådana fall godkänna publiceringen. I samband med att du godkänner publicering kommer SLU även att behandla dina personuppgifter (namn) för att göra arbetet sökbart på internet. Du kan närsomhelst återkalla ditt godkännande genom att kontakta biblioteket.

Även om du väljer att inte publicera arbetet eller återkallar ditt godkännande så kommer det arkiveras digitalt enligt arkivlagstiftningen.

Du hittar länkar till SLU:s publiceringsavtal och SLU:s behandling av personuppgifter och dina rättigheter på den här sidan:

<https://libanswers.slu.se/sv/faq/228316>

☒ JA, jag, Andrea Brodd Sund har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta

☒ JA, jag, Sebastian Granath Wendt har läst och godkänner avtalet för publicering samt den personuppgiftsbehandling som sker i samband med detta

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

Bilagor

Bilaga 1: Parametervärden som använts i Activity Browser. Fortsättning på nästa sida.

Parameter	Parameternamn	Process	Uncertainty	Avg value	Min värde	Max värde	Källa
Transportsträckan från tillverkningsplats till marknad	dist2market	Transport till marknad	Uniform	150	100	200	(anlägen)
Mängd träkol i en säck (kg)	sack_kg	Transport till marknad	Uniform	7,25	7	7,5	Tazebeu et al., 2023
Mängd träkol i en säck briquetter (80% av totalvikt är träkol) (kg)	sack_kg_briq	Transport till marknad	Uniform	5,8	5,6	6	Tazebeu et al., 2023
Användbar biomassa som laddas per pyrolys (kg)	BMdepyrolysis	Framställning av träkol	No uncertainty	2750	-	-	Tazebeu et al., 2023
Användbar träkol framställt per pyrolys i Jordmila (kg)	earth_yield	Framställning av träkol	Uniform	552,38	551,37	553,39	Tazebeu et al., 2023
Användbar träkol framställt per pyrolys i GMDR (kg)	GMDR_yield	Framställning av träkol	Uniform	815,8	815,63	815,97	Tazebeu et al., 2023
Användbar träkol framställt per pyrolys i Casamance (kg)	casa_yield	Framställning av träkol	Uniform	786,5	786,25	786,75	Tazebeu et al., 2023
Användbar träkol framställt per pyrolys i MRV-steel (kg)	MRV_yield	Framställning av träkol	Uniform	957,7	957,41	957,99	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av CO2 per framställt ton träkol i Jordmila (kg/ton)	co2_earth	Framställning av träkol	Uniform	2439,43	2413,08	2465,78	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av CO2 per framställt ton träkol i Casamance (kg/ton)	co2_casa	Framställning av träkol	Uniform	1300,47	1284,93	1316,01	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av CO2 per framställt ton träkol i GMDR (kg/ton)	co2_GMDR	Framställning av träkol	Uniform	1252,47	1244,25	1260,69	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av CO2 per framställt ton träkol i MRV-steel (kg/ton)	co2_MRV	Framställning av träkol	Uniform	1027,13	1024,11	1030,15	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av CO per framställt ton träkol i Jordmila (kg/ton)	co_earth	Framställning av träkol	Uniform	474,57	455,17	493,97	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av CO per framställt ton träkol i Casamance (kg/ton)	co_casa	Framställning av träkol	Uniform	262,93	253,89	271,97	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av CO per framställt ton träkol i GMDR (kg/ton)	co_GMDR	Framställning av träkol	Uniform	220,17	215,2	225,14	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av CO per framställt ton träkol i MRV-steel (kg/ton)	co_MRV	Framställning av träkol	Uniform	180,43	178,14	182,72	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av NO per framställt ton träkol i Jordmila (kg/ton)	no_earth	Framställning av träkol	Uniform	2,38	2,34	2,42	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av NO per framställt ton träkol i Casamance (kg/ton)	no_casa	Framställning av träkol	Uniform	0,91	0,86	0,96	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av NO per framställt ton träkol i GMDR (kg/ton)	no_GMDR	Framställning av träkol	Uniform	0,36	0,32	0,4	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av NO per framställt ton träkol i MRV-steel (kg/ton)	no_MRV	Framställning av träkol	Uniform	0,33	0,31	0,35	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av NOx per framställt ton träkol i Jordmila (kg/ton)	nox_earth	Framställning av träkol	Uniform	2,77	2,67	2,87	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av NOx per framställt ton träkol i Casamance (kg/ton)	nox_casa	Framställning av träkol	Uniform	1,2	1,14	1,26	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av NOx per framställt ton träkol i GMDR (kg/ton)	nox_GMDR	Framställning av träkol	Uniform	0,67	0,56	0,78	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av NOx per framställt ton träkol i MRV-steel (kg/ton)	nox_MRV	Framställning av träkol	Uniform	0,38	0,33	0,43	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av SO2 per framställt ton träkol i Jordmila (kg/ton)	so2_earth	Framställning av träkol	Uniform	0,7	0,67	0,73	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av SO2 per framställt ton träkol i Casamance (kg/ton)	so2_casa	Framställning av träkol	Uniform	0,41	0,38	0,44	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av SO2 per framställt ton träkol i GMDR (kg/ton)	so2_GMDR	Framställning av träkol	Uniform	0,37	0,34	0,4	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av SO2 per framställt ton träkol i MRV-steel (kg/ton)	so2_MRV	Framställning av träkol	Uniform	0,26	0,25	0,27	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av CH4 per framställt ton träkol i Jordmila (kg/ton)	ch4_earth	Framställning av träkol	Uniform	51	50,79	51,21	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av CH4 per framställt ton träkol i Casamance (kg/ton)	ch4_casa	Framställning av träkol	Uniform	32,77	32,1	33,44	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av CH4 per framställt ton träkol i GMDR (kg/ton)	ch4_GMDR	Framställning av träkol	Uniform	27,4	27,09	27,71	Tazebeu et al., 2023
Utsläpp av CH4 per framställt ton träkol i MRV-steel (kg/ton)	ch4_MRV	Framställning av träkol	Uniform	21,83	21,76	21,9	Tazebeu et al., 2023
Oomvandlad biomassa per pyrolys i Jordmila (kg)	unburn_earth	Framställning av träkol	Uniform	47,8	47,65	47,95	Tazebeu et al., 2023
Oomvandlad biomassa per pyrolys i GMDR (kg)	unburn_GMDR	Framställning av träkol	Uniform	74,2	74,03	74,37	Tazebeu et al., 2023
Oomvandlad biomassa per pyrolys i Casamance (kg)	unburn_casa	Framställning av träkol	Uniform	25,5	25,24	25,76	Tazebeu et al., 2023
Oomvandlad biomassa per pyrolys i MRV-steel (kg)	unburn_MRV	Framställning av träkol	Uniform	29,9	28,9	30,9	Tazebeu et al., 2023

Parameter	Parameternamn	Process	Uncertainty	Avg value	Min värde	Max värde	Källa
Ikke-användbar träkol framställd per pyrolys i Jordmilla (kg)	dust_eath	Framställning av träkol	Uniform	30,6	30,54	30,66	Tazebew et al., 2023
Ikke-användbar träkol framställd per pyrolys i GMDR (kg)	dust_GMDR	Framställning av träkol	Uniform	15,4	15,31	15,49	Tazebew et al., 2023
Ikke-användbar träkol framställd per pyrolys i Casamance (kg)	dust_casa	Framställning av träkol	Uniform	20,2	20,03	20,37	Tazebew et al., 2023
Ikke-användbar träkol framställd per pyrolys i MRV-steel (kg)	dust_MRV	Framställning av träkol	Uniform	13,2	13,03	13,37	Tazebew et al., 2023
Total biomassa (inkl. rötter, löv, osv) på 1 hektar plantage (A...) (kg)	plantation_yield	Skörd av biomassa	Uniform	151 000	119 700	182 300	Tiruneh et al., (2025a)
.. Varav stam (kg)	plantation_stem	Skörd av biomassa	Uniform	93 400	71 400	115 400	Tiruneh et al., (2025a)
.. Varav bark (kg)	plantation_bark	Skörd av biomassa	Uniform	13 000	10 700	15 300	Tiruneh et al., (2025a)
.. Varav grenar (kg)	plantation_branches	Skörd av biomassa	Uniform	22 100	16 900	27 300	Tiruneh et al., (2025a)
.. Varav rötter (kg)	plantation_roots	Skörd av biomassa	Uniform	11 699	8 430	14 770	Tiruneh et al., (2025a)
.. Varav löv och små kvistar (kg)	plantation_leaves	Skörd av biomassa	Uniform	10 700	8 420	12 980	Tiruneh et al., (2025a)
Användbar biomassa (stamm & bark) på 1 hektar naturskog (kg) (± 20%)	forest_yield	Skörd av biomassa	Uniform	18 300	14 640	21 960	Tiruneh et al., (2025a)
Utsläpp av CO ₂ för energi som utvinns från träkol (g/MJ) (residential)	co2_g_MJ	Mattlagning	No uncertainty	112	-	-	IPCC (2006b)
Utsläpp av CH ₄ för energi som utvinns från träkol (g/MJ) (residential)	ch4_g_MJ	Mattlagning	Uniform	0,3305	0,275	0,386	IPCC (2006b)
Utsläpp av CO för energi som utvinns från träkol (g/MJ) (residential)	co_g_MJ	Mattlagning	No uncertainty	7	-	-	IPCC (2006d)
Utsläpp av (NO+NO ₂) för energi som utvinns från träkol (g/MJ) (residential)	nox_g_MJ	Mattlagning	No uncertainty	0,1	-	-	IPCC (2006c)
Utsläpp av N ₂ O för energi som utvinns från träkol (g/MJ) (residential)	n2o_g_MJ	Mattlagning	Uniform	0,00545	0,0016	0,0093	IPCC (2006b)
Värmevärde för träkolbruket (MJ/kg)	energ_brq	Mattlagning	No uncertainty	24,5	-	-	Njenga et al., 2014
Värmevärde för träkol (MJ/kg)	energy_char	Mattlagning	Uniform	29	28,6	30	Njenga et al., 2014
Mängd träkol i bricketter för att laga en måltid för 5 personer (kg)	kcj_brq	Mattlagning	Uniform	0,223865	0,21225	0,23548	(beräknat)
Mängd träkol för att laga en måltid för 5 personer (kg)	kcj_char	Mattlagning	Uniform	0,293	0,2778	0,3082	Kirimi et al., 2023
Antal gånger som matlagningsutrustning används (3 ggr/dag i 3 år) (± 20%)	kcj_use	Mattlagning	Uniform	3285	2628	3942	(antagen)
Mängd keramik i matlagningsutrustning (kg)	clay_kcj	Tillverkning av en KCJ	Uniform	1,5	1	2	The Ceramic Jiko Stove(u.a.)
Antal gånger som en ugn används (1 ggr/vecka i 10 år) (± 20%)	clim_use	Framställning av träkol	Uniform	521,42	417,136	625,704	Nturanabo et al., (2011)
Mängd trälim (teff) i en jordmilla (kg) (± 15%)	teff_kg	Tillverkning av en jordmilla	Uniform	100	85	115	Nturanabo et al., (2011)
Mängd stål i en Casamance (kg) (± 5%)	steel_casa	Tillverkning av en Casamance	Uniform	100	95	105	Nturanabo et al., (2011)
Mängd stål i en MRV-steel (kg) (± 5%)	steel_MRV	Tillverkning av en MRV-steel	Uniform	1280	1216	1344	Ballis et al., (2013)
Mängd tegel i en GMDR (kg) (± 5%)	brick_GMDR	Tillverkning av TRE GMDR	Uniform	2790	2650,5	2929,5	Ballis et al., (2013)
Mängd cement i en GMDR (kg) (± 5%)	cement_GMDR	Tillverkning av EN GMDR	Uniform	1490	1415,5	1564,5	Ballis et al., (2013)
Värmevärde för trärester som är färska (MJ/kg)	wet_wood_energy	Avfallsanläggning	No uncertainty	10,9	-	-	IPCC (2006a)
Värmevärde för trärester som är helt tork (MJ/kg)	burn_wood_energy	Avfallsanläggning	No uncertainty	20	-	-	IPCC (2006a)
Värmevärde för trärester som har lufttorkats (MJ/kg)	dry_wood_energy	Avfallsanläggning	Uniform	16,05	15,5	16,6	IPCC (2006a)
Utsläpp av CO ₂ för energi som utvinns när trä bränns (g/MJ) (residential)	g_co2_wood_MJ	Avfallsanläggning	No uncertainty	112	-	-	IPCC (2006b)
Utsläpp av CH ₄ för energi som utvinns när trä bränns (g/MJ) (residential)	g_ch4_wood_MJ	Avfallsanläggning	Uniform	0,25	0,2	0,3	IPCC (2006c)
Utsläpp av CO för energi som utvinns när trä bränns (g/MJ) (residential)	g_co_wood_MJ	Avfallsanläggning	Uniform	7,95	4,9	11	IPCC (2006a)
Utsläpp av (NO+NO ₂) för energi som utvinns när trä bränns (g/MJ) (residential)	g_nox_wood_MJ	Avfallsanläggning	Uniform	0,125	0,1	0,15	IPCC (2006c)
Utsläpp av N ₂ O för energi som utvinns när trä bränns (g/MJ) (residential)	g_n2o_wood_MJ	Avfallsanläggning	Uniform	0,0065	0,004	0,009	IPCC (2006c)
Utsläpp av SO ₂ när trä bränns (g/kg) (residential)	g_so2_wood_kg	Avfallsanläggning	Uniform	0,305	0,01	0,6	IPCC (2006a)
Rotationsid - naturskog	years_forest	Tillväxt av biomassa	No uncertainty	14	-	-	Njenga et al., 2014
Rotationsid - plantage (Acacia)	years_plantation	Tillväxt av biomassa	Uniform	5,5	5	6	Njenga et al., 2014
Andel naturskog som växer tillbaka efter skörd	regrow_percent	Tillväxt av biomassa	No uncertainty	0,4	-	-	(antagen)

Bilaga 2: Activity-Browser projekt bestående av databasen ‘AB_databas.bw2package’ samt parametervärden ‘ProjectParamExport.xlsx’

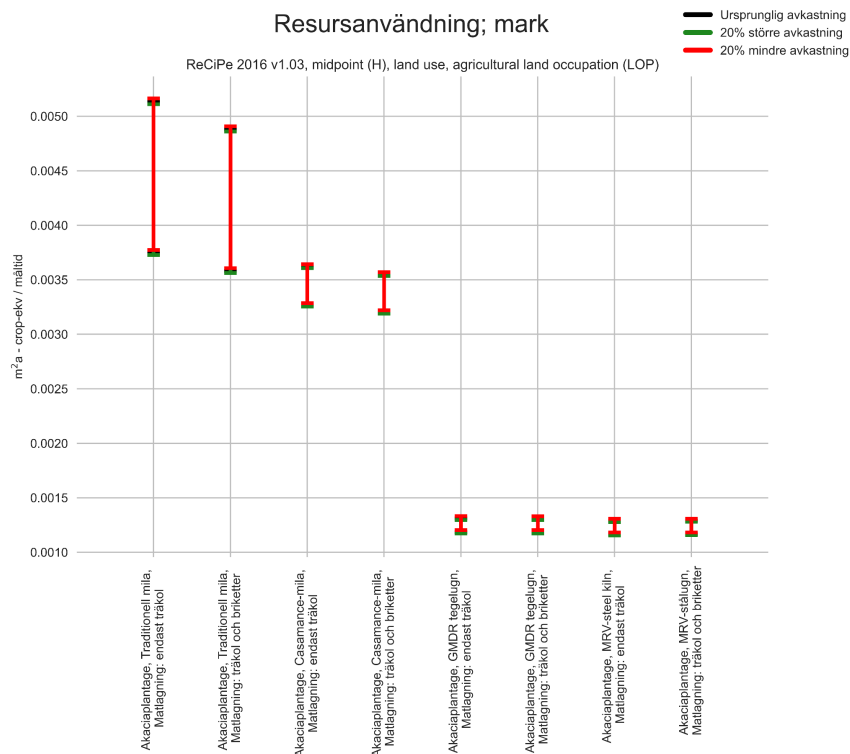
https://drive.google.com/drive/folders/13nUSlqyl5Gm-kHCzVL-OXNFUfjShmwV3?usp=drive_link

Bilaga 3: Python-kod ‘charcoal.py’ skriven i Jupyter-Notebook tillhörande *Bilaga 2*.

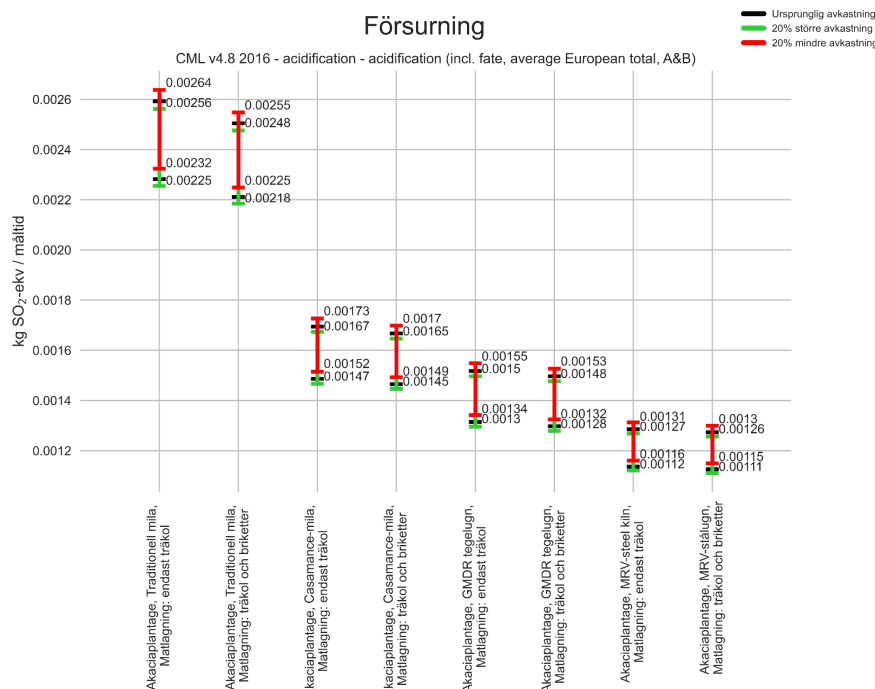
https://drive.google.com/drive/folders/13nUSlqyl5Gm-kHCzVL-OXNFUfjShmwV3?usp=drive_link

Bilaga 4: Parametervärden som använts i energi- och massflödesanalysen.

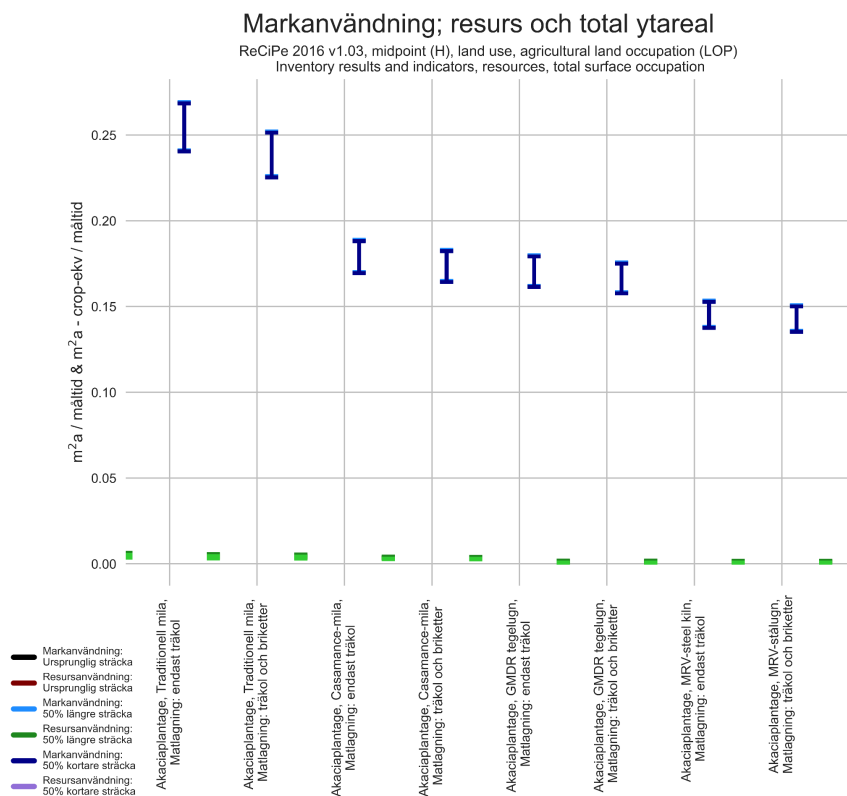
Material / process	Energi/massa -värde	Källa
Akacia energidensitet	19 MJ/kg	(R. Kumar et al., 2011)
Träkol energidensitet	29 MJ/kg	(Njenga et al., 2014).
Diesel energidensitet	42,5 MJ/kg	(T. Nektalova., 2008)
Tjära energidensitet	20 - 30 MJ/kg	(S. Adhikari et al 2018)
Rökgaser energidensitet	5 - 7,5 MJ/m ³	(E. Danso-Boateng et al., 2022).
Träkol för en måltid	0,3 kg	(Kirimu et al., 2013)
Transport (150 km , mindre lastbil)	0,11 kg diesel/tonkm.	<i>Ecoinvents 'Lorry 3.5- 7.5 ton, diesel, EURO 3/RoW'.</i>



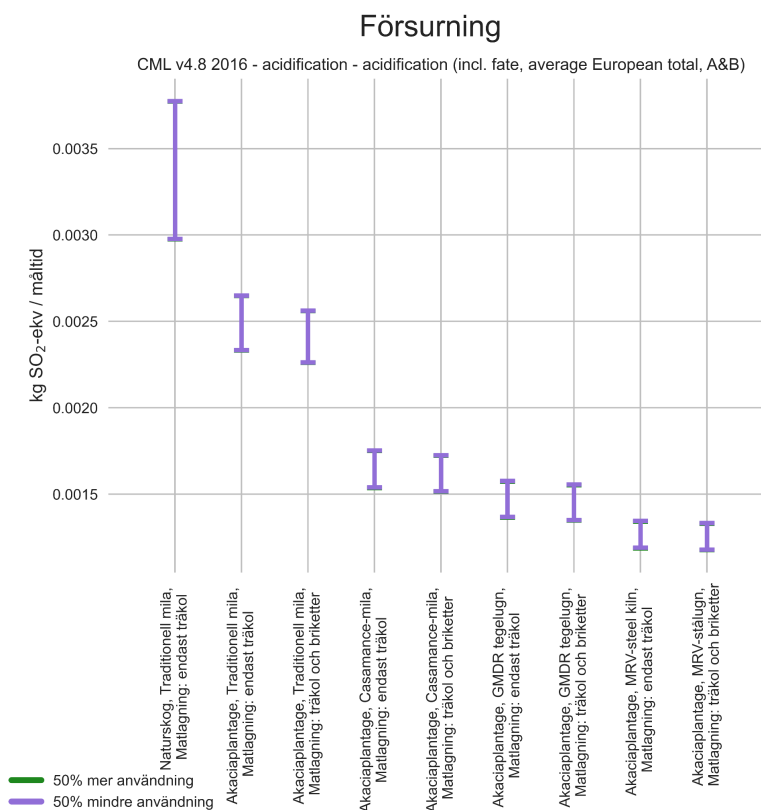
Bilaga 5: Resultat för användning av markresurser per måltid för de förbättrade träkolsystemen vid varierande skörd från plantagen.



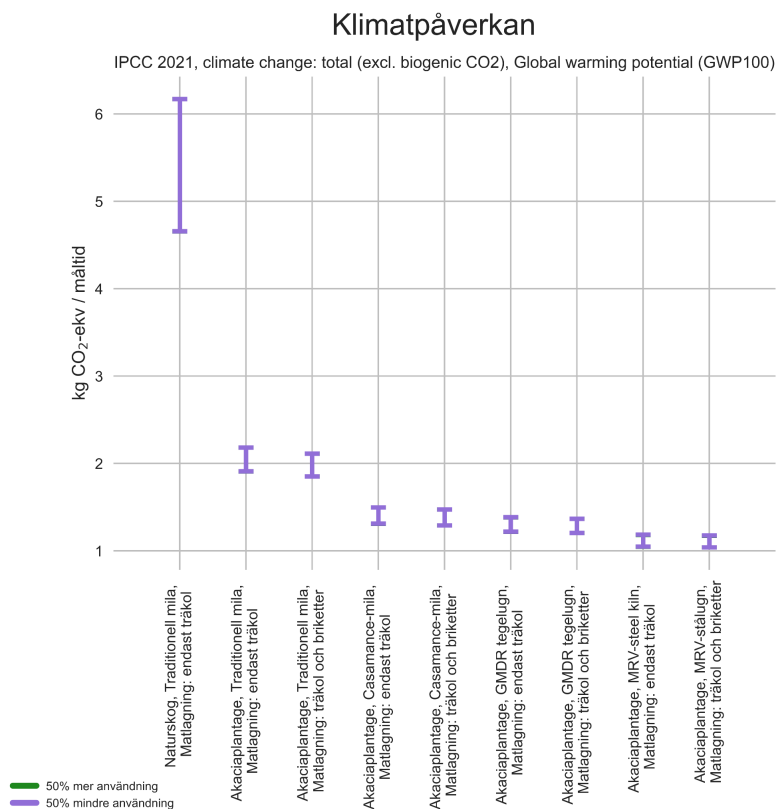
Bilaga 6: Resultat för försurning per måltid för de förbättrade träkolsystemen vid varierande skörd från plantagen.



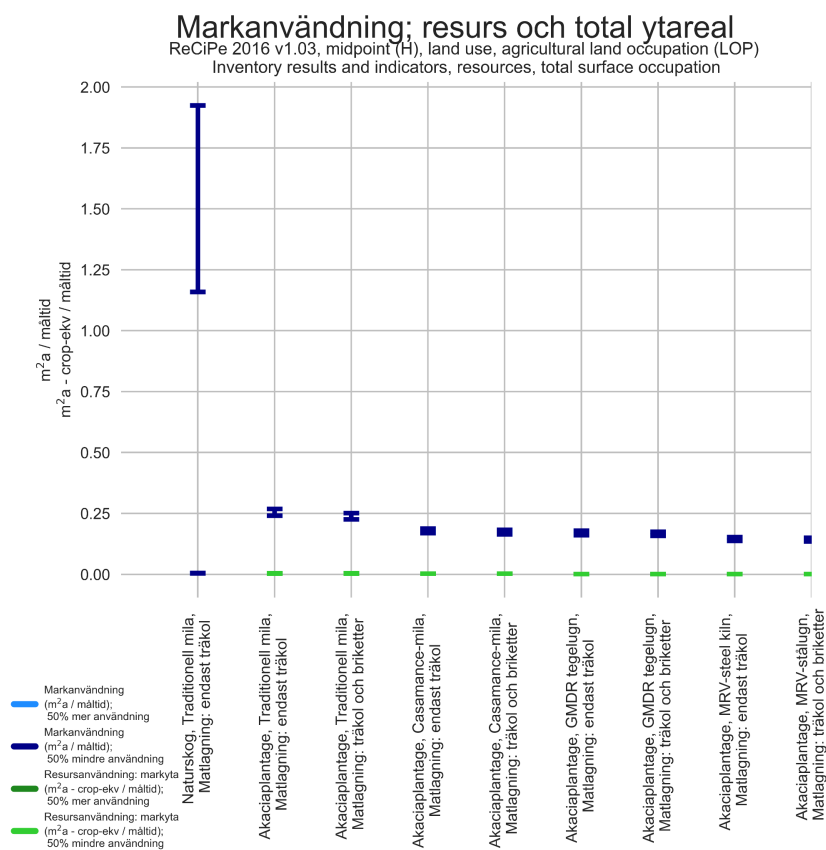
Bilaga 7: Resultat för markanvändning och resursanvändning per måltid för de förbättrade träkolsystemen vid varierande transportsträckor.



Bilaga 8: Resultat för försurning per måltid för de förbättrade träkolsystemen vid varierande användning av ugnar och matlagningsutrustning.



Bilaga 9: Resultat för klimatpåverkan per måltid för de förbättrade träkolsystemen vid varierande användning av ugnar och matlagningsutrustning.



Bilaga 10: Resultat för markanvändning och resursanvändning per måltid för de förbättrade träkolsystemen vid varierande användning av ugnar och matlagningsutrustning.

Bilaga 11 : Resultat från LCA och känslighetsanalys. Fortsättning på nästa två sidor.

Scenario	Klimatpåverkan kgCO ₂ ekv/måltid	Resursanvändning (mark, m ² a crop- ekv/måltid)	Markanvändning m ² a/måltid	Förbrukning kgSO ₂ ekv/måltid	Figur (F), Bilaga (g)	Värderande parameter
Kanslihetsanalys:						
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (illegal)	[4.65743 - 6.17093]	[0.00419 - 0.00588]	[1.15898 - 1.92464]	[0.00298 - 0.00377]	F8	
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a GMDR	[1.21947 - 1.39453]	[0.00118 - 0.00131]	[0.16179 - 0.17955]	[0.00137 - 0.00157]	F9, F10, F11	
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a Casamance	[1.13153 - 1.49824]	[0.00327 - 0.00362]	[0.16982 - 0.18851]	[0.00154 - 0.00175]	F9, F10, F11	
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (legal)	[1.90995 - 2.1817]	[0.00375 - 0.00513]	[0.24084 - 0.26883]	[0.00233 - 0.00265]	F9, F10, F11	
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a MRV-steel kiln	[1.0485 - 1.18503]	[0.00117 - 0.00129]	[0.13791 - 0.15307]	[0.00119 - 0.00134]	F9, F10, F11	
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from a GMDR	[1.20247 - 1.36753]	[0.00118 - 0.00131]	[0.15811 - 0.17539]	[0.00135 - 0.00155]	F9, F10, F11	
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from a Casamance	[1.29172 - 1.47386]	[0.0032 - 0.00355]	[0.16463 - 0.18272]	[0.00152 - 0.00172]	F9, F10, F11	
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from an Earth mound kiln (legal)	[1.85159 - 2.11268]	[0.00358 - 0.00485]	[0.22572 - 0.25172]	[0.00226 - 0.00256]	F9, F10, F11	
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from a MRV-steel kiln	[1.03982 - 1.17446]	[0.00117 - 0.00129]	[0.13558 - 0.15046]	[0.00118 - 0.00133]	F9, F10, F11	
Kanslihetsanalys: Transport						
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (illegal)	4.63161-6.14232	0.00314-0.00472	1.15832-1.92391	0.00287-0.00366	F14	Ingen transportsträcka: (0 km)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (illegal)	4.67035-6.18524	0.00472-0.00647	1.15931-1.15931	0.00303-0.00383	F14	50% längre transportsträcka: (225 km)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (illegal)	4.64452-6.15663	0.00367-0.0053	1.15865-1.15865	0.00293-0.00372	F14	50% kortare transportsträcka: (75 km)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a GMDR	1.23237-1.39884	0.00171-0.00189	0.16212-0.16212	0.00142-0.00163	F15, F16, B3	50% längre transportsträcka: (225 km)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a GMDR	1.20657-1.37023	0.00066-0.00073	0.16146-0.16146	0.00131-0.00152	F15, F16, B3	50% kortare transportsträcka: (75 km)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a Casamance	1.32443-1.51253	0.00379-0.0042	0.17015-0.17015	0.00159-0.00181	F15, F16, B3	50% längre transportsträcka: (225 km)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (legal)	1.29683-1.48395	0.00274-0.00304	0.16955-0.16955	0.00149-0.0017	F15, F16, B3	50% kortare transportsträcka: (75 km)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (legal)	1.92285-2.19599	0.00427-0.00571	0.24117-0.24117	0.00238-0.0027	F15, F16, B3	50% längre transportsträcka: (225 km)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (legal)	1.87052-2.1674	0.00322-0.00455	0.24051-0.24051	0.00228-0.00259	F15, F16, B3	50% kortare transportsträcka: (75 km)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (legal)	1.06141-1.19932	0.00169-0.00187	0.13824-0.13824	0.00124-0.0014	F15, F16, B3	50% längre transportsträcka: (225 km)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a MRV-steel kiln	1.03561-1.17073	0.00044-0.00071	0.13758-0.13758	0.00114-0.00129	F15, F16, B3	50% kortare transportsträcka: (75 km)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a MRV-steel kiln	1.21838-1.38183	0.00171-0.00189	0.15844-0.15844	0.00144-0.00161	F15, F16, B3	50% längre transportsträcka: (225 km)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from a GMDR	1.19257-1.35323	0.00066-0.00073	0.15778-0.15778	0.0013-0.0015	F15, F16, B3	50% kortare transportsträcka: (75 km)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from a Casamance	1.30463-1.48813	0.00373-0.00413	0.16496-0.16496	0.00157-0.00178	F15, F16, B3	50% längre transportsträcka: (225 km)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from a Casamance	1.27882-1.45959	0.00268-0.00297	0.1643-0.1643	0.00147-0.00167	F15, F16, B3	50% kortare transportsträcka: (75 km)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from an Earth mound kiln (legal)	1.86451-2.12698	0.00341-0.00546	0.22602-0.22605	0.00231-0.00262	F15, F16, B3	50% längre transportsträcka: (225 km)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from an Earth mound kiln (legal)	1.83867-2.09838	0.00305-0.0043	0.22539-0.22539	0.00221-0.0025	F15, F16, B3	50% kortare transportsträcka: (75 km)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from a MRV-steel kiln	1.05272-1.18875	0.00169-0.00187	0.13591-0.13591	0.00123-0.00139	F15, F16, B3	50% längre transportsträcka: (225 km)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from a MRV-steel kiln	1.02692-1.16017	0.00064-0.00071	0.13525-0.13525	0.00113-0.00127	F15, F16, B3	50% kortare transportsträcka: (75 km)
Kanslihetsanalys: Återväxt av naturskog						
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (illegal)	2.84047-4.15847	0.00419-0.00589	1.15898-1.92464	0.00298-0.00377	F17	Total återväxt: (100%)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (illegal)	5.86089-7.52391	0.00419-0.00589	1.15898-1.92464	0.00298-0.00377	F17	Åvskogning: (0%)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (illegal)	3.45003-4.82929	0.00419-0.00589	1.15898-1.92464	0.00298-0.00377	F17	Bättre återväxt av naturskog: (80%)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (illegal)	4.05433-5.50011	0.00419-0.00589	1.15898-1.92464	0.00298-0.00377	F17	Bättre återväxt av naturskog: (60%)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (illegal)	5.25916-6.84866	0.00419-0.00589	1.15898-1.92464	0.00298-0.00377	F17	Sämrre återväxt av naturskog: (20%)
Kanslihetsanalys: Åvskastning från plantage						
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a GMDR	1.17738-1.33785	0.00117-0.0013	0.13494-0.14975	0.00135-0.00155	F12, F13, B1, B2	20% större avkastning från plantage: (181.2 ton)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a GMDR	1.2826-1.45455	0.00121-0.00133	0.20207-0.22425	0.00139-0.0016	F12, F13, B1, B2	20% mindre avkastning från plantage: (120.8 ton)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a Casamance	1.26789-1.44989	0.00326-0.00361	0.14198-0.15786	0.00154-0.00175	F12, F13, B1, B2	20% större avkastning från plantage: (181.2 ton)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a Casamance	1.37699-1.57076	0.00329-0.00365	0.2116-0.23488	0.00157-0.00178	F12, F13, B1, B2	20% mindre avkastning från plantage: (120.8 ton)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (legal)	1.84778-2.11274	0.00333-0.00311	0.20124-0.22477	0.00231-0.00262	F12, F13, B1, B2	20% större avkastning från plantage: (181.2 ton)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (legal)	2.00321-2.28513	0.00378-0.00517	0.30023-0.32769	0.00237-0.00262	F12, F13, B1, B2	20% mindre avkastning från plantage: (120.8 ton)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from an Earth mound kiln (legal)	1.01265-1.14529	0.00116-0.00128	0.11504-0.12769	0.00117-0.00132	F12, F13, B1, B2	20% större avkastning från plantage: (181.2 ton)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a MRV-steel kiln	1.10226-1.24464	0.00118-0.00131	0.17222-0.19116	0.00121-0.00137	F12, F13, B1, B2	20% mindre avkastning från plantage: (120.8 ton)
Cooking a meal for 5 people using only charcoal from a MRV-steel kiln	1.16434-1.32195	0.00117-0.0013	0.13187-0.14629	0.00133-0.00153	F12, F13, B1, B2	20% större avkastning från plantage: (181.2 ton)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from a GMDR	1.26718-1.4359	0.0012-0.00133	0.19746-0.21905	0.00136-0.00158	F12, F13, B1, B2	20% mindre avkastning från plantage: (120.8 ton)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from a Casamance	1.24942-1.42707	0.00319-0.00353	0.31764-0.35276	0.00154-0.00175	F12, F13, B1, B2	20% större avkastning från plantage: (181.2 ton)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from a Casamance	1.35517-1.54405	0.00322-0.00357	0.20512-0.22766	0.00154-0.00175	F12, F13, B1, B2	20% mindre avkastning från plantage: (120.8 ton)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from an Earth mound kiln (legal)	1.79347-2.04819	0.0036-0.00486	0.18862-0.21048	0.00224-0.00253	F12, F13, B1, B2	20% större avkastning från plantage: (181.2 ton)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from an Earth mound kiln (legal)	1.93877-2.2095	0.00361-0.00491	0.28137-0.3136	0.00233-0.0026	F12, F13, B1, B2	20% mindre avkastning från plantage: (120.8 ton)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from a MRV-steel kiln	1.00458-1.13541	0.00116-0.00128	0.1131-0.12551	0.00116-0.00131	F12, F13, B1, B2	20% större avkastning från plantage: (181.2 ton)
Cooking a meal for 5 people using charcoal and briquettes from a MRV-steel kiln	1.09268-1.23303	0.00118-0.00131	0.1693-0.18789	0.0012-0.00136	F12, F13, B1, B2	20% mindre avkastning från plantage: (120.8 ton)

