



UPPSALA
UNIVERSITET



UPTEC W 18027

Examensarbete 30 hp
Maj 2018

Klimatpåverkan från användande av skogsrester till bioenergi med koldioxidlagring (BECCS) och biokol i Sverige

En komparativ livscykelanalys mellan två
klimatåtgärder i en svensk kontext

John Granström

REFERAT

Klimatpåverkan från användande av skogsrester till bioenergi med koldioxidlagring (BECCS) och biokol i Sverige. En komparativ livscykelanalys mellan två klimatåtgärder i en svensk kontext.

John Granström

Oförmåga att minska utsläppen av växthusgaser i tillräckligt takt för att undvika en alltför kraftig global uppvärmning har motiverat framtagandet av tekniker med potential att minska mängden koldioxid i atmosfären. En av dessa tekniker är bioenergi med koldioxidlagring (Bio-energy with carbon capture and storage, BECCS), där koldioxid avskiljs från punktkällor med biogena utsläpp och lagras i geologiska strukturer. Även biokol tillsatt till jordbruksmark har potential att bidra till negativa utsläpp. Både svenska och internationella strategier inkluderar negativa utsläpp för att uppfylla förpliktelserna i Parisavtalet. För att säkerhetsställa att teknikerna lever upp till potentialen krävs ett livscykelperspektiv där klimatpåverkan beräknas på systemnivå. En livscykelanalys utfördes, där klimatpåverkan vid utnyttjande av grenar och toppar (GROT) från den svenska skogsindustrin beräknades för teknikerna BECCS och biokol tillsatt till jordbruksmark. Teknikerna jämfördes med ett referensscenario där GROT förbränns i ett kraftvärmeverk för att producera el och fjärrvärme utan omhändertagande av koldioxid som bildas vid förbränning. Resultaten visar att BECCS har potentialen att bidra med negativa utsläpp på mellan -168 och -666 kg CO₂-ekvivalenter/ ton GROT torrsubstans (TS). Då GROT-skörden ökar till 80% av den årliga avverkade arealen skog i Sverige och kombineras med gallring, resulterar 666 kg CO₂-ekvivalenter/ ton GROT TS, i 4,4 miljoner ton CO₂-ekvivalenter per år. Detta motsvarar 25,8 % av klimatpåverkan från inrikestransporter i Sverige år 2016. Nettoutsläppen från biokol tillsatt till jordbruksmarker, varierar mellan 934 och -344 kg CO₂-ekvivalenter/ ton GROT TS. Då GROT-skörden ökar till 80% av den avverkade arealen skog i Sverige och kombineras med gallring, resulterar 344 kg CO₂-ekvivalenter/ton GROT TS i 2,2 miljoner ton CO₂-ekvivalenter. Detta motsvarar 13,3 % av klimatpåverkan från inrikes transporter i Sverige år 2016. Båda teknikerna har potential att åstadkomma nettonegativa växthusgasutsläpp, men resultaten är beroende av klimatpåverkan från ersättande el- och fjärrvärmeproduktion.

Nyckelord: klimatförändringar, CCS, BECCS, biokol, koldioxidbindning, grenar och toppar, kraftvärmeverk, klimatpåverkan

Institutionen för geovetenskaper; luft-, vatten- och landskapslära. Uppsala universitet, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala.

ABSTRACT

Comparative life cycle assessment of using forest residues for Bio-energy with carbon capture and storage (BECCS) and biochar for climate mitigation in Sweden.

John Granström

The inability to achieve sufficient reduction of greenhouse gas emissions has led to the development of techniques with potential to achieve negative greenhouse gas emissions. One of these techniques is called Bio-energy with carbon capture and storage (BECCS), where carbon dioxide is captured from biogenic point sources with biogenic emissions and stored underground. Biochar applied to farmland is another technique with potential to achieve negative greenhouse gas emissions. Both Swedish and international strategies, to meet the obligations in the Paris Agreement, include negative greenhouse gas emissions. A life cycle approach is required to ensure that the techniques deliver on the promise of negative emissions. A Life cycle assessment was conducted where the global warming potential was calculated for BECCS and biochar added to farmland in two different scenarios where tops and branches (GROT) from the Swedish forest industry were used as feedstock. The techniques were compared to a reference scenario where GROT were used in a combined heat and power plant (CHP-plant). The results show that BECCS has the potential to achieve net negative emissions of between -168 and -666 kg CO₂-equivalents/ tonne GROT dry matter (DM). When GROT is harvested from 80% of the yearly final felling areas in Sweden and combined with thinning, 666 kg CO₂-equivalents/ Mg GROT DM is equivalent to in 4,4 million ton CO₂-equivalents per year. This corresponds to 25,8 % of Sweden's greenhouse gas emissions from domestic transportation in 2016. The results of greenhouse gas emissions from biochar applied to farmland varied between 934 to -344 CO₂-equivalents/ Mg GROT DM. When GROT is harvested from 80% of final felling areas in Sweden and combined with thinning, -344 CO₂-equivalents/ Mg GROT DM is equivalent to 2,2 million ton CO₂-equivalents per year. This corresponds to 13,3 % of Sweden's greenhouse gas emissions from domestic transportation in 2016. Both techniques have the potential to achieve net negative greenhouse gas emissions. However, the results are greatly influenced by the climate impact from generating the electricity to replace the losses in electricity production when GROT is used for BECCS and biochar instead of in a CHP-plant.

Keywords: climate change, CCS, BECCS, biochar, climate mitigation, tops and branches, combined heat and power plant, climate impact

Department of Earth Sciences, Program for Air, Waters and Landscape Sciences.
Uppsala University, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala

FÖRORD

Detta examensarbete motsvarar 30 högskolepoäng och utgör den sista delen av min utbildning på civilingenjörsprogrammet i miljö och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet (SLU). Mina handledare var Fritjof Fagerlund, universitetslektor vid institutionen för geovetenskaper; luft-, vatten- och landskapslära vid Uppsala universitet och Torun Hammar postdoktor vid institutionen för energi och teknik vid SLU. Gunnar Larsson forskare vid institutionen för energi och teknik vid SLU har varit examensarbetes ämnesgranskare. Fritjof Fagerlund agerade även som examinator.

Jag vill tacka Fritjof Fagerlund för sitt engagemang vid uppstarten av detta examensarbete, Torun Hammar för hjälpen vid många möten och diskussioner under arbetets gång, Gunnar Larsson för hjälpen i slutfasen av arbetet och Elias Azzi för hjälpen och utbytet av idéer kring biokols uppehållstid i marken.

Jag vill dessutom tacka min familj, Kerstin Thungström, Anna Bergentz, Jens Forslund och övriga studenter på civilingenjörsprogrammet miljö och vattenteknik vid Uppsala universitet för deras stöd under examensarbetet och åren som ledde fram till detta.

John Granström

Uppsala, 2018

“Sannerligen, jag säger er: om vetekornet inte faller i jorden och dör förblir det ett ensamt korn. Men om det dör ger det rik skörd.”

Joh 12:24

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Klimatförändringarna hör till mänsklighetens största utmaningar och arbetet med att minska utsläppen av växthusgaser är viktigare än någonsin. I dagsläget minskar inte utsläppen i tillräckligt snabb takt för att undvika en global uppvärmning på mer än 2 °C. Ett sätt att motverka den globala uppvärmningen är att sänka koldioxidkoncentrationen i atmosfären med hjälp av koldioxidbindning.

Biokol och Bio-energy with carbon capture and Storage (BECCS) är två tekniker med potential att fånga in koldioxid från atmosfären och lagra den i marken under en lång tid. Biokol framställs med hjälp av pyrolys, som går ut på att utsätta biomassa för höga temperaturer i en syrefri miljö. Biokolet tillsätts sedan till jordbruksmarker och kan där lagra en stor del av kolet från biomassan under hundratals år. De biprodukter som uppkommer vid pyrolys kan användas till att framställa el och värme. BECCS går ut på att fånga in koldioxid från stora utsläppskällor som använder biomassa och sedan lagrar denna koldioxid under marken. Koldioxiden kan fångas in från bland annat kraftvärmeverk och industrier.

Båda dessa tekniker kräver tillgång till biomassa. En användbar resurs är avverkningsrester från skogsindustrin i form av grenar och toppar (GROT). Det mesta av den GROT som används idag används som bränsle i kraftvärmeverk men det finns också stora tillgångar som inte utnyttjas. Studien undersöker hur mycket koldioxid som kan bindas in då GROT används till BECCS och biokol som tillsätts till jordbruksmarker.

Studien tar hänsyn till att GROT inte är en outnyttjad resurs och för att ta hänsyn till detta är referensfallet i studien att GROT används som bränsle i kraftvärmeverk. BECCS och framställande av biokol är energikrävande processer. Detta medför att elproduktionen blir lägre jämfört med då GROT förbränns i ett kraftvärmeverk. Den minskade elproduktionen måste ersättas med el från en annan källa. Vilken energikälla som väljs har en stor inverkan på resultaten. Då den minskade elproduktionen ersätts med produktion av el med stora koldioxidutsläpp, visar resultaten att den nettoinbundna koldioxiden minskar för båda teknikerna. Resultaten visar att BECCS har en större potential att binda in koldioxid, per ton använd GROT, jämfört med biokol tillsatt till jordbruksmark. Detta gäller oavsett vilken el som används för att ersätta den minskade elproduktionen. Det framgår dessutom att ett system där GROT används till att producera biokol som sedan tillsätts till jordbruksmark är helt beroende av tillgång till koldioxidsnål elförsörjning för att nettoeffekten av systemet skall bli att koldioxid binds in.

Då den ersättande elen antas komma från ett GROT-eldat kraftvärmeverk, visar resultaten i denna studie att det är möjligt att binda in 666 kg CO₂ per ton GROT som

eldas i kraftvärmeverk. Då GROT-skörden ökar till den maximala nivån som fortfarande möjliggör långsiktig skogsproduktion, är det möjligt att binda koldioxid som motsvarar 25,8 % av utsläppen från inrikes transporter i Sverige år 2016. Motsvarande siffra för biokol som tillsätts till jordbruksmark är 344 kg inbunden koldioxid per ton GROT. Vid ett ökat GROT-uttag motsvarar detta 13,3 % av utsläppen från inrikes transporter i Sverige år 2016.

Resultaten visar att BECCS och biokol kan bidra till att minska Sveriges klimatpåverkan men också betala av gammal klimatskuld. Sverige har satt upp mål om att vara koldioxidneutrala år 2045 för att sedan uppnå negativa nettoutsläpp. För att uppnå målet om att vara klimatneutralt krävs drastiska åtgärder för att minska utsläppen. Målet om att bli koldioxidnegativt förutsätter koldioxidbindning där BECCS och biokol kan bidra. Studien är utförd som en livscykelanalys där klimatpåverkan beräknas från samtliga processer. Resultaten för BECCS och biokol jämförs med att elda GROT i ett kraftvärmeverk för att producera el och värme.

ORDLISTA

CCS - Carbon Capture and Storage

BECCS – Bioenergi med koldioxidlagring (Bio-energy with carbon capture and storage)

GROT - Grenar och toppar

LCA – Livscykelanalys

ALCA – Bokföringsanalys (Attributional life cycle assessment)

CLCA - Konsekvensanalyser (Consequential life cycle assessment)

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (FN:s klimatpanel)

CFB - Cirkulerande fluidiserad bädd

BFB - Bubblande fluidiserad bädd

PC - Pulveriserad kol

IEA - International Energy Agency (Internationella energirådet)

IEAGHG - International Energy Agency Greenhouse Gas Research and Development Programme

1 INLEDNING	9
1.1 SYFTE OCH MÅL	10
1.2 FRÅGESTÄLLNINGAR	10
1.3 AVGRÄNSNINGAR	10
2 BAKGRUND	11
2.1 SVERIGES MÅL OM ATT KOLDIOXIDNEUTRALT	11
2.2 GREVAR OCH TOPPAR (GROT)	12
2.3 KRAFTVÄRMEVERK	13
2.4 CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)	14
2.4.1 Energiförlust och värmestillskott till följd av koldioxidavskiljning	16
2.5 BIO-ENERGY WITH CARBON CAPTURE AND STORAGE (BECCS)	17
2.6 BOKOL	18
2.7 LIVSCYKELANALYS (LCA)	20
2.8 TIDIGARE LCA STUDIER INOM OMRÅDET	21
3 METOD	22
3.1 SCENARIOBESKRIVNING	22
3.1.1 Referensscenariot	23
3.1.2 Scenario 1	23
3.1.3 Scenario 2	24
3.2 SYSTEMGRÄNSER	25
3.3 KLIMATPÅVERKANSBEDÖMNING	26
3.4 HANTERING AV BIPRODUKTER OCH ALLOKERINGSMETODER	27
3.5 FALLBESKRIVNING	27
4 DATAINSAMLING	29
4.1 TRANSPORT OCH INFRASTRUKTUR	29
4.2 REFERENSSCENARIOT	29
4.2.1 Naturlig nedbrytning av GROT	29
4.2.2 Skotning och transport av GROT till kraftvärmeverk	29
4.2.3 Verkningsgrader och utsläpp vid förbränning	30
4.3 SCENARIO 1 (BECCS)	32
4.3.1 Val av kraftvärmeverk och avskiljningsteknik	32
4.3.2 Energiförlust som följd av koldioxidavskiljning	32
4.3.3 Koldioxidläckage vid slutförvaring	34

4.4 SCENARIO 2 (Biokol)	35
4.4.1 Biokolets uppehållstid i mark	35
4.4.2 Produktfördelning, energi- och värmeproduktion vid pyrolys	35
4.4.3 Transport av biokol till jordbruksmark	36
4.4.4 Lustgasavgång från jordbruksmark	36
4.5 KOMPENSATION VID FÖRÄNDRAD ENERGIPRODUKTION	36
5 RESULTAT	40
5.1 REFERENSSCENARIOT	40
5.2 SCENARIO 1 (BECCS)	41
5.3 SCENARIO 2 (BIOKOL)	43
5.4 JÄMFÖRANDE AVSNITT	44
5.5 KÄNSLIGHETSANALYS	46
6 DISKUSSION	48
6.1 REFERENSSCENARIOT	48
6.2 SCENARIO 1 (BECCS)	49
6.3 SCENARIO 2 (BIOKOL)	49
6.4 GENERELL DISKUSSION	50
6.5 KÄNSLIGHETSANALYS	52
6.6 OSÄKERHETER	52
6.7 JÄMFÖRELSE MED RESULTAT I TIDIGARE STUDIER	53
6.8 FÖRSLAG PÅ FRAMTIDA STUDIER	54
7 SLUTSATSER	55
REFERENSER	56

1 INLEDNING

Det har på senare år framgått allt tydligare att utsläppen av växthusgaser inte minskar i tillräckligt snabb takt och att två tredjedelar av den beräknade koldioxidbudgeten som håller jordens medeltemperatur under 2°C uppvärmning, till år 2100, redan är förbrukad (Rogelj et al., 2016). Denna utveckling har motiverat forskare och politiker att fokusera alltmer på tekniker som har potential att aktivt sänka koldioxidkoncentrationen i atmosfären. Carbon Capture and Storage (CCS) har lyfts fram av FN:s klimatpanel (IPCC) som en metod med potential att snabbt minska utsläppen från stora punktkällor (IPCC, 2014). European Academies Science Advisory Council (EASAC) lyfter fram ett antal andra metoder med potential att åstadkomma negativa nettoutsläpp, trädplantering, förändrad markanvändning, ökad vittring, koldioxidavskiljning direkt från luften och gödsling av haven (EASAC, 2018). I Sverige bidrog förändrad markanvändning och skogsbruk till negativa utsläpp på cirka 43 miljoner ton koldioxidekvivalenter under 2016 (Naturvårdsverket, 2018a).

Genom att avskilja och kondensera in koldioxidutsläppen från kraftverk och industrier med stora utsläpp och lagra det i geologiska strukturer till havs eller på land är det möjligt att minska utsläppen med upp till 90% (IPCC, 2005). Avskiljnings-tekniker kan också användas på punktkällor där utsläpp härstammar från biomassa och benämns då "Bio-energy with carbon capture and storage" (BECCS) (IEAGHG, 2011). Eftersom biomassan har bundit in koldioxid från atmosfären via fotosyntesen och denna koldioxid sedan fångas in och lagras under jorden har BECCS potential att åstadkomma nettoupptag av koldioxid (Williamson, 2016). Naturvårdsverket inkluderar BECCS i ett av de två framtidsscenarioer som möjliggör för Sverige att bli koldioxidneutralt (Naturvårdsverket, 2013). Riksdagen har dessutom antagit ett klimatpolitiskt ramverk med målet att Sverige ska vara klimatneutralt år 2045, och sedan uppnå negativa utsläpp av växthusgaser (Regeringskansliet, 2017).

En annan metod med potential att bidra till sänkta koldioxidkoncentrationen i atmosfären är att tillsätta biokol till jordbruksmark. Genom att utsätta biomassa för pyrolys framställs produkterna biokol, bioolja och syntesgas. (Maraseni, 2010). Det råder en viss oenighet inom forskningen, men studier har visat att biokol har en stor potential att binda in koldioxid i jordbruksmark och fungera som jordförbättrare (Woolf et al, 2010). Båda dessa tekniker kräver dock tillgång till stora mängder biomassa för att uppfylla potentialen som klimatåtgärder. Biomassan består vanligtvis av biogrödor eller restprodukter från jordbruk eller skogsbruk. Även påverkan på faktorer som markanvändning och matproduktion bör beaktas (Fuss et al., 2014). EASAC bedömer, i en rapport från 2018, att det är svårt att generellt uppskatta hur hållbart BECCS är och fallstudier för varje specifikt system rekommenderas (EASAC, 2018). Detta

examensarbete syftar till att beräkna vilken potential biokol och BECCS har att åstadkomma negativa utsläpp i en fallstudie med svenska förhållanden.

Skogsindustrin är den huvudsakliga källan till biomassa i Sverige och uttaget av restprodukter som grenar och toppar (GROT) används redan idag till bränsle i kraftvärmeverk. Endast 30% av den tillgängliga GROT-mängden plockas ut idag och det finns potential att öka uttaget av skogsbränsle. Uttag av GROT anses vara mest lämplig ur miljöperspektiv (Staffas et al, 2015; de Jong et al., 2012). Denna resurs kan vara mycket värdefull för Sveriges klimatarbete och kan både förbrännas i kraftverk med CCS och omvandlas till biokol. Ett optimalt utnyttjande av den producerade GROT:en kräver dock data och kunskap om hela systemet. Med hjälp av en livscykelanalys där klimatpåverkan från produktion av biomassa, transporter, omvandling och slutförvaring beaktas är det möjligt att beräkna hur skogsresterna bör användas för att åstadkomma största möjliga klimatnytta.

1.1 SYFTE OCH MÅL

Målet med projektet är att, med hjälp av en livscykelanalys, erhålla data för vilken miljöpåverkan BECCS och biokol har utifrån miljöpåverkanskategorin klimatpåverkan och beräkna teknikernas potential att åstadkomma nettonegativa koldioxidutsläpp. Genom att beräkna klimatpåverkan från hela livscykeln för teknikerna är det möjligt att jämföra den totala klimatpåverkan mellan alternativen.

Examensarbetet analyserar också vilken potential användandet av GROT från svenska skogar har att bidra till att uppnå målet i det klimatpolitiska ramverket att Sverige skall vara klimatneutralt 2045.

1.2 FRÅGESTÄLLNINGAR

- Hur stor blir klimatpåverkan från användningen av GROT till BECCS och biokol jämfört med förbränning i ett kraftvärmeverk?
- Vilken teknik har störst potential att bidra med nettonegativa koldioxidutsläpp?
- Hur stor är Sveriges tillgång på GROT? Och med hur mycket kan BECCS och biokol bidra till att minska Sveriges klimatpåverkan?

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Miljöpåverkan från BECCS- och biokolssystemen analyseras längs hela livscykeln, från skotning av GROT till lagring av koldioxid. Miljöpåverkan från BECCS beräknas utifrån antagandet att koldioxid avskiljs i kraftvärmeverk eldade med GROT.

Klimatpåverkan från BECCS jämförs med referensscenariot, alternativet att omvandla GROT till biokol. Både biogen koldioxid från biomassa och fossil koldioxid behandlas i studien. Kraftvärmeverket Värtaverket i Stockholm används som referens vid transport där biokolet och den kondenserade koldioxiden antas transporteras från Värtaverket till lämpliga jordbruksmarker och geologiska strukturer.

2 BAKGRUND

I detta avsnitt ges en bakgrund till de viktigaste delarna av studien. En översikt presenteras över viktiga samband, förutsättningar och potentialen hos de olika teknikerna. En bakgrund ges av övriga områden som inkluderas i systemen och några exempel på tidigare studier inom området presenteras.

2.1 SVERIGES MÅL OM ATT KOLDIOXIDNEUTRALT

I det nya klimatpolitiska ramverket har Sverige satt upp målet att vara koldioxid neutralt år 2045, för att sedan uppnå negativa nettoutsläpp (Regeringskansliet, 2017). Utifrån målet om ett koldioxid neutralt Sverige och visionen att begränsa jordens uppvärmning till 2°C, jämfört med förindustriell nivå, har naturvårdsverket tagit fram två scenarier. I det första scenariot minskar utsläppen från 65 miljoner ton CO₂-ekvivalenter till cirka 10 miljoner ton per år 2050, de resterande utsläppen kompenseras genom handel med utsläppsrätter. Utsläppsminskningarna härleds framförallt från ny teknik i transportsektorn, ett transportsnålt samhälle, utfasning av fossila bränslen för industrins värmebehov samt implementering av avskiljnings-teknik (CCS). I scenariot används CCS till punktkällor med utsläpp från både biologiska och fossila källor. BECCS förväntas bidra med nettonegativa utsläpp på 10 miljoner ton CO₂-ekvivalenter per år. Utsläppsminskningarna i det andra scenariot härstammar från att industrin ställer om till att drivas på elektricitet, förändrad markanvändning, förändrat skogsbruk samt utsläppsminskningar i andra länder. Förändringar inom markanvändning och skogsbruk förväntas bidra med nettonegativa utsläpp om cirka 10 miljoner ton CO₂-ekvivalenter per år och behovet av inköpta utsläppsrätter utanför Sverige förväntas uppgå till mellan 10 och 20 miljoner ton CO₂-ekvivalenter (Naturvårdsverket, 2013).

Naturvårdsverket anser att skatter och avgifter på koldioxidutsläpp är det effektivaste styrmedlet för att minska utsläppen och att handeln med utsläppsrätter är EU:s mest betydande styrmedel. För att handeln med utsläppsrätter ska få den önskade effekten krävs dock ett underskott av utsläppsrätter som driver upp priserna och gör det lönsamt att reducera utsläppen och investera i klimatsmart teknik (Naturvårdsverket, 2013). Under 2016 uppgick de totala koldioxidutsläppen från biogena källor till cirka 32 miljoner ton koldioxid per år. Cirka 15 miljoner ton av de biogena utsläppen härstammar från el och fjärrvärmeproduktion. Industrin står för cirka 7 miljoner ton biogena CO₂-utsläpp (SCB, 2017). Hälften av all biomassa som konsumerades under

2013 användes i kraftvärmeverk för framställning av el och fjärrvärme och år 2016 stod biomassa för cirka hälften av fjärrvärmeproduktionen. Den största delen av den producerade biomassan i Sverige härstammar från skogsbruk (Ericsson & Werner, 2016).

2.2 GRENAR OCH TOPPAR (GROT)

Biomassa är en eftertraktad resurs och efterfrågan ökar i takt med att utfasningen av fossila bränslen fortskrider (Lindholm, Berg & Hansson, 2010). Utnyttjande av restprodukter inom skogsbruket anses vara klimatsmart, eftersom materialet relativt snabbt bryts ned och avger koldioxid till atmosfären om det lämnas kvar (Orheim & Arasto, 2016). Trädbränsle där råvaran inte haft någon tidigare användning kallas skogsbränsle och inkluderar stubbar, stamved, grenar och toppar (GROT), bark, flis och andra biprodukter från industrin (de Jong et al, 2012).

Den GROT som omhändertas flisas och används idag till produktion av el och värme i kraftvärmeverk. Cirka 30% av den GROT som uppstår vid avverkning omhändertas. Den resterande mängden används bland annat för att undvika körskador från skogsmaskiner eller lämnas kvar för näringsåterföring. Transport av GROT från svåråtkomliga områden är dessutom förknippat med höga kostnader vilket bidrar till att stora mängder GROT inte omhändertas (Staffas et al., 2015).

Majoriteten av kolet i skogsbiomassan återfinns i stammen (50–60%). Det resterande kolet är uppdelat mellan grenar och barr (20%) samt rotsystemet (20–25%). Cirka 50% av det årliga kolupptaget sker i stammen och resterande är jämnt fördelat mellan grenar och barr samt rotsystemet. Varje års beräknas 0.6 ton kol per hektar bindas in i stamveden och cirka 0,025 ton C per hektar i GROT (Naturvårdsverket, 2006).

Under 2013 uppgick det totala GROT-uttaget till cirka 1,8 miljoner ton torrs substans (TS) (Skogsstyrelsen, 2013). Den årliga tillväxttakten av GROT under 2015 uppgick till 17 miljoner ton TS. Den totala mängden stående skogsbiomassa uppgick 2015 till 2 450 miljoner ton TS varav GROT utgör 500 miljoner ton TS (Börjesson, 2016).

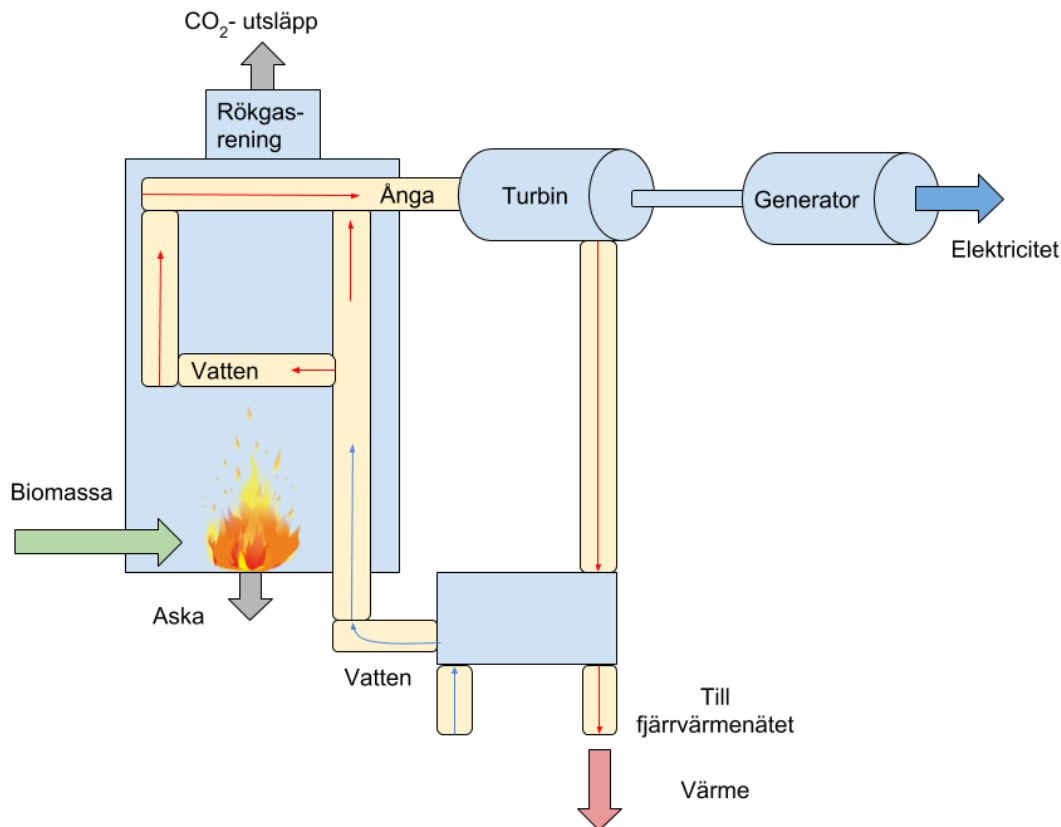
Ett ökat GROT-uttag kan påverka mark- och vattenkemin, biodiversitet och långsiktig produktivitet i skogen. Aska bör återföras till skogsmarken för att motverka näringsuttag och försurning. Utifrån antagandet att gödsel inte tillsätts för att motverka näringsförluster, bedöms skogsbruket kunna bedrivas hållbart ur ett produktivitetsperspektiv då GROT skördas från 80% eller mindre av den avverkade arealen. Vid gallring och uttag från 80 % av avverkad areal motsvarar ett uttag på 6,5 miljoner ton GROT TS och en energipotential på cirka 115 PJ per år, vid uttag från slutavverkning och röjning (de Jong et al., 2017).

2.3 KRAFTVÄRMEVERK

Det finns många olika tekniker som kan omvandla ett fast bränsle till el och värme. De vanligaste pannorna vid storskalig förbränning av biobränslen är bubblande fluidiserad bädd (BFB) och cirkulerande fluidiserad bädd (CFB). I dessa tekniker blandas bränslet med ett bäddmaterial bestående av sand. Materialet rörs om med hjälp av luftströmmar underifrån. Tekniken är mycket anpassningsbar och välfungerande för fasta bränslen (Byman, 2015). Det är också möjligt att använda biomassa som ett kompletterande bränsle i ett kolkraftverk för att minska utsläppen av koldioxid. (Sami, Annamalai & Wooldridge 2001).

Värme kraft är benämningen på tekniker som använder värme för att producera elektricitet. Den värme som bildas vid förbränning av ett bränsle används till att förångna vatten till ånga som via en ångturbin producerar el. Verkningsgraden ökar vid en stor temperaturskillnad mellan ångan som går in och ut ur ångturbinen, för att optimera processen kyls ångan ned efter att den har passerat turbinen. I ett kraftvärmeverk produceras el samtidigt som den, vid avkylningprocesser, uppkomna restvärmen leds vidare till fjärrvärmenätet. Samproduktion av el och värme medför en lägre verkningsgrad för elproduktionen på mellan 5–15%. I Sverige har fjärrvärmeproduktionen varit prioriterad vilket har medfört att systemen är optimerade för värmeproduktion och att elproduktion har ansetts vara en restprodukt (Byman, 2015).

Figur 1 illustrerar ett kraftvärmeverk som producerar både värme och elektricitet. Biomassa eldas i värmepannan, värmen som bildas i pannan förångar vatten som drivs genom en turbin som via en generator producerar el. Den värme som uppstår vid nedkylning av ångan transporteras ut till fjärrvärmenätet och nytt vatten pumpas in i värmepannan i ett kretslopp. Det är möjligt att fånga in koldioxidutsläppen från skorstenen genom att leda om de renade rökgaserna till en avskiljningsanläggning av typen post combustion.



Figur 1 Schematisk bild över ett kraftvärmeverk med förbränning av biomassa, anpassad efter Byman (2015)

2.4 CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)

CCS-konceptet går ut på att avskilja och fånga in koldioxid i utsläppen från fabriker, kraftverk och andra industrier, transportera koldioxiden till platser med förutsättningar för långsiktig lagring av koldioxid samt lagring av koldioxiden i geologiska strukturer. Tekniken anses besitta en stor potential att bidra till minskade nettoutsläpp av växthusgaser (Kheshgi, 2012). IPCC har tagit fram ett antal framtidsscenarioer med olika nivåer av global uppvärmning. Flera av de scenarioer som håller jordens medeltemperatur under 2°C uppvärmning, jämfört med förindustriella förhållanden, inkluderar en storskalig implementation av CCS-teknik. I dessa scenarioer beräknas cirka 10 Gt CO₂ bindas in per år vid år 2050 (Rogelj et al., 2016). Det finns tre dominerande metoder för att avskilja och fånga in koldioxid från punktkällor, post combustion, pre combustion och oxyfuelsystem.

Koldioxidavskiljning med post combustion bygger på att koldioxid separeras från rökgaserna med hjälp av ett lösningsmedel. Rökgaserna innehåller vanligtvis mellan 2–15% koldioxid. Koldioxiden separeras från övriga rökgaser efter att rökgasen renats från övriga föroreningar. Den separerade koldioxiden komprimeras och förbereds för transport via rörledning eller fraktfartyg (IPCC, 2005). Post combustion-teknik anses vara den bäst lämpade avskiljningstekniken för installation på redan befintliga kraftverk

eftersom endast rökgasset berörs. Koldioxid separeras efter övrig utrustning vilket lämnar den övriga anläggningen opåverkad (IEA, 2016).

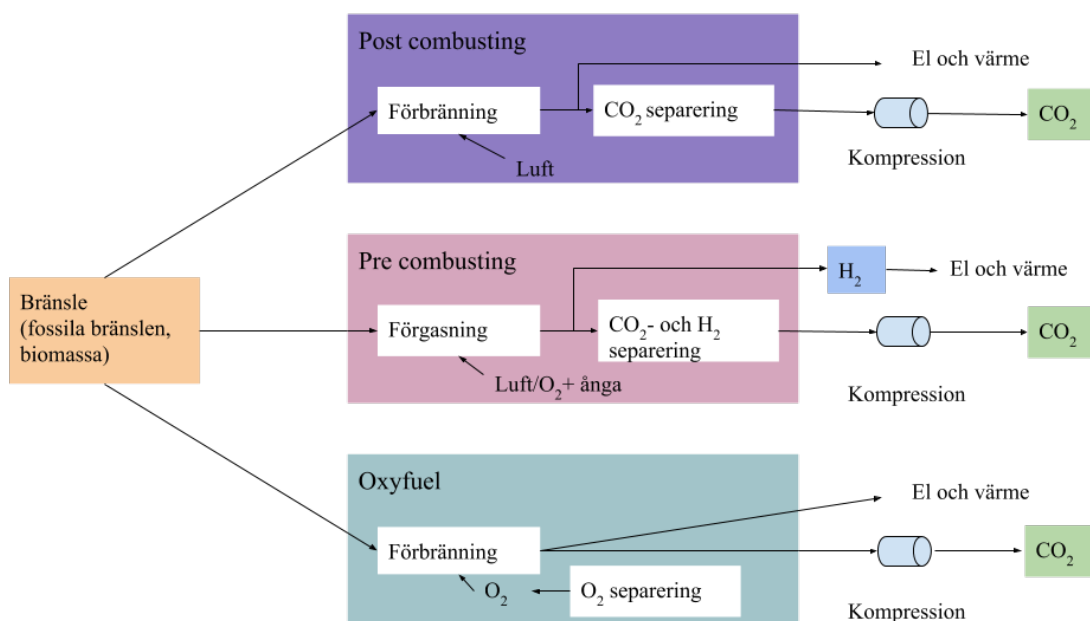
Pre combustion-system inleds med en reaktion mellan ett bränsle, vattenånga och luft eller syre. En blandning av huvudsakligen kolmonoxid (CO) och väte (H) bildas. Genom att låta kolmonoxiden reagera med vattenånga i ytterligare en reaktion bildas koldioxid och ytterligare väte. I nästa steg kan sedan väte och koldioxiden separeras och koncentreras. En biprodukt i pre combustion-system är vätgas (H₂) som kan användas till att producera energi och värme. Pre combustion-system är mer komplexa jämfört med post combustion-system. Systemet baseras på Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) där ett bränsle förgasas, den producerade syntesgasen förbränns sedan för energiproduktion. Koldioxiden separeras före förbränning av syntesgasen.

Avskiljningsteknik kan installeras i både nya och redan befintliga kraftvärmeverk. Studier har visat att investeringskostnaden per MW är betydligt lägre vid installation i ett redan befintligt kraftvärmeverk jämfört att bygga ett helt nytt kraftvärmeverk med avskiljningsanläggning. Det framgår dessutom att det inte finns några stora tekniska hinder för installation av post combustion-teknik på cirkulerande fluidiserade bäddpannor (CFB-panna) och kraftverk som drivs av pulveriserat kol (PC-kraftverk). (Dillon et al, 2013). Ett potentiellt hinder för implementering av avskiljningsteknik vid redan befintliga kraftverk är att infrastrukturen kräver utrymme, vilket kan vara en begränsad resurs. Resultaten i olika studier varierar mellan att avskiljningstekniken kräver 0,03 till 0,08 hektar per MW producerad el (IEA, 2016).

I oxyfuel-system förbränns bränslet tillsammans med enbart syre, vilket möjliggör en högre koldioxidhalt i rökgaserna. Reaktionen producerar en rökgas med en koldioxidkoncentration på cirka 80–90% (Kather & Kownatzki, 2011).

Avskiljningstekniker beräknas fånga in mellan 85–95% av den koldioxid som processas i en anläggning. I ett kraftvärmeverk minskar energiproduktionen med cirka 10–40% då anläggningen utrustas med system för koldioxidavskiljning. Den största delen av energiförlusten sker vid separation och kompressionen av koldioxid inför transporten. Sammanslaget kan ett kraftverk förväntas minska utsläppen av koldioxid, per kWh producerad el, med cirka 80–90%, med hjälp av CCS (IPCC, 2005). Det krävs stora investeringar för att föra vidare CCS-teknik från ett forsknings- och prototypstadium till en marknadsmässig bärkraftig teknik (Stigson, Hansson & Lind, 2012). I IPCC:s rapport om global uppvärmning från 2014 framgår det dock att kostnaden för de klimatåtgärder som krävs för att hålla jordens medeltemperatur under 2°C uppvärmning blir dubblad utan CCS. I hälften av scenarierna är CCS nödvändig för att begränsa uppvärmningen till 2°C (IPCC, 2014).

Figur 2 beskriver tre olika processer för hur koldioxid kan fångas in vid förbränning av ett bränsle. Samtliga avskiljningstekniker producerar el, värme samt koncentrerad koldioxid. Vid användning av pre combustion-teknik erhålls dessutom vätgas som kan användas i industriella processer eller till att utvinna energi och värme.



Figur 2 Schematisk bild över processen bakom tre olika avskiljnings-tekniker samt dess produkter. Anpassad efter (IPCCS, 2005).

2.4.1 Energiförlust och värmetillskott till följd av koldioxidavskiljning

Vid installation av avskiljnings-teknik vid ett kraftvärmeverk minskar verkningsgraden för energiproduktionen samtidigt som mängden spillvärme ökar. Den minskade elproduktionen måste ersättas från en extern källa och den ökade spillvärmens ersätter i sin tur värme från en annan källa i fjärrvärmennätet. Den totala miljöpåverkan från systemet kommer att variera beroende på vilka alternativa energi- och värmekällor som inkluderas i analysen. I en systemanalys av koleldade kraftvärmeverk beräknas verkningsgraden i energiproduktion minska med 12% samtidigt som verkningsgraden i värmeproduktionen ökar med 9%, vilket resulterar i en minskad totalverkningsgrad på 3%. Studien är utförd som en fallstudie vid Värtaverket i Stockholm och analysen baseras på data från den koleldade trycksatta virvelbäddspannan (Gode & Hagberg, 2008).

Vid en jämförelse av verkningsgrader mellan olika typer av värmepannor, (Liszka et al., 2013), framgår att den minskade energiproduktionen uppgår till cirka 15 % för en CFB-panna med avskiljnings-teknik av typen post-combustion, jämfört med motsvarande

värme­kraft­verk utan avskiljning. I en liknande analys, (Kärki et al, 2013), av ett 100 MW värme­kraft­verk framgår att elproduktionen blir cirka 14% lägre och att cirka 7% av värme­produktionen utvinns ur avskiljningsprocessen. Den totala verkningsgraden minskar i denna studie med 16% då samma mängd energi tillförs värme­pannan. Ett flertal faktorer samverkar till att verkningsgraden för CFB-pannor som eldas med biomassa och är utrustade med avskiljningsteknik är lägre jämfört med motsvarande koleldade CFB-­värme­pannor.

- Biomassa har ett lägre värmevärde jämfört med kol, vilket leder till lägre värme­produktion
- Den ordinarie verkningsgraden vid förbränning av biomassa är lägre än kol, vilket medför att den procentuella minskningen i verkningsgrad ökar

Den totala minskningen i elverkningsgrad i ett biomassaeldat CFB-kraftverk med installerad post combustionsteknik beräknas till 10% i en rapport av IEAGHG (IEAGHG, 2011).

2.5 BIO-ENERGY WITH CARBON CAPTURE AND STORAGE (BECCS)

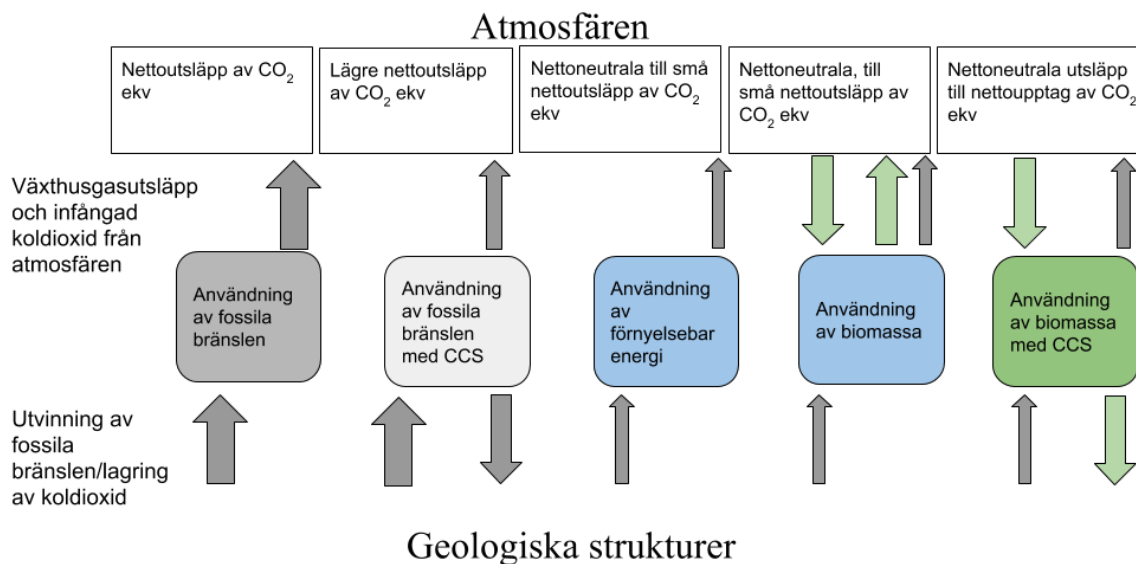
Om avskiljningsteknik används vid punktkällor där koldioxidutsläppen härstammar från biogena källor, till exempel pappersbruk och kraftvärmeverk som drivs på biomassa, kallas processen Bio-energy with carbon capture and storage (BECCS) (IEAGHG, 2011). Grödor och skog binder in koldioxid från atmosfären via fotosyntesen. När biomassan sedan förbränns eller processas eller på annat vis producerar koldioxid kan CCS-teknik utnyttjas för att fånga in den koldioxid som bildas och lagra den i geologiska strukturer. Denna process skapar ett nettoflöde av koldioxid från atmosfären till geologiska strukturer för långtidsförvaring och bidrar till att sänka koldioxidkoncentrationen i atmosfären (Williamson, 2016).

Den genomsnittliga koldioxidkoncentrationen i atmosfären under år 2016 uppgick till 403,3 ppm (WMO, 2017). Majoriteten av IPCC:s modellerade klimatscenarier som håller jordens medeltemperatur under 2°C jämfört med förindustriell nivå år 2100, förutsätter att koldioxidkoncentrationen i atmosfären når sin topp före år 2100 för att sedan minska till cirka 450 ppm. Den beräknade kumulativa koldioxidbudgeten som med 66% sannolikhet håller uppvärmningen under 2°C uppgår till 2900 Gt CO₂ då utsläppen beräknas från 1870 och 1000 Gt CO₂ då de beräknas från 2011 (IPCC, 2015). För att uppnå en reduktion av koldioxidkoncentrationen i atmosfären krävs en implementering av ett flertal klimatåtgärder med negativa nettoutsläpp av växthusgaser. De exempel som lyfts fram i IPCC:s klimatrapport från 2014 är en storskalig implementering av BECCS och skogsplantering (IPCC, 2014).

Den tekniska potentialen för BECCS är stor i ett globalt perspektiv. De negativa utsläppen bedöms ha potentialen att uppgå till 10 Gt CO₂ per år och energiproduktionen

från en fullskalig implementering av den tekniska potentialen beräknas bli 16 PWh per år (IEAGHG, 2011). Detta går att jämföra med de totala utsläppen från förbränning av bränslen, framförallt kol, olja och naturgas, vilka 2015 uppgick till cirka 32 Gt CO₂ (IEA, 2017). För att uppnå den tekniska potentialen för BECCS krävs dock att tillräckligt mycket hållbar biomassa kan produceras och för att säkerhetsställa att en storskalig implementering av BECCS är ekonomiskt försvarbart krävs en förändrad lagstiftning som erbjuder ekonomiska incitament för negativa utsläpp (IEAGHG, 2011). Ett annat stort potentiellt hinder för en storskalig implementering av BECCS är markanvändning. Odling av energigrödor och energiskog konkurrerar med matförsörjning och riskerar att påverka biodiversitet (Fuss et al., 2014).

Utsläpp av växthusgaser är direkt sammankopplat med val av bränsle. Samtliga processer använder en viss mängd fossila bränslen i bland annat uppbyggnad av infrastruktur, transport och avverkning. I Figur 3 representerar de grå pilarna flöden av fossila bränslen.



Figur 3 Schematisk bild över klimatpåverkan från användandet av olika bränslen och tekniker, anpassad efter IEAGHG (2011). Gråa pilar representerar fossila kolflöden och gröna pilar representerar biogena kolflöden.

2.6 BOKOL

Vid pyrolys av biomassa bildas biokol, bioolja och syntesgas. Processen bedrivs genom att utsätta biomassa för höga temperaturer under ett kort tidsintervall i en syrefri miljö (Mohan et al, 2016). Temperaturer på mellan 350 och 500 °C är vanliga vid pyrolys (Lehmann, Gaunt & Rondon, 2005). Fördelningen mellan produkterna varierar beroende på varaktigheten och temperaturen under processen, där låga temperaturer medför en ökad mängd biokol och högre temperaturer producerar större mängd syntesgas. Samtliga produkter har användningsområden. Bioolja kan bland annat

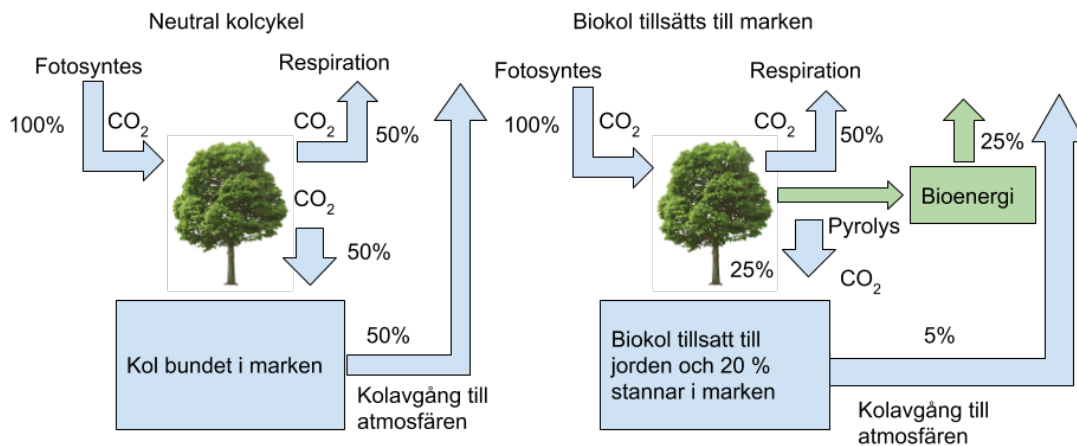
användas som bränsle i förbränningsturbiner. Syntesgas kan bland annat användas för energi-, metan- och vätgasproduktion (Maraseni, 2010). Biokol kan användas inom jordbruket för att öka produktiviteten i framförallt näringsfattiga jordar, minska urlakning av näringsämnen och öka jordens förmåga att hålla vatten. Biokolsproduktion är dessutom intressant ur ett klimatperspektiv eftersom biokol bryts ned långsamt i marken vilket gör det möjligt att lagra kolen under långa tidsperioder. Tekniken har framhållits som en metod för att binda in koldioxid från atmosfären och lagra den i marken. I ett globalt perspektiv har biokol beräknats ha potentialen att bidra med växthusgasupptag som motsvarar 12 % av de antropogena utsläppen utan att riskera påverkan på matproduktion och habitat (Woolf et al., 2010).

Cirka 50% av kolet som går in i pyrolysisprocessen bevaras i biokolet (Lehmann, Gaunt & Rondon, 2005). Pyrolysis av biomassa medför att en stor del av koldioxiden avgår till syntesgasen som förbränns för att driva processen. Detta bidrar till ett relativt stort utsläpp vid förbränningstillfället. Alternativet att applicera biomassan direkt på jordbruksmark leder dock till en betydligt snabbare nedbrytning och återgång av kolet till atmosfären jämfört med att applicera den stabilare biokolen (Lehmann, Gaunt & Rondon, 2005). Stabiliteten hos biokol i jorden är omdebatterat och studier från platser med olika markegenskaper och klimat indikerar att biokolets uppehållstid i marken varierar mellan några få år till tusentals år (Gurwick et al., 2013). Exempel på parametrar som kan påverka biokolets nedbrytning i marken är temperatur, fukthalt och bakteriekultur. Biokolets potential att lagra kol i jorden under tusentals år baseras ofta på historiska fynd från Amazonas där mycket gammalt träkol har observerats i marken. Det är dock möjligt att detta kol endast representerar en liten del av en mycket större mängd, vilket inte utesluter att en stor del av det ursprungliga kolet har mineraliserats (Gurwick et al., 2013).

Studier av förändrade växthusgasutsläpp till följd av tillsatt biokol uppvisar motsägande resultat, metan- och koldioxidutsläpp från marken kan både öka och minska efter tillsatt biokol (Mukherjee & Lal, 2014). Effekterna på lustgasavgång från jordbruksmark till följd av tillsatt biokol är fortfarande osäkra (Singh et al., 2009) och är beroende av egenskaper hos biokolet och jordbruksmarken (Liu et al., 2018). Studier visar dock att lustgasavgångarna från marken kan minska med 14–73% (Singh et al., 2009) och 32% (Liu et al., 2018). Minskade lustgasavgångar är beroende av att tillsätta rätt sorts biokol till rätt jordtyp (Mukherjee & Lal, 2014). I en labbstudie undersöktes effekten av biokol, med olika ursprung, på lustgasavgångar från svenska sandjordar. Resultaten visar att lustgasavgångarna minskade signifikant för prover med tillsatt biokol (Almers, 2009).

Figur 4 beskriver två alternativa scenarier. Det första representerar flödet av kol i ett ostört system, där koldioxid binds in via fotosyntesen och återförs till atmosfären via respiration och mineralisering i marken. Det andra scenariot inkluderar pyrolysis av biomassa och biokol tillsätts till marken. Det ostörda systemet är i balans och den

koldioxid som binds in via fotosyntesen är lika stor som den som avges via respiration och mineralisering i marken. I det andra scenariot binds cirka 20 % av koldioxiden i marken då biokol tillförs till jordbruksmark. Mängden koldioxid som binds in i marken är dock beroende av ett flertal parametrar och scenariot i Figur 4 representerar resultaten i en studie (Lehmann, Gaunt & Rondon, 2005).



Figur 4 Schematisk bild över kolflöden med eller utan användning av biokol, anpassad efter (Lehman, 2007)

2.7 LIVSCYKELANALYS (LCA)

Metoden livscykelanalys används för att uppskatta vilken miljöpåverkan och resursanvändning (energi och material) en vara, tjänst eller ett material ger upphov till under hela dess livscykel. Livscykelanalyser används för att uppskatta den totala miljöpåverkan, jämföra olika system med varandra samt jämföra miljöpåverkan från ett existerande system med ett nytt system.

Metoden används ofta i studier som behandlar bioenergi och koldioxidlagring. Det inbyggda, holistiska, perspektivet i LCA-studier gör det möjligt att uppskatta miljöpåverkan från hela livscykeln av stora komplexa system men medför också krav på förenklingar och antaganden. Uttrycket “från vaggan till graven” brukar användas då systemgränser för en LCA-studie definieras. Detta innebär att en produkts miljöpåverkan och resursanvändning beräknas från råvaruutvinning till avfallshantering. Den miljöpåverkan som produkten, tjänsten eller materialet ger upphov till beräknas i varje steg (Singh, Olsen & Pant, 2013).

LCA-processen är ISO-certifierad (14 040/44) och standardiserad (ISO, 2006). En typisk LCA består enligt ISO-standarderna av fyra faser. Inledningsvis definieras mål och omfattningen av studien, vilka miljöpåverkanskategorier studien undersöker samt den

enheten som miljöpåverkan beräknas emot (Finnveden et al., 2009). För att möjliggöra jämförelser mellan olika system krävs en gemensam enhet. I livscykelanalyser benämns denna enhet "funktionell enhet" och agerar som ett kvantitativt mått som knyter ihop det som går in i systemet och det som lämnar systemet (Singh, Olsen & Pant, 2013).

Den andra fasen kallas inventeringsanalys där data från olika delar av det undersökta systemet samlas in. Utsläppsdata och data över resursanvändning samlas in och anpassas till den funktionella enheten. Det tredje steget kallas miljöpåverkansbedömning där utsläpp och resursanvändning klassificeras. I den sista fasen tolkas resultaten och en känslighetsanalys kan utföras för att undersöka vilken påverkan olika processer inom systemet har på slutresultatet. Metoden tillåter dock en viss flexibilitet och resultaten varierar beroende på vilka systemgränser och antaganden som görs i studien (Finnveden et al., 2009).

Livscykelanalyser kan delas upp i bokföringsanalyser (ALCA) och konsekvensanalyser (CLCA). Syftet med en bokföringsanalys är vanligtvis att beräkna vilken miljöpåverkan en existerande produkt har under nuvarande förutsättningar. ALCA är användbar för att beräkna miljöpåverkan från samtliga delsteg i ett befintligt system och hitta "hot spots" där processer med stor miljöpåverkan uppmärksammas. Detta gör det möjligt att identifiera i vilka delar systemförbättringar har störst potential att minska miljöpåverkan.

I en ALCA beaktas inte indirekt miljöpåverkan från ett system. I en CLCA beräknas hur miljöpåverkan förändras till följd av politiska beslut och förändringar. Vid analyser av bioenergisystem jämförs ofta bioenergisystemet med ett referensscenario som baseras på fossila energisystem och producerar samma mängd energi. Biprodukter som uppstår i processen hanteras med systemexpansion där produkten ersätter samma produkt producerad i ett annat system. Konsekvensanalyser kan dessutom inkludera indirekt miljöpåverkan från förändrad markanvändning. Då skogsmark planeras att omvandlas till odlingsmark för till exempel energigrödor bör markanvändningens påverkan på kolförrådet beaktas i beräkningarna (Singh, Olsen & Pant, 2013).

2.8 TIDIGARE LCA STUDIER INOM OMRÅDET

Ett flertal tidigare livscykelanalyser har utförts med fokus på BECCS och Biokol. Det har dock visat sig vara svårt att hitta studier som explicit jämför dessa två klimatåtgärder med varandra. Resultaten i studierna kan dessutom förväntas variera kraftigt beroende på val av biomassa och geografiska förutsättningar, vilket gör det svårt att direkt översätta resultaten från tidigare studier till en svensk kontext. Ett urval av studier har dock granskats för att möjliggöra en jämförelse mellan resultaten och identifiera vilka parametrar som är avgörande för slutresultatet.

I en livscykelanalys av Dutta & Raghavan (2014) beräknas klimatpåverkan från biokolsproduktion av skogsrester och skörderester från majsodlingar i Quebec. Syftet

med studien var att undersöka restprodukters potential att ersätta biogrödor i biokolsproduktion och vilken miljöpåverkan och energianvändning detta medför. Beräkningar av utsläppsminskningar baserades på att fossilt bränsle ersätts med de biobränslen som uppkommer vid pyrolys och det kol som binds in i biokolet och kan lagras i marken. Resultaten visar att biokolsproduktion medför minskade utsläpp för båda typerna av biomassa, nettominskningen av utsläppen koldioxidekvivalenter var dock störst vid användning av skogsrester. Resultaten visar att biokolsproduktion av skörderester har en potential att vara ekonomiskt lönsamt, samtidigt är biokolsproduktion av skogsrester förknippat med nettokostnader. Majoriteten av de minskade utsläppen härstammar från kol som stabiliseras i biokol och det framgår att kolinlagring i marken med hjälp av biokol är att föredra framför förbränning av biokolet för energiproduktion ur ett klimatperspektiv.

I en livscykelanalys av Schakel et al (2014) jämförs hur klimatpåverkan från ett kraftverk med avskiljningsanläggning påverkas då biomasshalten i bränslet varierar. I resultaten framgår att det är möjligt att åstadkomma nettoupptag av växthusgaser och att en inblandning av 30% biomassa i ett kraftverk utrustat med en avskiljningsanläggning kan resultera i negativa CO₂-utsläpp på cirka 67–85 g/kWh el till kraftnätet. Studien undersöker också miljöpåverkanskategorierna humantoxicitet, icke-akvatisk ekotoxicitet och markanvändning. I samtliga fall ökar påverkan på dessa kategorier mellan 20–200% vid inblandning av 30% biomassa och vid användning av avskiljningsteknik. Studien inkluderar en känslighetsanalys där det framgår att de faktorer med störst påverkan på resultaten är kraftverkets effektivitet, försörjningskedjan för stenkol och biomassa, allokering av markanvändning, samt antaganden kring hur klimatpåverkan från biomassa bör beräknas.

3 METOD

I detta avsnitt presenteras metoden för genomförandet av studien samt studiens systemgränser. I varje del presenteras de parametrar som används vid beräkning av klimatpåverkan samt antaganden och förenklingar.

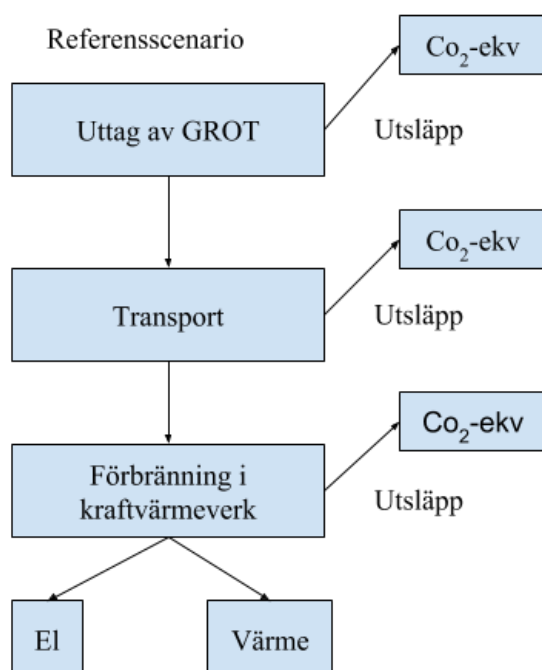
3.1 SCENARIOBESKRIVNING

Referensscenariot i denna studie utgår från ett CFB-kraftvärmeverk som drivs av 100% biomassa. Ett flödesschema över referensscenariot presenteras i Figur 5. Resultaten från referensscenariot jämförs sedan med två andra ytterligare scenarier. I scenario 1 utrustas kraftvärmeverket med en avskiljningsanläggning av typen post combustion och klimatpåverkan från transport av koldioxid inkluderas. I scenario 2 används GROT till att producera biokol. Transport av biokol och avsättning för restprodukter i pyrolysisprocessen inkluderas. Kraftvärmeverket antas ligga i Stockholm. I scenario 1 och scenario 2 medför energikrävande processer ett underskott i elproduktion och en

förändrad fjärrvärmeproduktion. Den förändrade energiproduktionen beräknas ersättas med marginalet och marginalfjärrvärme.

3.1.1 Referensscenariot

Referensscenariot behandlar avverkning av GROT och transport till befintligt kraftvärmeverk på ett genomsnittligt avstånd på 50 km från avverkningsplatsen baserat på data från Gode et al (2011). Biogena utsläpp, från förbränning i kraftvärmeverket och förändrad markkol och fossila utsläppen från transport och avverkning inkluderas i referensscenariot.

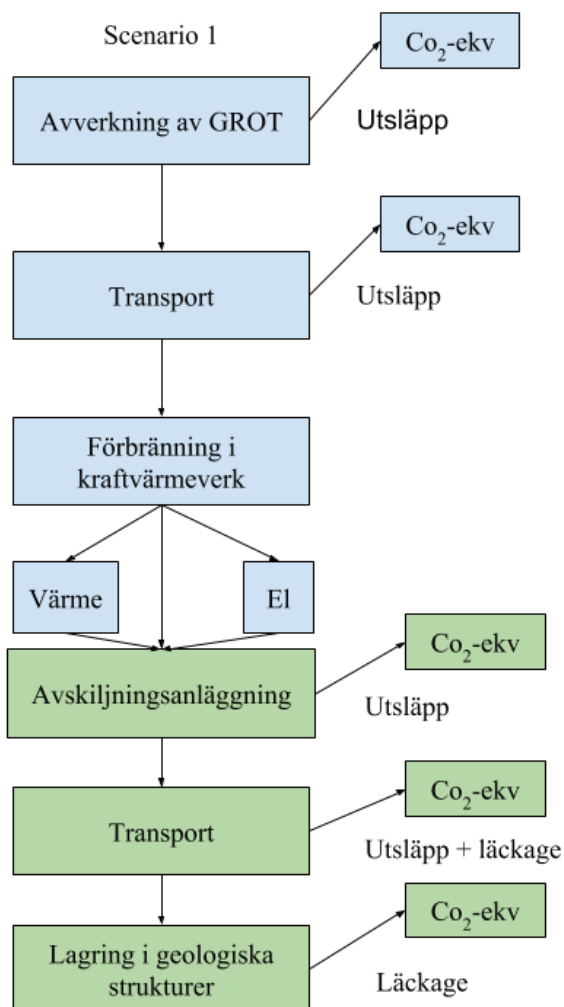


Figur 5 Figuren illustrerar studiens referensscenario med förbränning av GROT i ett kraftvärmeverk.

3.1.2 Scenario 1

Scenario 1 behandlar avverkning och transport av GROT till ett befintligt kraftvärmeverk identiskt med referensscenariot. GROT förbränns sedan i kraftvärmeverket där koldioxiden avskiljs och transporteras till förvaring i geologiska strukturer. Ett flödesschema över processerna i scenario 1 presenteras i Figur 6. Avskiljningsprocessen medför en minskad elproduktion samt en ökad värmeproduktion. Klimatpåverkan från den förändrade produktionen beräknas genom att ersätta den minskade elproduktionen med el från ett externt kraftverk samt genom antagandet att den ökade värmeproduktionen ersätter fjärrvärmeproduktion från en annan anläggning. Klimatpåverkan från bränsleförbrukning vid transport av koldioxid till lagringsplatsen

samt byggande och avfallshantering av fraktfartyget beräknas. Denna klimatpåverkan adderas till utsläppen från förändrad markkol, avverkning och transport av GROT. Kraftvärmeverket antas ligga i Stockholm och lagringen antas ske vid lagringsanläggningen Sleipner utanför Norges kust.

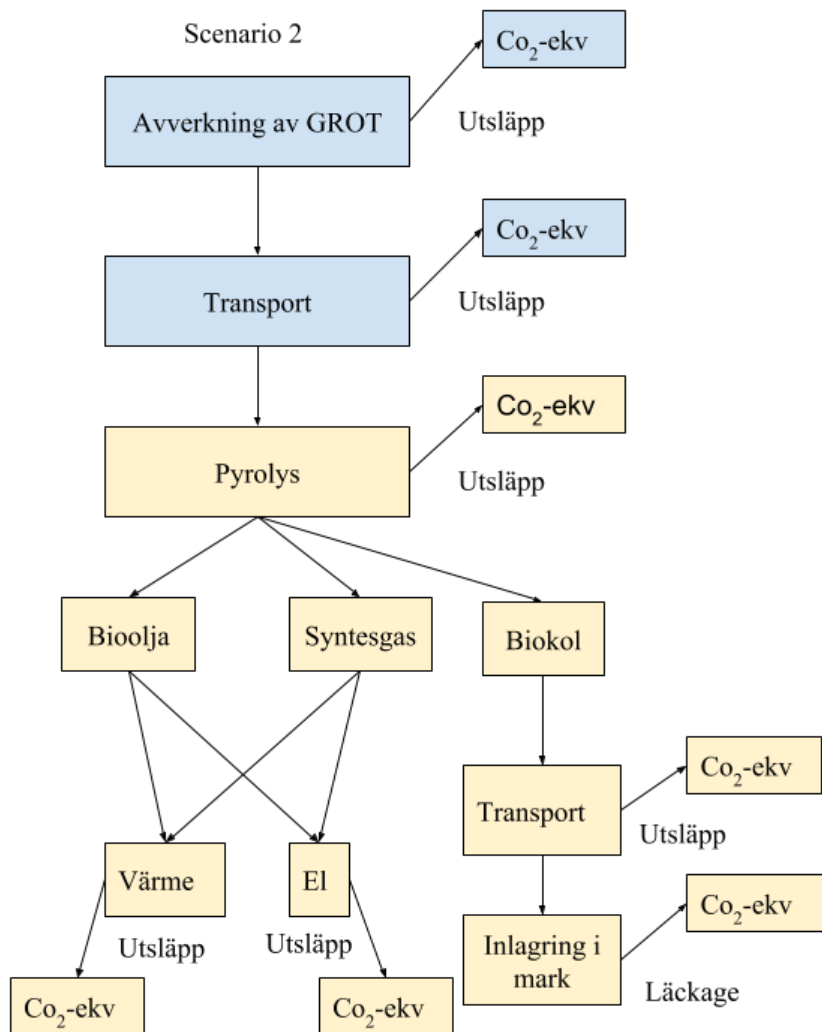


Figur 6 Figuren illustrerar scenario 1 med förbränning av GROT i ett kraftvärmeverk utrustat med en avskiljningsanläggning och transport till lagring.

3.1.3 Scenario 2

I scenario 2 sker avverkning och transport av GROT till kraftvärmeverket identiskt med referensscenariot och scenario 1. Ett flödesschema över processerna i scenario 2 presenteras i Figur 7. Vid kraftvärmeverket framställs biokol genom pyrolys av GROT. Biprodukterna syntesgas och bioolja används till att producera el och fjärrvärme och biokolen transporteras till jordbruksmarker. Utsläpp av växthusgaser sker vid avverkning, förändrad markkolsinlagring, transport, pyrolys, förbränning av biprodukter samt från marken efter att biokol har applicerats. Kraftvärmeverket antas ligga i

Stockholm och biokolets antas spridas till jordbruksmarker på ett medelavstånd på 150 km.



Figur 7 Figuren illustrerar scenario 2 där GROT omvandlas till biokol i anslutning till ett kraftvärmeverk.

3.2 SYSTEMGRÄNSER

Studien utfördes som en CLCA där klimatpåverkan från utnyttjande av skogsbränslet GROT analyseras. Klimatpåverkan beräknas om till Global Warming Potential (GWP) och beräknas över en tidshorisont på 100 år. Den funktionella enheten är ett ton GROT torrs substans. GROT anses allmänt vara en restprodukt i skogsindustrin och dess livscykel antas börja vid skotning och bortförsl av materialet från hygget. I en LCA-studie av Koornneef et al (2008), av ett koleldat kraftverk med post combustion-teknik beräknades klimatpåverkan från uppförandet av, pipelines, avskiljning-, injektions- och kompressionsanläggning, uppgå till 0,3% av den totala klimatpåverkan. Klimatpåverkan från uppförande och nedmontering av infrastrukturen som krävs för CCS bedöms

generellt ha ett minimalt bidrag till den totala klimatpåverkan (IEAGHG, 2010). Klimatpåverkan från uppförande samt nedmontering och avfallshantering av avskiljnings- och pyrolysanläggningar inkluderas därför inte i denna studien. Kraftvärmeverk och tillhörande infrastruktur antas finnas på plats och byggande samt nedmontering av dessa inkluderas inte.

Transporten av GROT till kraftvärmeverken samt bortförel av biokol och koncentrerad koldioxid till lagringsanläggningarna samt tillhörande infrastruktur inkluderas i studien. Resultaten beräknas över ett tidsspänn på 90 år, vilket representerar en rotationstid för skog i Mellansverige. Studien utförs på beståndsnivå där klimatpåverkan från uttag och utnyttjande av GROT från ett bestånd beräknas över en rotationstid. Klimatpåverkan från spridning av biokol på jordbruksmark och återtransport av aska inkluderas inte i studien. Läckage från förvarad koldioxid i geologiska strukturer antas vara försumbar och biokolets uppehållstid i marken beräknas enligt ekvation 3 i kapitel 4.4.1.

Eventuellt förändrad lustgas-, metan- och koldioxidsavgång från jordbruksmarker till följd av tillsatt biokol inkluderas inte i resultaten i denna studie. Osäkerheterna kring storleken hos förändringen samt variationer till följd av biokolstyp och jordbruksmark medför att resultaten förväntas bli alltför osäkra. En uppskattning av förändrad lustgasavgång har dock utförts i syfte att utvärdera den potentiella effekten på resultatet.

3.3 KLIMATPÅVERKANSBEDÖMNING

Vid en analys av ett systems klimatpåverkan analyseras utsläpp av både koldioxid och andra växthusgaser. Genom att använda metoden GWP är det möjligt att beräkna den totala klimatpåverkan från olika växthusgaser under en tidsperiod, vanligtvis 100 år, med den gemensamma enheten. Enheten som används är CO₂-ekvivalenter som representerar GWP-faktorn för koldioxid. Både metan (CH₄) och lustgas (N₂O) är mer potenta växthusgaser jämfört med koldioxid och deras klimatpåverkan beräknas om till CO₂-ekvivalenter. GWP₁₀₀-faktorerna för N₂O och CH₄ presenteras i Tabell 1. Biogen metan beräknas vara en 28 gånger starkare växthusgas jämfört med koldioxid och fossil metan beräknas vara 30 gånger starkare jämfört med koldioxid. Skillnaden mellan biogen och fossila metan uppstår då metan oxideras till koldioxid och fortsätter att bidra till växthuseffekten. Den koldioxid som uppstår då biogen metan oxideras antas vara klimatneutral. Lustgas beräknas vara 265 gånger kraftfullare jämfört med koldioxid. Standardenheten för klimatpåverkan är vanligtvis koldioxidekvivalenter. Tidsperioden mellan ett utsläpp och upptag av koldioxiden samt hur detta beräknas påverkar också resultaten (Myhre & Shindell, 2013). Denna studie beaktar inte tidsdynamiska aspekter av utsläpp och klimatpåverkan.

Tabell 1 GWP-faktorer som har använts för att bedöma total klimatpåverkan i denna studie. GWP₁₀₀-faktorerna representerar växthusgasens klimatpåverkan över en tidshorisont på 100 år. De använda GWP-faktorerna tar inte hänsyn till feedbackmekanismer

Växthusgaser	GWP ₁₀₀ -faktor	Referens
Koldioxid (CO ₂)	1	(Myhre & Shindell, 2013)
Biogen Metan (CH ₄)	28	(Myhre & Shindell, 2013)
Fossil metan (CH ₄)	30	(Myhre & Shindell, 2013)
Lustgas (N ₂ O)	265	(Myhre & Shindell, 2013)

3.4 HANTERING AV BIPRODUKTER OCH ALLOKERINGSMETODER

De biprodukter som uppkommer vid pyrolys av biomassa antas användas i kraftvärmeverket vid produktion av el och värme. Den producerade elen och värmen i scenario- 1 och 2 jämförs med referensscenariot. Skillnaden som uppstår kompenseras genom systemexpansion med el och värme från separat el- och fjärrvärmeproduktion. Den klimatpåverkan som uppkommer vid produktion av ersättningsenergin adderas till resultatet i respektive scenario.

3.5 FALLBESKRIVNING

Resultaten varierar kraftigt beroende av klimatpåverkan från den ersättande energin. Detta har motiverat indelningen i olika fall inom respektive scenario. Resultaten är uppdelade i kategorier utifrån källan till den ersättande elen och fjärrvärmens. I Tabell 7 presenteras de olika fallen.

Tabell 7 Beskrivning av de olika fallen i scenario 1 och scenario 2

Fall	Förklaring
BCCS-SFmix	Resultat från Scenario 1 med BECCS. Ersättande el kommer från stenkol och ersättande fjärrvärme från fjärrvärmemix
BCCS-SFmar	Resultat från Scenario 1 med BECCS. Ersättande el kommer från stenkol och ersättande fjärrvärme från marginalfjärrvärme
BCCS-NFmix	Resultat från Scenario 1 med BECCS. Ersättande el kommer från Naturgas och ersättande fjärrvärme från fjärrvärmemix
BCCS-NFmar	Resultat från Scenario 1 med BECCS. Ersättande el kommer från naturgas och ersättande fjärrvärme från marginalfjärrvärme
BCCS-RFmix	Resultat från Scenario 1 med BECCS. Ersättande el kommer från referenskraftvärmeverket och ersättande fjärrvärme från fjärrvärmemix
BCCS-RFmar	Resultat från Scenario 1 med BECCS. Ersättande el kommer från referenskraftvärmeverket och ersättande fjärrvärme från marginalfjärrvärme
BIO-SFmix	Resultat från Scenario 2 med biokol. Ersättande el kommer från stenkol och ersättande fjärrvärme från fjärrvärmemix
BIO-SFmar	Resultat från Scenario 2 med biokol. Ersättande el kommer från stenkol och ersättande fjärrvärme från marginalfjärrvärme
BIO-NFmix	Resultat från Scenario 2 med biokol. Ersättande el kommer från naturgas och ersättande fjärrvärme från fjärrvärmemix
BIO-NFmar	Resultat från Scenario 2 med biokol. Ersättande el kommer från naturgas och ersättande fjärrvärme från marginalfjärrvärme
BIO-RFmix	Resultat från Scenario 2 med biokol. Ersättande el kommer från referenskraftvärmeverket och ersättande fjärrvärme från fjärrvärmemix
BIO-RFmar	Resultat från Scenario 2 med biokol, Ersättande el från referenskraftvärmeverket och ersättande fjärrvärme från marginalfjärrvärme

4 DATAINSAMLING

I detta avsnitt presenteras antaganden och data som används i beräkningarna. Metoden för beräkning av klimatpåverkan i respektive scenario samt klimatpåverkan från den ersättande energin beskrivs.

4.1 TRANSPORT OCH INFRASTRUKTUR

Samtliga scenarier i studien inkluderar transporter. Biokol transporteras till jordbruksmark och den infångade koldioxiden skeppas till lagringsanläggningar. Dessa transporter medför utsläpp av växthusgaser och påverkar slutresultatet. Biokolet antas transporteras med lastbil från kraftvärmeverk till jordbruksmarken. Kraftvärmeverken antas ligga nära en hamn och transporten av koncentrerad koldioxid till hamnen inkluderas inte i studien. Vid hamnen transporteras koncentrerad och komprimerad koldioxid via fraktfartyg till lagringsanläggningen Sleipner utanför Norges kust. Mängden koldioxid som fångas in och kräver transport är dimensionerad efter de totala CO₂-utsläppen från Värtaverket i Stockholm. År 2016 uppgick de totala utsläppen till cirka 1 290 000 ton per år, vilket motsvarar cirka 3500 ton/dag (Naturvårdsverket, 2018b). Transporten antas utföras av ett gasfraktfartyg med en lagringskapacitet på 30 000 ton koldioxid. Hastigheten hos båten antas påverka resultatet och beräkningar utförs utifrån hastigheterna 15 och 18 knop.

4.2 REFERENSSCENARIOT

4.2.1 Naturlig nedbrytning av GROT

GROT-uttag minskar kolinlagringen i skogsmarker. Storleken på förlusterna påverkas bland annat av klimat. Då kvarlämnad GROT succesivt bryts ned minskar skillnaden i inlagrad markkol mellan ett system med GROT-uttag och ett system där GROT lämnas kvar. Efter cirka 220 år beräknas cirka 1% av kolet som ingick i materialet från början ligga kvar i marken som svårnedbrytbart material (Lindholm, Berg & Hansson, 2010). I denna studie beräknas minskad kolinlagring efter 90 år, vilket motsvarar en rotationstid för skog i Mellansverige. Skillnaden i lagrad markkol över en rotationstid antas uppgå till 0,92 ton C per hektar. Cirka 70 % av uppkommen GROT antas omhändertas och transporteras till kraftvärmeverket, vilket uppgår till 35,3 ton TS per hektar (Hammar, 2017).

4.2.2 Skotning och transport av GROT till kraftvärmeverk

Terrängtransport av GROT vid ett hygge kallas skotning. Systemet börjar vid skotning av GROT från hygget. Bränsleförbrukning vid skörd, transport och förädling av materialet uppgår till 21–49 kJ per MJ GROT enligt en livscykelanalys av Lindholm, Berg & Hansson (2010) av GROT som används till kraftvärme. Resultaten varierar beroende på transportsträckan mellan kraftvärmeverket och avverkningsplatsen samt om GROT flisas vid avverkningsplatsen eller transporteras i buntar (Lindholm, Berg & Hansson, 2010). I Miljöfaktaboken Gode et al (2011) bedöms bränsleförbrukningen öka

med 1 g/MJ bränsle för varje 100 km ökat transportavstånd. Värmevärdet för GROT antas vara 19,2 MJ/kg TS (Lindholm, Berg & Hansson, 2010). Detta värde används även i denna studie. Utsläpp från produktion av GROT-bränsle och transport till kraftvärmeverket presenteras i Tabell 2.

Tabell 2 Utsläpp från avverkning och distribution av GROT-baserat bränsle till kraftvärmeverket. Den totala klimatpåverkan beräknas utifrån GWP-faktorerna i Tabell 1. Emissionerna inkluderar inte en förändrad mängd markkol.

Utsläpp till luft	g/MJ GROT	Referens
Fossil koldioxid (CO ₂)	1,9	(Gode et al., 2011)
Metan (CH ₄)	$1,4 \cdot 10^{-4}$	(Gode et al., 2011)
Lustgas (N ₂ O)	$6,4 \cdot 10^{-5}$	(Gode et al., 2011)

Utsläppen i Tabell 2 baseras på avverkning av GROT i södra Sverige med flisning vid väggkanten och direkttransport till kraftvärmeverk. Klimatpåverkan från transporten av GROT till kraftvärmeverket beräknas utifrån ett avstånd på 50 km (Gode et al, 2011).

4.2.3 Verkningsgrader och utsläpp vid förbränning

För att möjliggöra jämförelser mellan verkningsgraden hos olika kraftvärmeverk med och utan rökgaskondensering används det lägre värmevärdet (LHV), som inkluderar den teoretiska värmemängden som kan utvinnas från bränslet utan att vattenånga som bildas kondenserar. Vid beräkning av verkningsgraden för ett kraftvärmeverk med rökgaskondensering kan istället det högre värmevärdet (HHV) användas. Verkningsgrader över 100% är möjliga då beräkningar av verkningsgraden utförs med det lägre värmevärdet för kraftvärmeverk som är utrustade med rökgaskondensering (Lehtikangas, 1999; Bäcker & Tapia, 2018).

Beräkningarna i denna studie baseras på verkningsgrader för kraftvärmeverket KVV8 i Värtahamnen. Kraftvärmeverket är utrustat med en cirkulerande fluidiserad bädd-panna som eldar GROT och andra skogsrester. Vid en tillförd effekt på 380 MW produceras 310 MW värme, där 90 MW kommer från rökgaskondensering, och 130 MW el. Detta resulterar i en total energiproduktion på 440 MW. Verkningsgraden för värmeproduktion med rökgaskondensering är 82% och för elproduktion 34%. Den totala verkningsgraden uppgår till 116 % (Fortum, 2017). Det effektiva värmevärdet uttrycks i MJ/kg-torrsubstans. GROT-bränsle består dock till cirka 47,9 % av fukt och bränslets fukthalt påverkar mängden energi som kan utvinnas (Strömberg & Svärd, 2012).

Den teoretiska energin som kan utvinnas ur ett fuktigt material kallas det fuktspecifika värmevärdet och beräknas enligt ekvation 1.

$$W_{eff} = W_a - \left(2,45 * \frac{Fukthalt}{100-Fukthalt}\right) \quad (1) \quad (\text{Lehtikangas, 1999})$$

W_a = effektivt värmevärde för torra material (MJ/kg bränsle)

W_{eff} = Effektivt värmevärde för fuktigt material (MJ/kg bränsle)

Förbränning av GROT i kraftvärmeverk medför utsläpp av metan (CH_4), lustgas (N_2O) och biogen koldioxid. Metan bildas vid ofullständig förbränning av ett bränsle. I denna studie används emissionsfaktorn 11 kg CH_4 /TJ bränsle. Lustgas bildas vid oxidation av kväve, bundet i bränslet. Emissionsfaktorn för lustgas sätts till 6 kg N_2O /TJ bränsle. Utsläppen av koldioxid påverkas av bränslets kolmängd, fukthalt och effektiva värmevärde. De biogena utsläppen av koldioxid beräknas enligt ekvation 2 (Paulrud et al., 2010).

$$EFCO_2 = \left(\frac{MCO_2}{MC}\right) * \left(\frac{C_{GROT}}{W_{eff}}\right) \quad (2) \quad (\text{Paulrud et al, 2010})$$

$EFCO_2$ = Emissionsfaktor (kg CO_2 /MJ-GROT)

MCO_2 = Molmassa för koldioxid (g/mol)

MC = Molmassa för kol (g/mol)

C_{GROT} = Kolhalten i GROT (massfraktion vid angiven fukthalt)

W_{eff} = Effektiva värmevärdet hos GROT (MJ/kg TS)

I Tabell 3 presenteras de parametrar och konstanter som används vid beräkningarna med ekvation 2.

Tabell 3 Parametrar som ingår i beräkningarna av emissionsfaktorn för koldioxid.

	Molmassa g/mol	% av CO_2 - molmassa	Referens
Kol (C)	12	27,27	
Syre (O)	16	36,36	
Koldioxid CO_2	44	100	
Fukthalt GROT vikt-%	47,9		(Strömberg & Svärd, 2012)
Kolhalt GROT % av massa	53,1		(Strömberg & Svärd, 2012)
Askhalt GROT % av massa	2,7		(Strömberg & Svärd, 2012)
Fuktspecifikt värmevärde GROT (MJ/kg bränsle)	16,9		

4.3 SCENARIO 1 (BECCS)

4.3.1 Val av kraftvärmeverk och avskiljningsteknik

Kraftvärmeverket i studien antas vara utrustat med en CFB-panna och avskiljningsanläggning av typen post combustion. Kraftvärmeverk av denna typ beräknas ha potentialen att avskilja 90% av koldioxidutsläppen (IEAGHG, 2011). Detta resultat ligger till grund för beräkningarna i denna studie.

4.3.2 Energiförlust som följd av koldioxidavskiljning

Grundantagandet i denna studie är att ett befintligt kraftvärmeverk utrustas med en avskiljningsanläggning med post combustion-teknik. Den totala elverkningsgraden förväntas minska med 10% baserat på det generella riktvärdet från IEAGHG (IEAGHG, 2011). Den ökade värmeproduktionen uppskattas till 9% (Gode & Hagberg, 2008). Eftersom den förändrade verkningsgraden för el och värmeproduktion varierar mellan olika studier inkluderas dessa parametrar i studiens känslighetsanalys för att undersöka inverkan på slutresultatet.

Avståndet mellan Stockholm och Sleipner beräknades till 857 nautiska mil (NM) med hjälp av programmet MARINE TRAFFIC och beräkningarna är baserade på data från verkliga skeppsrutter. I Figur 8 är positionerna för lagringsanläggningen och referenskraftvärmeverket markerade på en karta över norra Europa.



Figur 8 Figuren består av en satellitbild över norra Europa där positionen hos Värtaverket och Sleipner är markerade. Anpassad efter (Satellite_image_of_Northern_Europe, Wikimedia commons, 2018).

Koldioxidavskiljning sker kontinuerligt och kräver en mellanlagringsanläggning där infångad koldioxid kan lagras i väntan på transport. Klimatpåverkan beräknas från drift av avskiljningsanläggning, kompressionsanläggning och mellanlagringsanläggning. Det är möjligt att transportera koncentrerad koldioxid med samma fartyg som används för att transportera gasol. Den komprimerade koldioxiden måste hållas vid låga temperaturer för att inte övergå till gasfas. Mellanlagringsbehållarna och lagringsbehållare på gasfraktfartyget är inte perfekt isolerade vilket medför ett koldioxidläckage (boil-off). Det är teoretiskt möjligt att fånga in koldioxiden som avgår från förvaringen för att sedan komprimera och återföra koldioxiden till tanken. Det anses dock vara lämpligare att börja med att förbättra förvaringstankarnas isolering. Fartyget drivs av dieselmotorer som förbränner tjockolja (IEAGHG, 2004). Klimatpåverkan från råvaruutvinning och tillverkning av gasfraktfartyget har beräknats utifrån data för ett fraktfartyg med en kapacitet att frakta 51 500 ton varor (Spielmann, Donn & Bauer, 2007). I en annan studie av Ringvold (2017) analyseras ett fraktfartygs livscykel. Resultaten i studien visar att klimatpåverkan från tillverkningen och avfallshantering endast utgör cirka 5% av utsläppen från ett fraktfartygs hela livscykel. I Tabell 4 presenteras de parametrar som använts vid beräkning av klimatpåverkan från CO₂-transport med fraktfartyg mellan referenskraftvärmeverket och lagringsanläggningen.

Tabell 4 Parametrar som har använts vid beräkning av klimatpåverkan från CO₂-transport. De gastankfartyg som lämpar sig för transport av komprimerad koldioxid beräknas ha en medelhastighet på mellan 15 och 18 knop (IEAGHG, 2004).

	Stockholm → Sleipner	Referens
Transportavstånd (NM) ¹	857	Marine Traffic
Transportavstånd (Km)	1587	Marine Traffic
Lastningstid (h)	8	IEAGHG 2004
Tid från angörande till påbörjad lastning (h)	4	IEA GHG 2004
Läckage vid mellanlagring (% av lagrad CO ₂ /dag)	0,2	IEAGHG 2004
Läckage från fartygstransport (% av lagrad CO ₂ /dag)	0,2	IEAGHG 2004
Utsläpp av CO ₂ från fartygsmotor vid hastigheten 18 knop (ton CO ₂ /dag)	201	IEAGHG 2004
Utsläpp av CO ₂ från fartygsmotor vid hastigheten 15 knop (ton CO ₂ /dag)	107	IEAGHG 2004
Klimatpåverkan från byggandet och avfallshantering av gasfraktfartyget (ton CO ₂ -ekvivalenter)	11 340	Eco-invent 2007

4.3.3 Koldioxidläckage vid slutförvaring

Risken för läckage från väl utvalda och övervakade lagringsanläggningar bedöms vara mycket liten. Den största risken för läckage föreligger under själva injektionsprocessen (Havercroft & Macrory, 2014). Läckage från injektion och från lagrad koldioxid försummas i denna studie.

¹ 1 NM = 1,852 km (Nationalencyklopedin, 2018)

4.4 SCENARIO 2 (Biokol)

4.4.1 Biokolets uppehållstid i mark

Vid en analys av tidigare LCA-studier framgår det att pyrolys av skogsrester har störst potential att bidra till negativa nettoutsläpp jämfört med andra bränslen. (Lehman & Joseph, 2015). I studier som undersöker effekterna av tillsatt biokol till jordbruksmark i tempererade miljöer, som liknar de svenska, framgår att skörden inte påverkas nämnvärt (Tammeorg et al., 2013). Beräkningarna i scenario 2 fokuserar därför på biokolets förmåga att binda kol i marken och de positiva effekterna av en ökad skörd inkluderas inte i livscykelanalysen. I en Reviewartikel som analyserar 311 kollegialt granskade artiklar om biokol, framgår det att resultaten i olika studier visar att uppehållstid i marken varierar mellan åtta år och 4000 år. Biokolets potential som klimatåtgärd är helt beroende av hur länge kolet kan bindas i marken (Gurwick et al, 2013). I en annan studie som innefattar en metaanalys av 124 observationer från 28 studier analyseras stabila (C^{13}) och radioaktiva (C^{14}) kolisotoper för att bestämma biokolets uppehållstid i marken. Det lättnedbrytbara kolet beräknas brytas ned med en takt på 0,0093% per dag. Den svårnedbrytbara delen, som utgör 97 % av det bundna kolet i biokol, beräknas brytas ned med 0,0018% per år. Beräkningarna av biokolets uppehållstid beräknas med hjälp av ekvation 3, utifrån dessa nedbrytningshastigheter (Wang, Xiong & Kuzyakov, 2016).

$$y = a * e^{(-k_1*t)} + b * e^{(-k_2*t)} \quad (3) \quad (\text{Wang, Xiong \& Kuzyakov, 2016})$$

Där y representerar mängden biokol som återstår vid tiden t . Parametrarna a och b representerar fördelningen mellan det svårnedbrytbara och instabila biokolet. Konstanterna k_1 och k_2 representerar nedbrytningshastigheten för det stabila och instabila biokolet. En känslighetsanalys över hur stor inverkan biokolets uppehållstid i mark påverkar slutresultatet inkluderas dessutom i studien.

4.4.2 Produktfördelning, energi- och värmeproduktion vid pyrolys

Beräkningarna i denna studie baseras på produktion av biokol med långsam pyrolys av trä vid cirka 500°C. I en tidigare LCA studie av ett system med långsam pyrolys, framgår att 35 % av den ingående biomassan omvandlas till biokol, 35% blir syntesgas och 30% omvandlas till bioolja (Roberts et al., 2009). Produktfördelningen varierar dock beroende på valet av bränsle, pyrolystemperatur och längd på pyrolysen. (Yongwoon et al, 2013). Mängden producerad biokol antas vara 32%, andelen bioolja 53% och den producerade syntesgasen antas utgöra 11%. Av den ingående biomassa beräknas 4% gå förlorad i processen (Salman, 2014). Värmevärdet för bioolja antas vara 2,0 MJ/kg och för syntesgasen 8,2 MJ/kg. Data är baserad på en labbstudie av långsam pyrolys av träflis vid 350 C° (Crombie & Mašek, 2015). Verkningsgraderna vid el och värmeproduktion av biprodukterna baseras på modellerade värden i en översiktsartikel

(Brownsort, 2009). Verkningsgraden vid elproduktion uppgår till 22,4 % och vid värmeproduktion till 27,1 %. Den totala verkningsgraden beräknas till 49,5 %. Den energimängd som går förlorad för driva processen samt andra förluster i processen beräknas uppgå till 13 %. Kolmängden i biokol kan variera mellan cirka 70–90 %. (Brownsort, 2009). I denna studie antas 50% av den ingående kolmängden bindas i biokolet.

4.4.3 Transport av biokol till jordbruksmark

Klimatpåverkan från transport av biokol till jordbruksmark avgörs av avståndet till marker som efterfrågar biokol. Beräkningarna utgår från att biokolet transporteras från Värtaverket i Stockholm, till jordbruksmarker i Sverige. Klimatpåverkan från transport med lastbil beräknas med verktyget NTM-calc. Medelavståndet antas vara 150 km. Lastbilen antas väga cirka 40 ton lastad, drivas av B5-diesel och vara euro-4 klassad. Varje transportsträcka beräknas transportera 30 ton biokol.

4.4.4 Lustgasavgång från jordbruksmark

Medelvärde för lustgasavgång från nordeuropeiska och amerikanska jordbruksmarken vid odling av spannmål och raps, uppgår till cirka 3 kg N₂O-N/ hektar och år. I en svensk studie på en sandjord i Halland uppmättes lustgasavgången till cirka 2 kg N₂O-N/ hektar och år vid odling av stråsåd (Kasimir Klemedtsson, 2009). Detta värde används för att uppskatta lustgasavgångarna i denna studie. I beräkningarna antas lustgasavgången minska med 32 % till följd av tillsatt biokol och tillsatsen av biokol antas vara 40 ton/ hektar (Liu et al., 2018). Kolmängden i biokol antas vara 80% (Brownsort, 2009). Effekterna av en förändrad lustgasavgång inkluderas inte i resultaten för klimatpåverkan. Den uppskattade effekten används dock i diskussionen för att bedöma konsekvenserna av att inte inkludera förändrade lustgasavgångar.

4.5 KOMPENSATION VID FÖRÄNDRAD ENERGIPRODUKTION

Den minskade energiproduktionen uppstår till följd av att energibehovet från avskiljningsprocessen och andra energikrävande åtgärder och antas ersättas av långsiktig marginalet. Marginaletens ursprung bedöms ha en påverkan på slutresultatet och beräkningarna utförs med marginalet från både stenkol och naturgas. Dessa energikällor används för att representera marginalet i dagsläget. Beräkningarna utförs även utifrån antagandet att klimatpåverkan från den minskade elproduktionen ersätts av en ökad produktion vid samma, eller likartade, kraftvärmeverk för att representera en framtida elmix med lägre klimatpåverkan. Resultaten från referensscenariot används för att uppskatta miljöpåverkan från elproduktionen i detta kraftvärmeverk.

Elhandeln sker över stora geografiska områden med olika energikällor och det är svårt att bedöma vilken källa den ersättande elen har. Klimatpåverkan från elproduktion med

stenkol baseras på LCA-studie som inkluderar hela livscykeln från råvaruutvinning till användning. Livscykelanalysen är utförd på ett finländskt kolkraftverk med stenkolk från Polen. Klimatpåverkan från framställning och användande av naturgas är hämtat från en studie, (Weisser, 2007), som jämför klimatpåverkan från elproduktion i olika kraftverk i Europa, Nordamerika och Japan. Medelvärden av de kumulativa utsläppen från hela livscykeln av produktionen har använts. Emissionsfaktorerna från de olika energikällorna presenteras i Tabell 5.

Tabell 5 Tabellen presenterar emissionsfaktorer för energiproduktion med stenkolk och naturgas.

Stenkolk	g/kWh	Referens
Koldioxid (CO ₂)	866	(Sokka, Koskela & Seppälä, 2005)
Metan (CH ₄)	1,74	(Sokka, Koskela & Seppälä, 2005)
Lustgas (N ₂ O)	1,7 * 10 ⁻⁴	(Sokka, Koskela & Seppälä, 2005)
Naturgas		
Koldioxidekvivalenter (CO ₂ -ekv)	610	(Weisser, 2007)

Vid beräkning av klimatpåverkan från marginalfjärrvärme krävs detaljerad kunskap om det utvalda fjärrvärmenätets varierande bränsleförbrukning under året. Det saknas en standard för hur dessa beräkningar bör utföras (Axelsson et al, 2010). Energimyndigheten har dock tagit fram ett antal typnät som representerar bränslemixen, på marginalen, för svenska fjärrvärmenät. I denna studie används den vanligast förekommande marginalfjärrvärmen i Sverige som representeras av ett typnät BIO - fjärrvärme. Bränslemixen på marginalen består av 89% biobränsle, 10 % olja och 1 % el. Elen antas produceras av stenkolk. Oljan och elen antas enbart användas till fjärrvärmeproduktion. Biobränslet antas användas i ett kraftvärmeverk (Engström, Gode & Axelsson, 2009). Emissionsfaktorerna för marginalfjärrvärmen har beräknats med alternativproduktionsmetoden enligt (Gode et al., 2011).

$$\alpha = \frac{\frac{E_{h,tot}}{\eta_H}}{\frac{E_{h,tot}}{\eta_H} + \frac{E_{el,tot}}{\eta_P}} \quad (4) \quad \text{Gode et al., (2011)}$$

α = Allokeringfaktor för bränslet

$E_{h,tot}$ = Fjärrvärme från kraftvärmeverket

$E_{el,tot}$ = Elproduktion i kraftvärmeverket

η_H = Verkningsgraden för separat värmeproduktion i ett alternativt värmeverk

η_P = Verkningsgraden för separat elproduktion i ett alternativt kraftverk

Verkningsgraderna för energiproduktion i ett kraftvärmeverk hämtas från kraftvärmeverket i referensscenariot. Verkningsgraden i alternativa värme- och kraftverk presenteras i Tabell 6.

Klimatpåverkan från ersatt marginalfjärrvärme beräknas enligt (Engström, Gode & Axelsson, 2009).

$$E = f v \sum_{i=1}^n \frac{\chi_i \cdot EF_i}{\eta_{omv,i}} \cdot \alpha_i \quad (5) \quad \text{Engström, Gode \& Axelsson, (2009)}$$

E = Emissioner (g)

$f v$ = Fjärrvärmeanvändning (kWh)

$\eta_{omv,i}$ = Verkningsgraden vid omvandling i kraftvärmeverket för bränslet i

χ_i = Andelen av bränsle i i marginalfjärrvärmen

EF_i = Emissionsfaktorn för bränsle i (g/kWh_{bränsle})

α_i = Allokeringsfaktorn för bränsle i (g/kWh_{bränsle})

Emissionsfaktorer vid elproduktion med stenkolk i Tabell 5 används även vid beräkningarna av emissionsfaktorn för marginalfjärrvärme. Övriga parametrar som används vid beräkning av emissionerna från marginalfjärrvärme återfinns i Tabell 6.

Tabell 6 Tabellen presenterar emissionsfaktorer för värmeproduktion med bibränsle och Olja samt övriga parametrar som ingår i beräkningarna av ekvation- 3 och 4.

Biobränsle	Referens
Koldioxid (CO ₂) (g/kWh _{bränsle})	11 (Engström, Gode & Axelsson, 2009)
Metan (CH ₄) (g/kWh _{bränsle})	0,018 (Engström, Gode & Axelsson, 2009)
Lustgas (N ₂ O) (g/kWh _{bränsle})	0,018 (Engström, Gode & Axelsson, 2009)
Koldioxidekvivalenter (CO ₂ -ekv) (g/kWh _{bränsle})	16,3
Alternativverkningsgrad vid separat värmeproduktion (%)	86 (Energiföretagen, 2017)
Alternativverkningsgrad vid separat elproduktion (%)	33 (Energiföretagen, 2017)
Verkningsgrad för värmeproduktion i kraftvärmeverket (%)	82 (Fortum, 2007)
Verkningsgrad för elproduktion i kraftvärmeverket (%)	34 (Fortum, 2007)
Olja	Referens
Koldioxid (CO ₂) (g/kWh _{bränsle})	291 (Engström, Gode & Axelsson, 2009)
Metan (CH ₄) (g/kWh _{bränsle})	0,016 (Engström, Gode & Axelsson, 2009)
Lustgas (N ₂ O) (g/kWh _{bränsle})	0,002 (Engström, Gode & Axelsson, 2009)
Koldioxidekvivalenter (CO ₂ -ekv) (g/kWh _{bränsle})	292
Verkningsgrad för värmeproduktion i värmeverket (%)	89 (Engström, Gode & Axelsson, 2009)

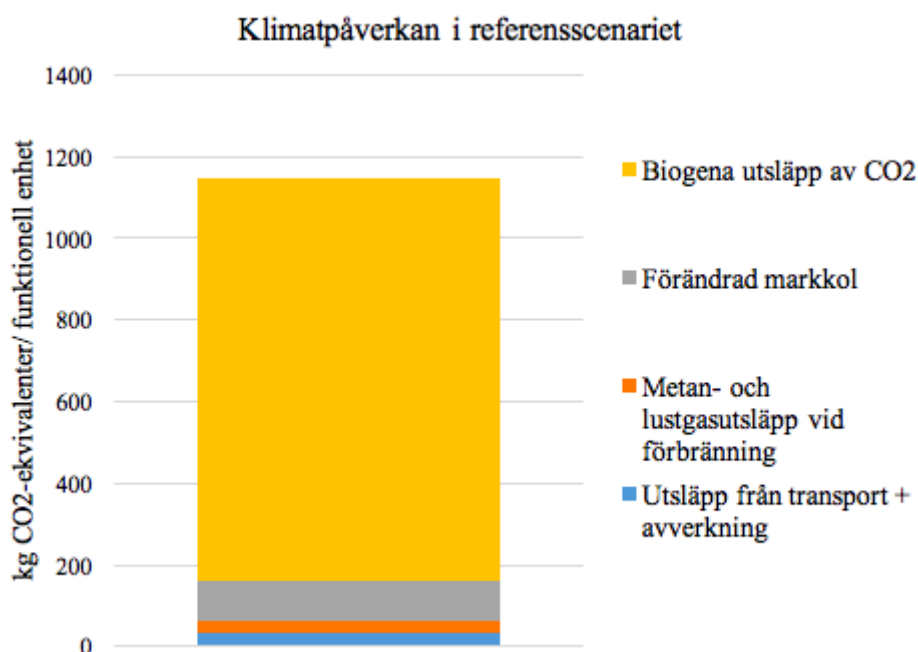
Klimatpåverkan beräknas också för fjärrvärmemixen från Fortums fjärrvärmelanläggningar i Stockholm. Utsläpp vid kraftvärmeverket, indirekta utsläpp från inköpt energi samt odling och transport av bränslen uppgick år 2016 till 70,2 g CO₂/kWh fjärrvärme (Fortum, 2016).

5 RESULTAT

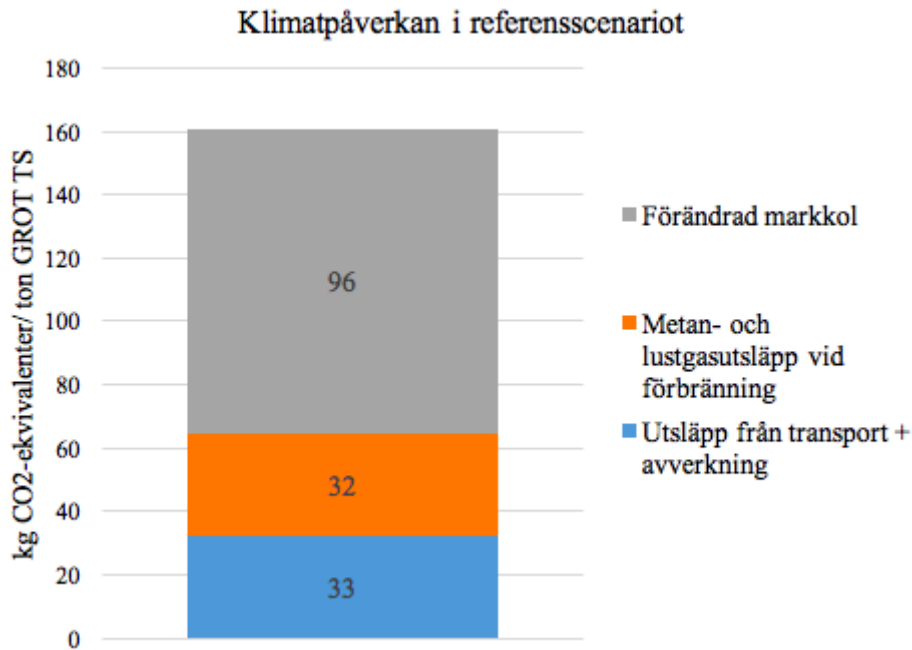
I detta avsnitt presenteras resultaten för livscykelanalysen. Klimatpåverkan från olika processer i scenarierna och nettoutsläppta CO₂-ekvivalenter presenteras i figurer. Avsnittet innehåller även en känslighetsanalys.

5.1 REFERENSSCENARIOT

Det fuktspecifika värmevärdet beräknas enligt ekvation 1 till 16,95 MJ/kg TS. Vid insättning i ekvation 2 blir emissionsfaktor för biogen koldioxid 985,2 kg CO₂/ton GROT TS. Den förändrade markkolsinlagringen, till följd av GROT-uttag, beräknas till 95,7 kg CO₂/ton GROT TS. Utsläppen från skotning och transport av GROT till kraftvärmeverket beräknas till 32,6 kg CO₂-ekvivalenter/ ton GROT TS. Energiproduktionen från förbränning av GROT i referensscenariot beräknas till 3,86 MWh värme/funktionell enhet och 1,60 MWh el/ton GROT TS. Resultaten i Figur 9 illustrerar klimatpåverkan från olika delar av systemet i referensscenariot, där de biogena utsläppen av CO₂ vid kraftvärmeverket står för den största delen. I figur 10 framgår att förändrad markkol står för den största delen av klimatpåverkan i referensscenariot, vid sidan av de biogena utsläppen vid förbränning.



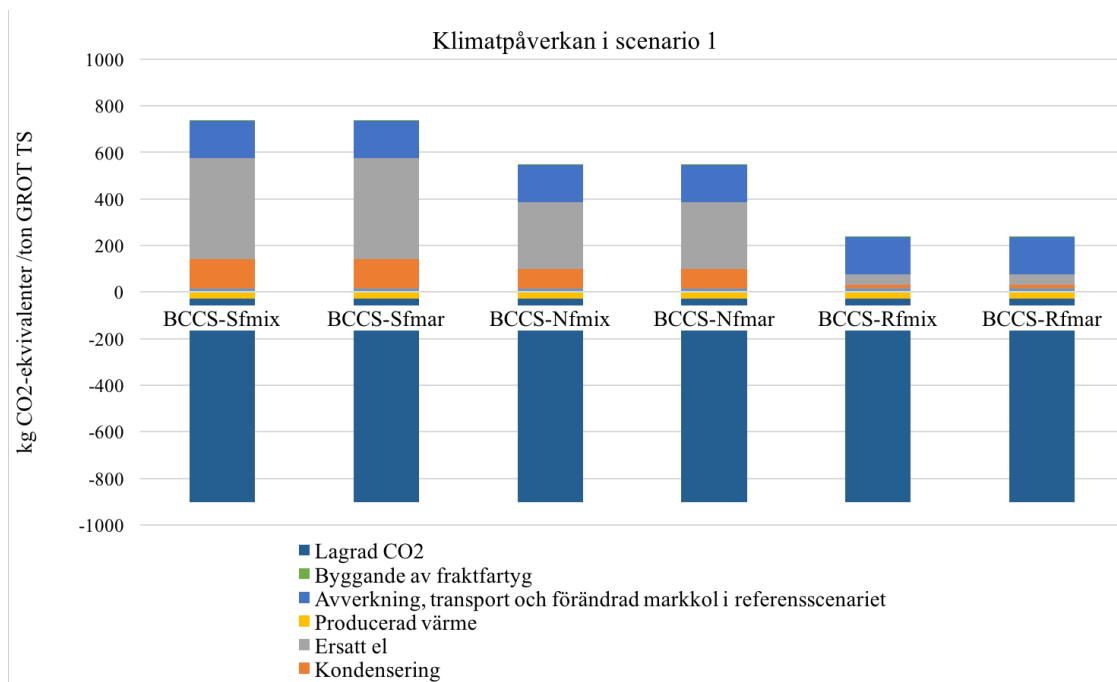
Figur 9 Den totala klimatpåverkan från de olika processerna i referensscenariot.



Figur 10 Klimatpåverkan från olika delar av systemet i referensscenariot.

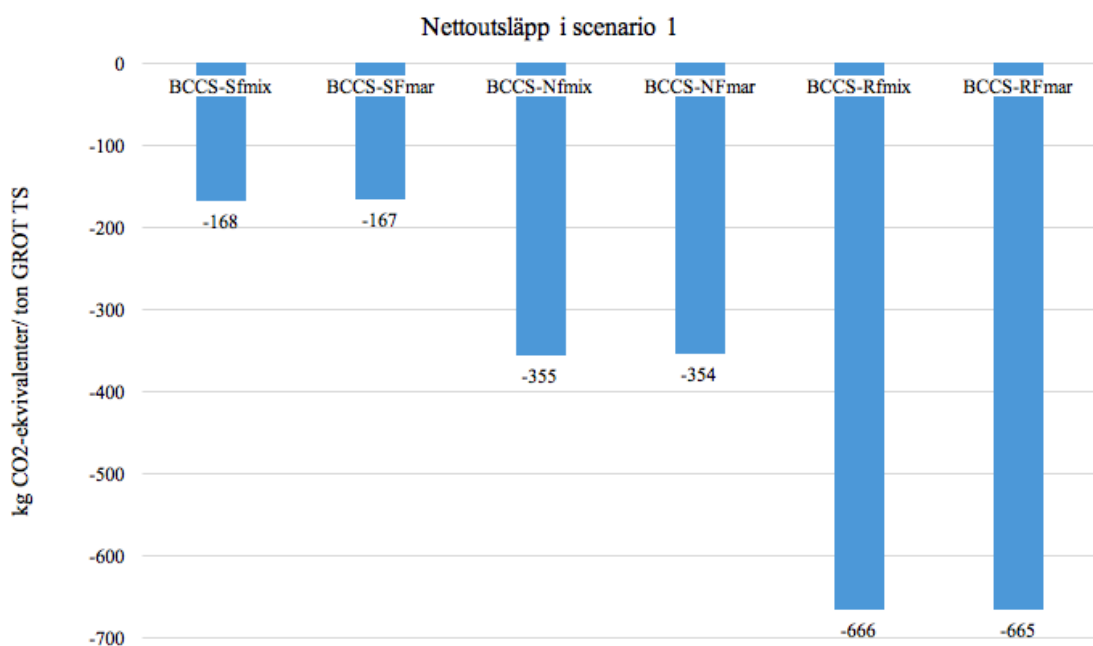
5.2 SCENARIO 1 (BECCS)

De biogena CO₂-utsläppen vid förbränning av GROT som inte avskiljs beräknas till 98,5 kg CO₂/ ton GROT TS. Efter avskiljning kvarstår 887 kg CO₂/funktionell enhet. Energiproduktionen från förbränning av GROT och koldioxidavskiljning i scenario 1 beräknas till 4,28 MWh värme/funktionell enhet och 1,30 MWh el/funktionell enhet. Det framgår i Figur 11 att klimatpåverkan från den ersättande elen har en avgörande betydelse för resultatet. Denna kategori står för majoriteten av klimatpåverkan, i fallen då stenkol används för att ersätta den minskade elproduktionen. Vid energiproduktion i referenskraftvärmeverket härstammar den största delen av klimatpåverkan från förändrad markkol och framställning, förbränning och transport av GROT till kraftvärmeverket. Resultaten är beräknade utifrån att gasfraktfartyget går i 15 knop.



Figur 11 Klimatpåverkan för de olika fallen i scenario 1. Förkortningen **BCCS** används för resultaten i scenario 1 med BECCS, **S** står för ersättande el från stenkol, **N** står för ersättande el från naturgas, **fmix** står för ersättande fjärrvärme från fjärrvärmemix och **fmar** står för ersättande fjärrvärme från marginalfjärrvärme.

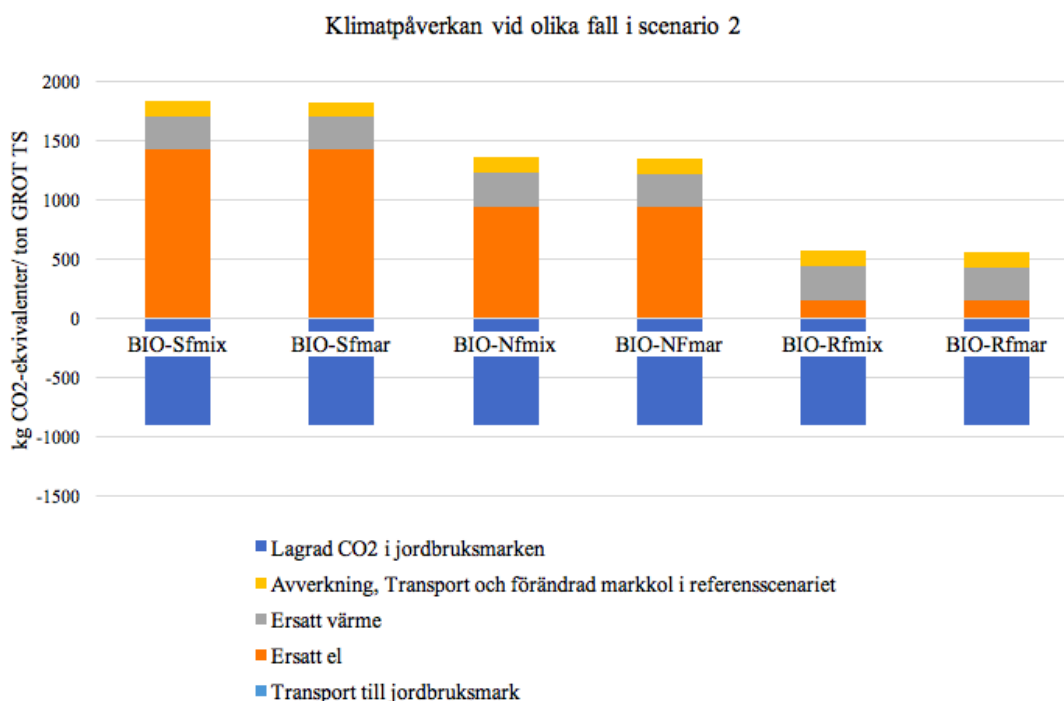
Resultaten för nettoutsläppta CO₂-ekvivalenter presenteras i Figur 12. Samtliga fall resulterar i nettonegativa utsläpp men det framgår också att resultaten är starkt beroende av vilken energikälla som används för att ersätta den minskade elproduktionen. Resultatet påverkas också av vilken fjärrvärmekälla som ersätts av den ökade värmeproduktionen i scenario 1. De största nettonegativa utsläppen uppnås i fallet BCCS-RFmix och beräknas till -666 kg CO₂-ekvivalenter per funktionell enhet.



Figur 12 Nettoutsläpp för de olika fallen i scenario 1, uttryckt i kg CO₂-ekvivalenter per ton GROT TS.

5.3 SCENARIO 2 (BIOKOL)

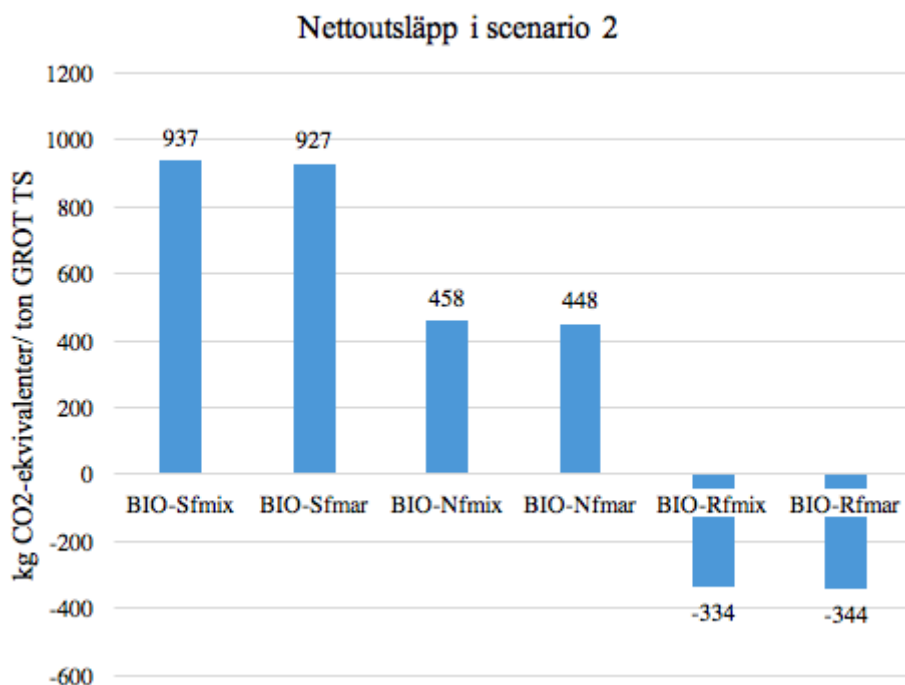
Energiproduktionen vid förbränning av syntesgas och bioolja i scenario 2 beräknas till 0,314 MWh värme/funktionell enhet och 0,260 MWh el/funktionell enhet. Det framgår av resultaten i Figur 13 att klimatpåverkan från den ersättande elen har en avgörande betydelse för resultatet. Denna kategori står för majoriteten av klimatpåverkan i fallen då stenkol används för att ersätta den minskade elproduktionen. Då den minskade energiproduktionen ersätts med el och värme från referenskraftvärmeverket uppstår den största delen av klimatpåverkan från förändrad markkol, vid framtagning av GROT och transport av GROT till kraftvärmeverket.



Figur 13 Klimatpåverkan från olika delar av systemet för fallen i scenario 2. Förkortningen **BIO** används för resultaten i scenario 2 med biokol tillsatt till jordbruksmark.

Resultaten för nettoutsläppta CO₂-ekvivalenter i scenario 2 presenteras i Figur 14. I de fall då den minskade energiproduktionen ersätts av energiproduktion med stenkol och naturgas överstiger utsläppen av växthusgaser den lagrade koldioxiden i biokolet. Detta innebär att nettoeffekten blir utsläpp av växthusgaser. Resultaten uppvisar samma mönster som i scenario 1 och är starkt beroende av energikällan till den ersättande elproduktionen. Resultatet påverkas också av vilken fjärrvärme som ersätter den minskade produktionen. De största nettonegativa utsläppen koldioxid uppnås i fallet då,

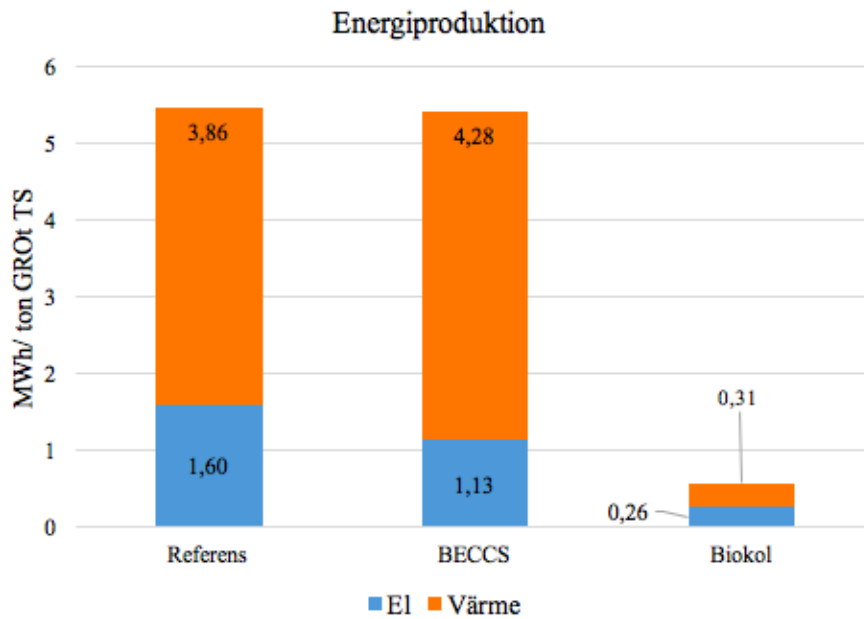
den ersättande elen kommer från referenskraftvärmeverket och den ersättande fjärrvärmens kommer från marginalfjärrvärme. Nettoutsläppen i detta fall uppgår till -344 kg CO₂-ekvivalenter per funktionell enhet.



Figur 14 Nettoutsläpp i de olika fallen i scenario 1, uttryckt i kg CO₂-ekvivalenter per ton GROT TS.

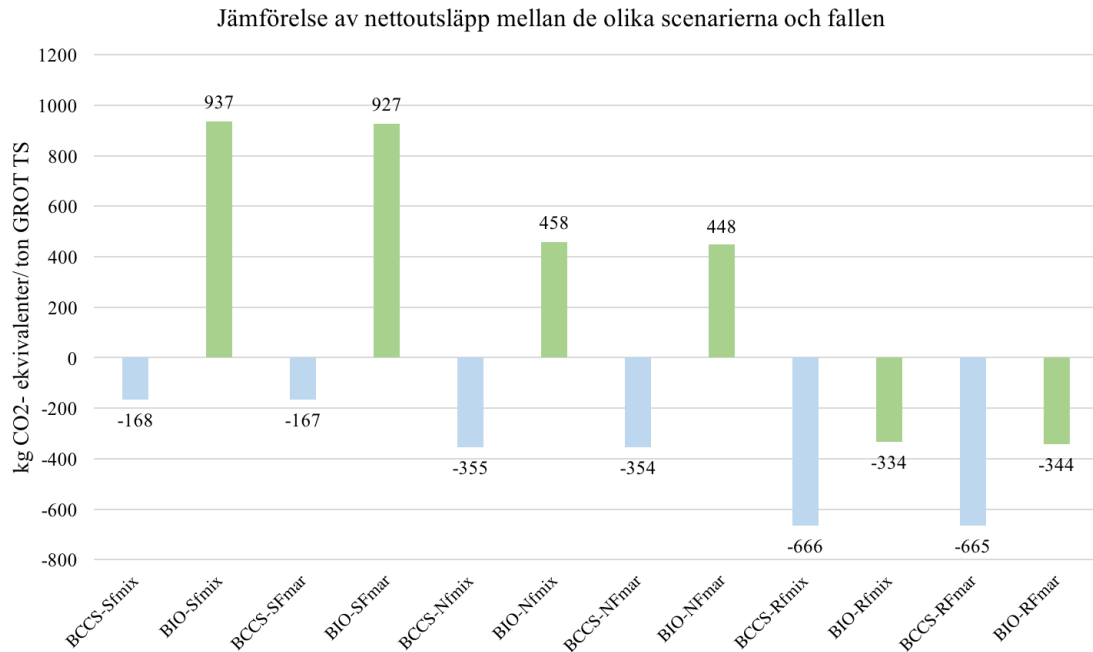
5.4 JÄMFÖRANDE AVSNITT

Energiproduktionen i scenarierna presenteras i Figur 15. I referensscenariot uppgår den totala energiproduktionen till 5,46 MWh/funktionell enhet och i scenario 1 till 5,41 MWh/funktionell enhet. Den totala energiproduktionen i referensscenariot och scenario 1 är relativt lika. Fördelningen mellan el och värmeproduktion varierar dock något. Elproduktionen är högst i referensscenariot och den största värmeproduktionen återfinns i scenario 1. Energiproduktionen är betydligt lägre i scenario 2 jämfört med övriga scenarier. Den totala energiproduktionen från förbränning av biprodukterna bioolja och syntesgas uppgår till 0,57 MWh per funktionell enhet.



Figur 15 Energiproduktionen i de olika scenarierna fördelat på el- och värmeproduktion.

I Figur 16 presenteras resultaten för nettoutsläppt CO₂-ekvivalenter i scenario 1 och 2 för samtliga fall. Nettoutsläppen är mindre i scenario 1 jämfört med scenario 2 i samtliga fall. Skillnaden mellan resultaten i scenario 1 och scenario 2 är stora för samtliga fall, där den ersättande energin härstammar från fossila bränslen. Resultaten för nettoutsläppta CO₂-ekvivalenterna är negativa i samtliga fall då elproduktion ersätts med el från referenskraftvärmeverket. De största nettonegativa utsläppen återfinns i fallet med BECCS och då den ersättande elen kommer från referenskraftvärmeverket och den ersättande fjärrvärmerna kommer från fjärrvärmemixen. Nettoutsläppen i detta fall uppgår till -666 kg CO₂-ekvivalenter/ ton GROT TS.



Figur 16 Sammanställning över resultaten för nettoutsläppta CO₂-ekvivalenter i de olika scenarierna och fallen uttryckt i kg CO₂-ekvivalenter per ton GROT TS. Resultaten från scenario 2 är grönmarkerade.

5.5 KÄNSLIGHETSANALYS

Känslighetsanalysen har utförts genom att variera ett antal viktiga parametrar i studien. Parametrarna varieras en i taget där det övriga systemet lämnas oförändrade. Parametrarnas påverkan på resultatet för utsläppta CO₂-ekvivalenter kan avslöja vilka delar av systemet som är särskilt känsliga för förändringar och osäkerheter. De parametrar som analyseras är biokolets uppehållstid i marken, verkningsgraderna vid förbränning av syntesgas och bioolja i scenario 2 och effektiviteten hos avskiljningsanläggningen i scenario 1. Parametrarna varieras med procentenheter.

Resultatens känslighet varierar mellan de olika scenarierna och fallen. En förändrad verkningsgrad har stor påverkan på resultaten i fallen då den minskade elproduktionen ersätts med el från stenkol och naturgas. De största procentuella variationerna i scenario 2 uppkommer då verkningsgraden minskar med 15 % i fallet då den ersättande elen kommer från naturgas och den ersättande fjärrvärmekommer från marginalfjärrvärme. I scenario 1 uppkommer den största procentuella variationen då avskiljningseffekten varieras i fallen med ersättande el från stenkol. Resultaten av känslighetsanalysen presenteras i Tabell 8 och Tabell 9.

Tabell 8 Resultaten från känslighetsanalyser av biokolets lagringsförmåga, verkningsgraden för energiproduktion från biprodukterna efter pyrolys.

Biokol	BIO-SFmix	BIO-SFmar	BIO-NFmix	BIO-NFmar	BIO-RFmix	BIO-RFmar
Inget biokol bryts ned i jordbruksmarken (%)						
Förändring i utsläppta CO ₂ -ekvivalenter (kg/ton GROT TS)	-29	-29	-29	-29	-29	-29
Förändring (%)	-3,1 %	-3,1 %	-6,3 %	-6,4%	-8,6 %	-8,4 %
15%-enheter mindre lagrad biokol.						
Förändring i utsläppta CO ₂ -ekvivalenter (kg/ton GROT TS)	136	136	136	136	136	136
Förändring (%)	15 %	15 %	30 %	30 %	41 %	40 %
Verkningsgraden för el och värme ökar med 15%-enheter						
Förändring i utsläppta CO ₂ -ekvivalenter (kg/ton GROT TS)	-172	-171	-118	-118	-30	-29
Förändring (%)	-18 %	-18 %	-26 %	-26 %	-8,9 %	-8,5 %
Verkningsgraden för el och värme minskar med 15%-enheter						
Förändring i utsläppta CO ₂ -ekvivalenter (kg/ton GROT TS)	172	171	118	118	30	29
Förändring (%)	18 %	18 %	26 %	26 %	8,9 %	8,5 %

Tabell 9 Resultaten från känslighetsanalyser av avskiljningsgraden hos avskiljningsanläggningen.

BECCS	BCCS-SFmix	BCCS-SFmar	BCCS-NFmix	BCCS-NFmar	BCCS-Rfmix	BCCS-RFmar
100 %						
koldioxidavskiljning						
Förändring i utsläppta CO ₂ -ekvivalenter (kg/ton GROT TS)	-97	-97	-97	-97	-97	-97
Förändring (%)	-58 %	-58 %	-27 %	-27 %	-15 %	-15 %
80 %						
koldioxidavskiljning						
Förändring i utsläppta CO ₂ -ekvivalenter (kg/ton GROT TS)	97	97	97	97	97	97
Förändring (%)	58 %	58 %	27 %	27 %	15 %	15 %

6 DISKUSSION

6.1 REFERENSSCENARIOT

Antaganden kring förändrad markkol är avgörande för klimatpåverkan i referensscenariot. I miljöfaktaboken, (Gode et al, 2011), inkluderas inte förändrad markkol eftersom resultaten antas variera mycket beroende av beräkningsmetoder och vald tidshorisont. Resultaten i Figur 9 visar dock att förändrad markkol till följd av GROT-uttag är den största källan till klimatpåverkan, vid sidan av de biogena koldioxidutsläppen från förbränning i kraftvärmeverket. Det förändrade markkolet har biogent ursprung men har inte brutits ned under en rotationstid och kan därför jämföras med fossila utsläpp vid beräkning av klimatpåverkan under en rotationstid. Fukthalt och värmevärden varierar mellan GROT från olika källor och verkningsgraden varierar mellan olika kraftvärmeverk. Detta medför att resultaten för energiproduktionen och de biogena utsläppen från förbränning i kraftvärmeverket i figur 9 och 15 kan variera för andra GROT-typer och kraftvärmeverk.

6.2 SCENARIO 1 (BECCS)

Den avskilda och kondenserade koldioxiden kan transporteras med både rörledningar och fraktfartyg. Transport med fraktfartyg antas vara fördelaktigt givet förhållandena i studien. Det är dock möjligt att bygga rörledningar från kraftvärmeverket till lagringsanläggningen, vilket kan resultera i en annan klimatpåverkan från transporter.

Beräkningarna av klimatpåverkan från koldioxidtransport med fraktfartygen är baserat på ett hypotetiskt scenario där antalet fraktfartyg och rutter har dimensionerats efter ett kraftvärmeverk i Stockholm. Det är dock möjligt att transporten samordnas mellan flera olika punktkällor och att storleken på fraktfartyget, samt antalet rutter ser annorlunda ut vid implementering av systemet. Resultaten i Figur 11 visar att klimatpåverkan från byggandet av fraktfartyget och bränsleförbrukningen vid transport utgör en mycket liten del av den totala klimatpåverkan i scenario 1. Detta gör resultaten mindre känsliga för antaganden kring transportsystem.

Fartygstransporter medför påverkan på fler miljöpåverkanskategorier än klimatpåverkan, bland annat försurning, utsläpp av luftföroreningar och bildande av marknära ozon (Endersen et al., 2003). Denna miljöpåverkan inkluderas inte i studien och framgår inte i resultaten. En studie visar att installation av CCS vid ett kraftvärmeverk medför en ökning av miljöpåverkan inom samtliga undersökta miljöpåverkanskategorier, undantaget klimatpåverkan, med 20–200%. De undersökta kategorierna inkluderar bland annat mänsklig hälsa, partikelutsläpp, övergödning och försurning (Schakel et al, 2014). Den el som produceras för att ersätta den minskade elproduktionen i scenario 1 orsakar miljöpåverkan inom olika miljöpåverkanskategorier och av varierande storlek beroende av vilken energikälla som används. Även då den minskade elproduktionen ersätts med el från referenskraftvärmeverket, leder den ökade GROT-framställningen och förbränning till miljöpåverkan inom kategorierna försurning och övergödning (Lindholm, Berg & Hansson, 2010).

Läckage från lagrad koldioxid inkluderas inte i beräkningarna och risken för läckage bedöms vara extremt liten. Det är dock nästan omöjligt att med säkerhet förutse att inget läckage sker. Koldioxidläckage från geologiska strukturer riskerar att skada både människor och naturen samt leda till att de nettonegativa utsläppen minskar (Havercroft & Macrory, 2014). Dessa risker ingår inte i studien men har potentialen att kraftigt förändra resultaten vid oförutsedda händelser.

6.3 SCENARIO 2 (BIOKOL)

Biokols stabilitet i marken är fortfarande omdiskuterat. Eftersom uppehållstiden bland annat avgörs av jordbruksmarkens egenskaper bör jordbruksmarker med optimala förhållanden väljas i första hand. Skördenivåer påverkas inte nämnvärt av tillsatt biokol vid svenska förhållanden men studier har påvisat stora positiva effekter för näringsfattiga jordbruksmarker med låga pH-värden i tropikerna. (Lehmann & Rondon, 2005), (Jeffery et al., 2017). Då biokolet tillsätts till dessa jordar kan de ökade

skördenivåerna i sin tur leda till minskad miljöpåverkan eftersom mindre mark behöver användas till odling. Då biokol tillsätts till jordbruksmark minskar markens albedo. Marken blir mörkare och reflekterar mindre solljus vilket bidrar till uppvärmning. Effekterna från minskad albedo ingår inte i resultaten i denna studie men kan påverka biokolets förmåga att motverka global uppvärmning (Usowicz et al, 2016).

Det kvarstår många osäkerheter kring hur biokol påverkar kvävecykeln och lustgasutsläpp. De långsiktiga effekterna är osäkra och vittrad biokol har visat sig påverka utsläppen av växthusgaser annorlunda jämfört med färsk biokol och effekten på lustgasavgångarna minskar med tiden (Spokas, 2012). Det är svårt att dra några konkreta slutsatser kring hur stor effekt, en eventuellt minskad lustgasavgång, har på systemets klimatpåverkan på lång sikt. Resultaten i denna studie visar dock att lustgasavgångar inte har någon avgörande effekt för biokolets potential som klimatåtgärd. Förändrade lustgasavgångar uppskattas, i denna studie, till 533 kg CO₂-ekvivalenter/ hektar och år vid tillförsel av 40 ton biokol/hektar. Klimatpåverkan från förändrad lustgasavgång uppgår till 0,4% av den lagrade mängden CO₂-ekvivalenter i det tillförda biokolet per år.

Det saknas exempel på storskalig biokolsproduktion i syfte att motverka klimatpåverkan där biprodukterna används till kraftvärmeproduktion. Detta har medfört att de parametrar som används i studiens beräkningar är hämtade från studier med varierande förutsättningar, på småskalig nivå och i vissa fall på labbskala. Produkternas värmevärden vid pyrolys är baserade på data från långsam pyrolys vid en lägre temperatur jämfört med den antagna pyrolystemperaturen i denna studie. Detta medför en viss osäkerhet kring energiproduktionen i de olika fallen.

6.4 GENERELL DISKUSSION

Då GROT förbränns i kraftvärmeverk sker utsläppen av den biogena koldioxiden tidigare jämfört med då GROT bryts ned i skogen. Detta medför att klimatpåverkan från nedbrytning av GROT tidigareläggs och effekten från minskade utsläpp uppstår i slutet av rotationstiden då motsvarande mängd GROT i skogen brutits ned. Denna tidsförskjutning kan leda till att klimateffekterna från en storskalig implementering av klimatåtgärder blir synlig efter en relativt lång tidsperiod.

Skillnaden mellan scenarierna i figur 16 minskar påtagligt då klimatpåverkan från produktion av ersättande el minskar. Detta samband framhäver vikten av att känna till källan till den ersättande elen vid en jämförelse mellan de båda scenarierna. Då tillgången av el med ett lågt koldioxidavtryck är låg, presterar scenario 1 bättre ur ett klimatperspektiv. Då tillgången istället är god bör en mer djupgående analys av systemet utföras för att underlätta bedömningen. I takt med att omställningen mot förnybara energikällor sker bör klimatpåverkan från marginalelen sjunka. Detta medför att resultaten i fallen med marginalel från stenkolk och naturgas representerar potentialen för BECCS och biokol med dagens elmix. Resultaten i fallen med marginalel från

referenskraftvärmeverket kan antas representera resultaten från en framtida elmix med lägre klimatpåverkan. Scenario 2 kräver betydligt mindre infrastruktur och investeringar och medför dessutom ett antal potentiellt positiva effekter som inte framgår av resultaten i denna studie. Ökade skördar och minskade utsläpp av växthusgaser från jordbruksmarker kan göra scenario 2 till ett mer attraktivt alternativ för näringsfattiga jordbruksmarker och då tillgången på el med låg klimatpåverkan är god.

Skillnaden i klimatpåverkan från fjärrvärmemixen och marginalfjärrvärmens är relativt liten. Detta resulterar i att nettoutsläppen är relativt lika i fallen då den ersättande elen kommer från samma källa men fjärrvärmekällan varierar. Detta samband kan härledas till att fjärrvärmemixen i Stockholm produceras med relativt stora mängder kol och el (Fortum, 2017). Eftersom marginalfjärrvärmens är beräknad utifrån det typnät som är vanligast förekommande i Sverige (Engström, Gode & Axelsson, 2009), kan klimatpåverkan från marginalfjärrvärme antas representera resultat för ett typiskt fjärrvärmenät i Sverige.

Ett ökat GROT-uttag är möjligt men medför osäkerheter kring påverkan på biodiversitet och den långsiktiga tillgången på näringsämnen. En studie har visat att risken för negativ påverkan på biodiversitet ökar då GROT-uttag sker på mer än 50% av kalhyggen (de Jong et al., 2017). Studier har dock visat att GROT-skörd har en begränsad påverkan på naturvårdsarter, vid en jämförelse med påverkan från kalhygget (de Jong & Dahlberg, 2017). Påverkan är störst vid GROT-uttag från lövträd (de Jong et al., 2017).

Vid gallring och GROT-uttag på 80% av den avvertrade ytan uppgår mängden tillgänglig GROT till cirka 6,5 miljoner ton TS (de Jong et al., 2017). Då denna GROT används i fallen med de största nettonegativa utsläppen i respektive scenario uppgår den totala potentialen till cirka 2,2 miljoner ton CO₂-ekvivalenter i scenario 2 med ersättande el från ett biomassaeldat kraftvärmeverk och ersättande värme från marginalfjärrvärme. Motsvarande siffra i för scenario 1 med ersättande el från ett biomassaeldat kraftvärmeverk och ersättande fjärrvärme från marginalfjärrvärme uppgår till cirka 4,4 miljoner ton CO₂-ekvivalenter i fallet BCCS-RFmix. Detta motsvarar cirka 13,3 % respektive 25,8 % av utsläppen från inrikes transporter i Sverige år 2016, vilka uppgick till cirka 16,9 miljoner ton CO₂ (Naturvårdsverket, 2018a). Motsvarande siffror vid en GROT-skörd som motsvarar det totala uttaget år 2013 på 1,8 miljoner ton GROT TS uppgår till nettonegativa utsläpp på 0,6 miljoner ton CO₂-ekvivalenter i fallet BIO-RFmar och 1,2 miljoner ton CO₂-ekvivalenter i fallet BCCS-RFmix. Detta medför nettonegativa utsläpp som motsvarar cirka 3,7 % respektive 7,1% av den totala klimatpåverkan från inrikes transporter i Sverige år 2016.

6.5 KÄNSLIGHETSANALYS

Trots att avskiljningseffektiviteten minskas med 10 %-enheter är det möjligt att uppnå nettonegativa utsläpp för samtliga fall i scenario 1. För fallen i scenario 2 då elen ersätts av el från referenskraftvärmeverket bibehålls nettonegativa utsläpp vid en minskning av biokolets uppehållstid med 15 % och en sänkt verkningsgrad med 15 %-enheter. Detta tyder på att nyckelresultaten i studien är relativt robusta även då viktiga parametrar i beräkningarna varierar. Resultaten i känslighetsanalysen framhäver ytterligare vikten att minimera den ersättande elens klimatpåverkan, då resultaten i fallen med stenkols- och naturgasproducerad el uppvisar en högre känslighet för förändrade verkningsgrader.

6.6 OSÄKERHETER

Alla livscykelanalyser inkluderar ett visst mått av osäkerhet. Konsekvensanalyser med ambitionen att uppskatta effekten av en förändring är dessutom förknippade med ytterligare osäkerheter (Brander et al, 2009). Det finns många källor till osäkerheter och fel, bland annat, osäkerheter i indata, saknade data, icke representativa indata, osäkerheter associerade med antaganden, osäkerheter till följd av geografiska skillnader och tidsaspekter. Det nuvarande kunskapsläget medför också osäkerheter, där bristfällig kunskap kring hur olika processer inom systemet fungerar bidrar till osäkerheterna. Även rena misstag kan ske (Björklund, 2002).

Osäkerheterna i denna studie bedöms vara relativt stora. Scenarierna innefattar en uppbyggnad av ny infrastruktur och det saknas konkreta planer kring hur implementering av biokols- och BECCS-system bör implementeras. Resultaten i studien bör därför tolkas som ett exempel på hur dessa två tekniker kan implementeras samt vilken klimatpåverkan detta medför och inte som representativa för teknikernas potential generellt. CCS och pyrolys av biomassa är beprövad teknik men exemplen på storskalig implementering saknas, vilket medför osäkerheter.

Biokols potentiella uppehållstid i marken är fortfarande omdiskuterat och är beroende av ett flertal parametrar. En metod för att minska osäkerheten är att anta att biokolet tillförs till en specifik jordtyp och optimera systemet efter den utvalda jordtypen. Vid en storskalig implementering är det dock sannolikt att biokol sprids på ett flertal olika jordtyper under varierande förhållanden. Biokolets påverkan på avgång av lustgas från jordbruksmarken är också osäker. Vid en uppskattning av dess potentiella påverkan visar resultaten dock att denna osäkerhet bör ha en relativt liten påverkan på resultaten.

Den förändrade kolinlagringen i skogsmarker till följd av GROT-uttag är beroende av klimatfaktorer och ett förändrat klimat kan bland annat påverka nedbrytningshastigheten av organiskt kol. Det är dock osäkert hur stora effekterna är. Balansen mellan en ökad kolinlagring till följd av ökad skogsproduktion och CO₂-avgångar till följd av en ökad

nebrytningshastighet har en avgörande betydelse för hur kolinlagringen i mark påverkas av ett förändrat klimat (Smith et al., 2008).

6.7 JÄMFÖRELSE MED RESULTAT I TIDIGARE STUDIER

Det är svårt att jämföra resultat mellan olika LCA-studier eftersom, viktiga antaganden, indata, och systemgränser skiljer sig åt mellan studier. Det är vanligt att använda den funktionella enheten nettoutsläppta CO₂-ekvivalenter/ kWh producerad el vid LCA-beräkningar av BECCS.

I Tabell 10 och 12 presenteras resultaten i denna studie. I Tabell 11 och 13 presenteras resultaten i liknande LCA-studier. En tydlig skillnad mellan denna studie och de tidigare studierna är att referensscenariot i denna studie representeras av att GROT används till förbränning i ett kraftvärmeverk. I denna studie antas den minskade elproduktionen i scenario 1 och 2 behövas ersättas av extern elproduktion. Elen som produceras i de tidigare studierna i Tabell 13 antas ersätta el från fossila källor.

Tabell 10 Nettoutsläpp i scenario 1 uttryckt i g CO₂-ekvivalenter/kWh producerad el.

BECCS	BCCS-SFmix	BCCS-SFmar	BCCS-NFmix	BCCS-NFmar	BCCS-Rfmix	BCCS-RFmar
Nettoutsläpp g CO ₂ -ekv/kWh	-148	-138	-315	-304	-590	-579

Tabell 11 Nettoutsläpp i tidigare studier uttryckt i g CO₂-ekvivalenter/kWh producerad el.

Studie	g CO ₂ -ekv/kWh _{el}	Kraftverk	Antaganden
Volkart, Bauer & Boulet (2013)	-1380	Kraftverk med förbränning och avskiljningsteknik av typen post-combustion	Biomassan antas vara koldioxidneutral. Transport i rörledning 200 km. Träbiomassa.
IEAGHG (2009)	-1573	CFB-kraftverk med 100 % biomassa och avskiljningsteknik av typen post-combustion	Biomassan antas vara koldioxidneutral. Transport med rörledning.

Tabell 12 Nettoutsläpp i scenario 2, uttryckt i g CO₂-ekvivalenter/ ton GROT TS.

Biokol	BIO-SFmix	BIO-SFmar	BIO-NFmix	BIO-NFmar	BIO-RFmix	BIO-RFmar
Nettoutsläpp g CO ₂ -ekv/ton GROT TS	937	820	458	341	-334	-451

Tabell 13 Nettoutsläpp i scenario 2 uttryckt i g CO₂-ekvivalenter/ ton biomassa TS.

Studie	g CO ₂ -ekv/ton biomassa TS	Kraftverk	Antaganden
Hammond et al., (2011)	-1200	Långsam pyrolys och el-produktion.	Biomassan = skogsrester. Inkluderar en ökad skörd med 10%, sänkt lustgasavgång på 25% och en minskad nedbrytning av organiskt kol i marken på 10 %. Den el som produceras ersätter el från ett annat kraftverk.
Roberts et al., (2009)	-793	Långsam pyrolys	Biomassa = jordbruksrester minskade N ₂ O utsläpp på 50 %, Energiproduktionen antas ersätta el från fossila källor. 80 % av biokolet antas vara stabilt.

6.8 FÖRSLAG PÅ FRAMTIDA STUDIER

I framtida studier bör ekonomiska aspekter inkluderas. Genom att beräkna de totala kostnaderna för uppförande samt drift av infrastruktur i scenarierna är det möjligt att beräkna kostnaden per ton nettonegativa utsläpp av koldioxidekvivalenter. Dessa resultat kan sedan användas för jämföra den ekonomiska potentialen mellan scenarierna samt priset på utsläppsrätter som krävs för att scenarierna skall vara ekonomiskt lönsamma.

En studie som undersöker vilka jordbruksmarker i Sverige som är särskilt lämpade för tillsatt biokol bör utföras. Denna studie kan kompletteras med en undersökning av jordbrukares inställning till biokol som jordförbättrare och koldioxidsänka.

Studier bör utföras i syfte att minska osäkerheterna kring biokols påverkan på albedo och lustgasavgångar från svenska jordbruksmarker.

7 SLUTSATSER

- Det är möjligt att uppnå nettoupptag av växthusgaser vid användning av GROT till BECCS och till framställande av biokol som tillsätts till jordbruksmark.
- Klimatpåverkan i scenario 1 med BECCS uppgår till, mellan -168 och -666 kg CO₂-ekv/ ton GROT TS
- Klimatpåverkan i scenario 2 med biokol tillsatt till jordbruksmark uppgår till, mellan 937 och -344 kg CO₂-ekv/ ton GROT TS
- Tillgången till el med låg klimatpåverkan är avgörande för att uppnå nettonegativa utsläpp i scenario 2
- Då GROT-skörd sker på 80 % av den årliga avverkade arealen i Sverige och kombineras med gallring, har biokol tillsatt till jordbruksmark potential att åstadkomma nettonegativa utsläpp på upp till 2,2 miljoner ton CO₂ ekvivalenter per år, vilket motsvarar 13,3% av utsläppen från inrikes transporter i Sverige 2016
- Då GROT-skörd sker på 80 % av den årliga avverkade arealen i Sverige och kombineras med gallring, har BECCS potential att uppnå nettonegativa utsläpp på upp till 4,4 miljoner ton CO₂ ekvivalenter per år, vilket motsvarar 25,8% av utsläppen från inrikes transporter i Sverige 2016
- Utifrån givna antaganden uppnår BECCS större nettonegativa utsläpp i samtliga fall jämfört med biokol tillsatt till jordbruksmark

REFERENSER

- Almers, R., (2009) *Tillsats av biokol till en svensk sandjord – effekter på lustgasavgång, kväveretention och andel vattenfyllda porer*. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för mark och miljö.
Tillgänglig:https://stud.epsilon.slu.se/667/1/almers_r_091202.pdf [2018-04-18]
- Brander, M., Tipper, R., Hutchison, C., Davis, G (2009) Consequential and Attributional Approaches to LCA: a Guide to Policy Makers with Specific Reference to Greenhouse Gas LCA of Biofuels. *Ecometrica press*. Technical Paper TP-090403-A
- Brownsort, P (2009) *Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on biochar system benefits*. University of Edinburgh.
Tillgänglig:<https://www.era.lib.ed.ac.uk/bitstream/handle/1842/3116/Brownsort%20PA%20MSc%202009.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [2018-03-16]
- Björklund, A (2002) Survey of Approaches to Improve Reliability in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 7:64
- Byman, K (2015). *Elproduktion Tekniker för produktion av el*. Stockholm. IVA.
Tillgänglig:<https://www.iva.se/globalassets/info-trycksaker/vagval-el/vagval-el-elproduktion.pdf> [2018-02-14]
- Bäcker, N., Tapia, V (2018) *Hållbarhetsaspekter vid förbränning av grot och RT-flis på KVV8 hos Fortum Värme*. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för energi och teknik. Tillgänglig:https://stud.epsilon.slu.se/13106/1/backer_n_tapia_v_180123.pdf [2018-03-12]
- Börjesson, P. (2016). *Potential för ökad tillförsel och avsättning av inhemsk biomassa i en växande svensk bioekonomi*. Lund:(Rapport nr. 97)
Tillgänglig:http://portal.research.lu.se/ws/files/7279231/B_rjesson_P._2016._Rapport_nr_97_Milj_och_energisystem_Lunds_Universitet.pdf [2018-03-01]
- Crombie, K., Mašek, O (2015) Pyrolysis biochar systems, balance between bioenergy and carbon sequestration. *GCB Bioenergy*. Vol.7, ss. 349-361
- Dutta, B. & Raghavan, V (2014) A life cycle assessment of environmental and economic balance of biochar systems in Quebec. *Int J Energy Environ*. Vol.5, art.106.
Tillgänglig:<https://doi.org/10.1007/s40095-014-0106-4>

de Jong, J., C. Akselsson, H. Berglund, G. Egnell, K. Gerhardt, L. Lönnberg, B. Olsson H. Von Stedingk (2012). *Konsekvenser av ett ökat uttag av skogsbränsle - En syntes från Energimyndighetens bränsleprogram 2007-2001*. ER2012:08 Eskilstuna, Sweden. Tillgänglig:<https://www.slu.se/globalassets/ew/org/centrb/cbm/dokument/publikationer-cbm/2013-konsekvenser-av-okat-uttag-skogsbransle.pdf> [2018-02-6]

de Jong, J., Akselsson, C., Egnell, G., Löfgren, S., Olsson, B (2017) Realizing the energy potential of forest biomass in Sweden – How much is environmentally sustainable? *Forest Ecology and Management*. vol.383, ss. 3-16.

de Jong, J., Dahlberg, A. (2017) Impact on species of conservation interest of forest harvesting for bioenergy purposes. *Forest Ecology and Management*. vol. 383, ss. 37-48

Dillon, D., Wheeldon, J., Chu, R., Choi, G., Loy, C (2013). A Summary of EPRI's Engineering and Economic Studies of Post Combustion Capture Retrofit Applied at Various North American Host Sites. *Energy Procedia*. Vol. 37, ss. 2349-2358.

Endersen, Ø., Sørgård, E., Sundet, J., Dalsøren, S., Isaksen, I., Berglen, T., Gravir, G (2003) Emissions from international sea transportation and environmental impact. *Journal of geophysical research Atmospheres*. Vol. 108.

Energiföretagen (2017) *Miljövärdering 2017*.

Tillgänglig:<https://www.energiforetagen.se/globalassets/energiforetagen/statistik/fjarrvarme/miljovardering-av-fjarrvarme/hjalp-vid-berakning/guide-for-allokering-i-kraftvarmeverk-och-fjarrvarmens-elanvandning-2017.pdf>

Engström, R., Gode, J., Axelsson, U (2009) *Vägledning till metodval vid beräkning av påverkan från förändrad energianvändning på de svenska miljömålen*. Stockholm: IVL (IVL Rapport; B1822).

Tillgänglig:<https://www.ivl.se/download/18.343dc99d14e8bb0f58b7567/1445517389120/B1822.pdf> [2018-04-22]

Elsayed, M.A., Mortimer, N.D., 2001. Carbon and Energy Modelling of Biomass Systems: Conversion Plant and Data Updates. DTI.

Tillgänglig:https://www.researchgate.net/profile/Nigel_Mortimer/publication/238731328_CARBON_AND_ENERGY_MODELING_OF_BIOMASS_SYSTEMS_CONVERSION_PLANT_AND_DATA_UPDATES/links/56b85e5808ae3c1b79b2447b/CARBON-AND-ENERGY-MODELLING-OF-BIOMASS-SYSTEMS-CONVERSION-PLANT-AND-DATA-UPDATES.pdf [2018-03-08]

Ericsson, K., Werner, S (2016) The introduction and expansion of biomass use in Swedish district heating systems. *Biomass and bioenergy*. vol.94, ss.57-65.

- EASAC (2018) *Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets?* Halle: German National Academy of science (EASAC policy report 35).
Tillgänglig:https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Negative_Carbon/EASAC_Report_on_Negative_Emission_Technologies.pdf [2018-02-06]
- Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, vol. 91(1), ss.1-21.
- Fortum, (2017). *Miljörapport 2016 Värtaverket*, Stockholm: Fortum. [2018-03-08]
- Fuss, S et al (2014) Betting on negative emissions. *Nature Climate Change*. vol. 4, ss. 850-853. DOI:10.1038/nclimate2392 [2018-01-19]
- Gode, J., Hagberg, L (2008) *Systemanalys av CCS vid kraftvärme Stockholm*: IVL (IVL rapport B1870)
Tillgänglig:<http://www.ivl.se/download/18.343dc99d14e8bb0f58b7594/1445517411069/B1870.pdf> [17-01-2018]
- Gode, J et al. (2011) Miljöfaktaboken 2011 Uppskattade emissionsfaktorer för bränslen, el, värme och transporter. Stockholm: Värmeforsk. Tillgänglig:
<https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/17907/miljoefaktaboken-2011-vaermeforskrapport-1183.pdf> [2018-02-21]
- Gurwick, N., Moore, L., Kelly, C., Elias, P., (2013) A Systematic Review of Biochar Research, with a Focus on Its Stability in situ and Its Promise as a Climate Mitigation Strategy. *Plos one*. Tillgänglig:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075932> [2018-02-01]
- Hammar, T (2017) *Climate Impacts of Woody Biomass Use for Heat and Power Production in Sweden*. Diss. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet.
- Hammond, J., Shackel, S., Sohi, S., Brownsort, P (2011) Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK. *Energy policy*. vol. 89, ss. 2646-2655.
- Havercroft, I., Macrory, R. (2014) *Legal Liability and Carbon Capture and Storage*. Tillgänglig<http://www.globalccsinstitute.com/publications/legal-liability-and-carbon-capture-and-storage-comparative-perspective> [2018-03-09]
- IEA, (2016) *The potential for equipping China's existing coal fleet with carbon capture and storage*. Paris: International Energy Agency.

Tillgänglig:<https://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/ThePotentialforEquippingChinasExistingCoalFleetwithCarbonCaptureandStorage.pdf> [2018-02-14]

IEA, (2017) *Key World Energy Statistics 2017*: IEA publications.

Tillgänglig:<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>

IEAGHG, (2004) *Ship transport of CO₂*. IEAGHG (Rapport PH 4/30)

Tillgänglig:http://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/PH4-30%20Ship%20Transport.pdf [2018-03-01]

IEAGHG (2009) *Biomass CCS Study*, IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, UK. Tillgänglig:

http://www.ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2009-9.pdf

IEAGHG, 2010. *Environmental evaluation of CCS using life cycle assessment (LCA)*.

Rapport 2010/TR2: Maj 2010.

Tillgänglig:<http://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/100226/environmental-evaluation-ccs-using-life-cycle-assessment.pdf> [2018-04-16]

IEAGHG, (2011) *Potential for Biomass and carbon dioxide capture and storage*:

Rapport 2011/06: Juli 2011.

Tillgänglig:<https://www.globalccsinstitute.com/publications/potential-biomass-and-carbon-dioxide-capture-and-storage> [2018-01-23]

IEAGHG, 2016. *The potential for equipping China's existing coal fleet with carbon capture and storage*. Rapport 2011/02: Maj 2011

Tillgänglig:<http://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/100871/retrofitting-co2-capture-existing-power-plants.pdf> [2018-02-14]

ISO (2006) *ISO 14040:2006*. Tillgänglig:<https://www.iso.org/standard/37456.html> [2018-03-19]

IPCC (2005) *IPCC special report on carbon capture and storage*. New York:

Cambridge university press. Tillgänglig:https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf [2017-01-18]

IPCC (2014) *Climate change 2014 Mitigation of climate change*.

Tillgänglig:https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume.pdf [2017-01-18]

IPCC (2015) *Climate Change 2014 Synthesis Report*. Tillgänglig:http://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/resources/pdf/IPCC_SynthesisReport.pdf [2018-04-16]

Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A C., van Groenigen, J W., Hungate, B A., Verheijen, F., (2017) Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*. vol. 12.

Kasimir Klemedtsson, Å (2009) *Lustgasavgång från jordbruksmark*. Tillgänglig:https://gupea.ub.gu.se/bitstream/2077/21755/1/gupea_2077_21755_1.pdf [2018-05-14]

Kather, A., Kownatzki, S (2011) Assessment of the different parameters affecting the CO₂ purity from coal fired oxyfuel process. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. vol. 5. ss.204-209.

Kheshgi, H., Coninck, H., Kessels, J (2012) Carbon capture and Storage seven years after the IPCC special report. *Mitigation and adaptation strategies for global change*. vol. 17, ss. 563-567

Koornneef, J., Keulen T., Faaij, A., Turkenburg, W (2008) Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂. *International journal of greenhouse gas control*. vol. 2, ss. 448-467.

Kärki, J., Tsupari, E. & Arasto, A., (2013). CCS feasibility improvement in industrial and municipal applications by heat utilisation. *Energy Procedia*, vol 37, ss. 2611–2621.

Lehtikangas, P (1999) *Lagringshandbok för trädbränslen*. Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
Tillgänglig:https://www.svebio.se/app/uploads/2016/11/Lagringshandboken_Lehtikangas.pdf [2018-03-12]

Liszka, M., Malik, T., Budnik, M. & Ziebig, A., (2013). Comparison of IGCC (integrated gasification combined cycle) and CFB (circulating fluidized bed) cogeneration plants equipped with CO₂ removal. *Energy*, vol 58, ss. 86–96.

Lehmann, J., Gaunt, J., Rondon, M., (2005) Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. vol. 11, ss. 403-427.

Lehmann, J. and Rondon, M (2005), Bio-char soil management on highly-weathered soils in the humid tropics, *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*, Boca Raton, CRC Press,

- Lehman, J (2007) A handful of carbon. *Nature*. vol 447, ss. 143-144
- Lehmann, J., Joseph, S (2015) *Biochar for Environmental Management*. 2. uppl. Routledge
- Lindholm, E-L., Berg, S., Hansson, P-A (2010) *Skörd av skogsbränslen i ett livscykelperspektiv*. Uppsala: Institutionen för energi och teknik (Rapport 023). Tillgänglig: https://pub.epsilon.slu.se/13951/7/lindholm_el_etal_170825.pdf [2018-01-26]
- Liu, Q., Zhang, Y., Liu, B., Amonette, J E., Lin, Z., Liu, G., Ambus, P., Xie, Z (2018) How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis. *Plant and soil*.
- Maraseni, T (2010) Biochar: maximising the benefits. *International Journal of Environmental Studies*. vol. 67, ss. 319-327
- Mohan, D., Kumar, A., Charles, P (2016) Sustainable Biochar - A Tool for Climate Change Mitigation, Soil Management and Water and Wastewater Treatment. *Geostatistical and Geospatial Approaches for the Characterization of Natural Resources in the Environment*. ss. 949-955.
- Myhre, G., Shindell, D (2013) *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing* (Kapitel 8 i Climate Change 2013: The Physical Science Basis) Tillgänglig: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf [2018-03-06]
- Nationalencyklopedin (2018) *Nautisk mil*. Tillgänglig <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/nautisk-mil> [2018-05-04]
- Naturvårdsverket (2006) *Helträdsutnyttjande – konsekvenser för klimat och biologisk mångfald*. Stockholm: Naturvårdsverket (Rapport, 5562) Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-5562-3.pdf> [2018-01-26]
- Naturvårdsverket (2013) *2050 Ett koldioxidneutralt Sverige*. Stockholm: Naturvårdsverket. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/upload/miljoarbete-i-samhället/miljoarbete-i-sverige/klimat/fardplan-2050/2050-ett-koldioxidneutralt-sverige.pdf> [2018-01-11]

Naturvårdsverket (2018a) *Territoriella utsläpp och upptag av växthusgaser*. Tillgänglig:<http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-nationella-utslapp-och-upptag/> [2018-04-16]

Naturvårdsverket (2018b) *Utsläpp i siffror*. Tillgänglig:<http://utslappisiffror.naturvardsverket.se/Sok/Anlaggningsida/?pid=3570> [2018-03-01]

Onarheim, K., Arasto, A (2016) *Sustainability and GHG impact of Bio-CC(U)S*. IEA bioenergy Tillgänglig:<http://task41project5.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/01/Sustainability-and-GHG-impacts-of-Bio-CCUS.pdf> [2018-01-26]

Paulrud, S., Fridell, E., Stripple, H., Gustafsson, T. I., (2010). Uppdatering av klimatrelaterade emissionsfaktorer, Norrköping: Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut. Tillgänglig:<http://www.smed.se/wp-content/uploads/2012/01/Uppdatering-av-klimatrelaterade-emissionsfaktorer.pdf> [2018-03-09]

Regeringskansliet (2017) *Det klimatpolitiska ramverket*. Tillgänglig:<http://www.regeringen.se/artiklar/2017/06/det-klimatpolitiska-ramverket/> [2018-03-05]

Tingvold (2017) *Prospective Life Cycle Assessment of Container Shipping*. Norwegian University of Science and Technology. Department of Energy and Process Engineering. (Examensarbete)Tillgängligt:https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2454930/17718_FULLTEXT.pdf?sequence=1 [2018-03-15]

Roberts, K., Gloy, B., Joseph, S., Scott, N., Lehmann, J (2009) Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic, and Climate Change Potential. *Environmental science & technology*. vol 44. ss 827-833.

Rogelj, J., Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K., Meinshausen, M., (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature international journal of science*, vol. 534, ss. 631-639.

Salman, C (2014) *Techno economic analysis of wood pyrolysis in Sweden*. Kungliga tekniska högskolan. KTH industrial engineering and management. Tillgänglig:<http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:761039/FULLTEXT02.pdf> [2018-03-08]

Sami, M., Annamalai, K., Wooldrige, M (2001) Co-firing of coal and biomass fuel blends. *Progress in Energy and Combustion Science*. vol. 27, ss. 171-214.

SCB (2017) *Totala utsläpp av växthusgaser efter växthusgas, sektor och år*. Tillgänglig:[http://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START MI MI0107/TotaltUtslappN/table/tableViewLayout1/?rxid=07a48039-7213-43c4-9481-c7a321ddd5df](http://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START_MI_MI0107/TotaltUtslappN/table/tableViewLayout1/?rxid=07a48039-7213-43c4-9481-c7a321ddd5df) [2018-01-24]

Schakel, W., Meerman, H., Talaei, A., Ramírez, A., Faaij, A (2014). Comparative life cycle assessment of biomass co-firing plants with carbon capture and storage. *Applied Energy*, vol. 131, ss. 431–467.

Singh, B P., Hatton, B J., Singh B., Cowie, A L., Kathuria, A., (2009) Influence of Biochars on Nitrous Oxide Emission and Nitrogen Leaching from Two Contrasting Soils. *Journal of Environmental Quality*. vol. 39, ss. 1224-1235.

Singh, A., Olsen, S., Pant, D (2013) *Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources*. 1. uppl. New York: Springer

Skogssyrelsen (2014) *Skogsstatistisk årsbok 2014*. Tillgänglig: <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/statistik/historisk-statistik/skogsstatistisk-arsbok-2010-2014/skogsstatistisk-arsbok-2014.pdf> [2018-01-29]

Sokka, L., Koskela, S., Seppälä, J (2005). *Life cycle inventory analysis of hard coal based electricity generation*. Helsingfors: Finnish environment institute. Tillgänglig:https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40482/FE_797.pdf?sequence=1

Spielmann, M., Dones, R., Bauer, C., (2007) Life cycle inventories of transport services, ecoinvent database version 2.2. [2018-03-27]

Spokas, K (2012) Impact of biochar field aging on laboratory greenhouse gas production potentials. *Global change biology bioenergy*. vol 5, ss.165-176

Staffas, L., Hansen, K., Sidvall, A., Munthe, J (2015) *Råvaruströmmar från skogen - tillgång och samband*. Stockholm: IVL (IVL rapport, C116) Tillgänglig:<http://www.ivl.se/download/18.343dc99d14e8bb0f58b76e3/1445517787108/C116.pdf> [2018-01-29]

Stigson, P., Hansson, A., Lind, M. (2012) Obstacles for CCS deployment: an analysis of discrepancies of perceptions. *Mitigation and adaptation strategies for global change*. vol 17, ss. 601-619

Strömberg, B., Svärd, S. (2012) *Bränslehandboken*. Stockholm: Värmeforsk
Tillgänglig:<https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/17831/braenslehandboken-2012-vaermeforskrappport-1234.pdf> [2018-03-09]

Tammeorg, P., Simojoki, A., Mäkelä, P. et al., (2014) Biochar application to a fertile sandy clay loam in boreal conditions: effects on soil properties and yield formation of wheat, turnip rape and faba bean. *Plant Soil*. vol. 374, ss. 89-107.

Usowicz, B., Lipiec, J., Łukowski, M., Marczewski, W., Usowicz, J (2016) The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow. *Soil and Tillage Research*. vol. 164, ss. 45-51.

Volkart, K., Bauer, C., Boulet, C (2013) Life cycle assesment of carbon capture and storage in power generation and industry in Europe. *International journal of greenhouse gas control*. vol. 16, ss. 91-106.

Wang, J., Xiong, Z., Kuzyakov, Y (2016) Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *Global change biology bioenergy*. vol. 8, ss. 512-523

Williamson, P. (2016) Emissions reduction: Scrutinize CO2 removal methods. *Nature*: (2016-02-10) Tillgänglig:<https://www.nature.com/news/emissions-reduction-scrutinize-co2-removal-methods-1.19318> [2018-01-19]

WMO (2017) *WMO greenhouse gas bulletin*. WMO (bulletin nr 13, 30 oktober 2017)
Tillgänglig:https://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/ckeditor/files/GHG_Bulletin_13_EN_final_1_1.pdf?LGJNmHpwKkEG2Qw4mEQjdm6bWxgWAJHa [2018-03-05]

Woolf, D., Amonette, J., Street-Perrott, A., Lehmann, J., Joseph, S (2010) Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communication*. vol 1, art nr. 56.

Yongwoon, L., Park, J., Ryu, C., Gang, K., Yang, W., Park, Y., Jung, J., Hyun, S., (2013) Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500 °C. *Bioresource Technology*. vol 148, ss.196-201.

Zwieten, L. V., Sing, B., Joseph, S., Kimber, S., Cowie, A., Chan, K Y (2009) Biochar and Emissions of Non-CO2 Greenhouse Gases form Soil. In Lehmann, J. and Joseph, S. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London,