



LTH
LUNDS TEKNISKA
HÖGSKOLA

Fossilfri plast i Sverige

Gröna kolatomer till svensk plastanvändning

Viktor Wahldén

Examensarbete

December 2023

Miljö- och Energisystem, LTH

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

vid Lunds universitet

Institutionen för teknik och samhälle

Miljö- och energisystem

Box 118, 221 00 Lund

ISRN LUTFD2/TFEM—24/5203--SE + (1-57)

ISSN 1102-3651

Tryckt av Media-Tryck, Lunds universitet



Media-Tryck is a Nordic Swan Ecolabel certified provider of printed material. Read more about our environmental work at www.mediatryck.lu.se

MADE IN SWEDEN 

Sammanfattning

Med bakgrund i den fossilfria omställningen var målet med detta arbete att undersöka hur stort behovet av kol till svensk plastanvändning 2050 är samt att jämföra kolbehovet med mängden tillgängligt fossilfritt kol. För att svara på detta utformades tre scenarier på plastanvändningen. Det första (A) baserat på historisk plastanvändning, det andra (B) baserat på prognoser och det tredje (C) baserat på dagens användning per person. Scenarierna resulterade i ett förväntat behov på 1,1-2,2 miljoner ton kol där (C) hade minst behov och (A) störst. År 2050 förväntas samtidigt mängden tillgängligt kol från avfallssektorn och skogssektorn vara ungefär 22 miljoner ton. Utifrån det kan det verka som att det inte ska vara något problem att förse plastanvändningens behov av kol men det finns många andra sektorer som också har ett ökat behov av fossilfritt kol till deras omställning. Behovet av biogent kol kan minskas genom ökad cirkulation av det kol som finns inom plastsektorn genom mekanisk och kemisk återvinning av det plastavfall som uppstår.

Abstract

With a background in the fossil-free transition, the goal of this work was to investigate the extent of the need for carbon in Swedish plastic usage year 2050 and to compare this carbon need with the available amount of fossil-free carbon in Sweden. To answer this, three scenarios were designed for plastic usage. The first scenario (A) based on historical plastic usage, the second (B) based on forecasts and the third (C) based on today's usage per person. The scenarios resulted in an expected requirement of 1,1-2,2 million tons of carbon, with (C) having the smallest need and (A) the greatest. By 2050, the available amount of carbon from the waste sector and the forestry sector is expected to be approximately 22 million tons. Based on this, it may seem like there should be no problem supplying the carbon needs for plastic usage. However, there are many other sectors that also have an increased demand for fossil-free carbon for their transition. The need for biogenic carbon can be reduced through increased circulation of the carbon within the plastic sector through mechanical and chemical recycling of generated plastic waste.

Förord

Det här examensarbetet i Ekosystemteknik utfördes under våren och hösten 2023 på avdelningen för Miljö- och Energisystem på LTH.

Här vill jag passa på att tacka alla som har varit ett stöd för mig under arbetets gång. Jag vill tacka mina vänner Petter Fredriksson och Mia-Stina Olenfeldt som jag spenderat många långa pluggdagar med. Jag vill tacka min kompis Erik Jakobsson, min pappa Per Wahldén och min mamma Lousie Boucher Wahldén för att ha läst igenom mitt arbete och kommit med hjälpsam feedback. Jag vill tacka Ulf Bergstrand som varit min kontakt på IKEM men även alla andra på IKEM som hjälpt mig genom att komma med inspiration, input och relevant litteratur.

Framför allt vill jag tacka mina handledare Karin Ericsson och Ellen Palm som med feedback, tips och regelbundna möten stöttat mig genom arbetets många både toppar och dalar. Utan er hade det inte gått.

Viktor Wahldén

Sammanfattning.....	III
Abstract.....	IV
Förord.....	V
1. Inledning.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte och frågeställningar.....	2
1.3 Avgränsningar.....	3
1.4 Metod.....	4
2. Sveriges plastflöden.....	5
2.1 Plastanvändningen idag.....	5
2.2 Plastanvändningen 2050.....	5
2.2.1 Scenario A - hög tillväxt.....	6
2.2.2 Scenario B - medel tillväxt.....	7
2.2.3 Scenario C - låg tillväxt.....	7
2.3 Summering av plastbehovet.....	8
3. Avfall.....	9
3.1 Sveriges avfall idag.....	9
3.1.1 Energiåtervinning.....	10
3.1.2 Rötning samt deponi.....	11
3.1.3 Konventionell materialåtervinning.....	12
3.1.4 Kompostering.....	13
3.1.5 Grafisk summering av 3.1.....	14
3.2 Sveriges avfall 2050.....	15
3.2.1 Biogent avfall - Rötning, deponi och kompostering.....	15
3.2.2 Biogent avfall - Energiåtervinning.....	15
3.2.3 Plastavfall 2050.....	16
3.2.4 Grafisk sammanställning av 3.2.....	17
4. Skogsindustrin.....	18
4.1 Skogsindustrin nutid.....	18
4.2 Skogsindustrin 2050.....	21
5. Samlat resultat över behov och källor.....	23
6. Metoder för återvinning av kolatomer.....	25
6.1 Mekanisk återvinning av plastavfall.....	25
6.2 Termokemiska metoder.....	26
6.2.1 Pyrolys (kräver homogena flöden, PE, PP, PS).....	26
6.2.2 Förgasning (mer blandade flöden).....	27
6.3 Koldioxid från punktkälla som råvara.....	27
6.4 Vätgas genom elektrolys av vatten.....	28
6.5 Traditionell produktion av PE och PP från nafta.....	29
6.6 Sammanställning av processernas energibehov.....	29

6.7 Sammansatt energiåtgång vid plastproduktion.....	31
7. Möjlig fördelning av råvara för att tillgodose plastindustrins behov av kol.....	33
7.1 Kolbehov, kolkällor och energiåtgång.....	33
7.2 Möjlig tillförsel av kolatomer.....	34
7.3 Allmän diskussion / påverkande faktorer.....	39
7.3.1 Ekonomi och logistik.....	39
7.3.2 Övriga kolkällor.....	39
7.3.3 Downsizing.....	40
7.3.4 Energiproduktion.....	40
8. Slutsats.....	40
Källförteckning.....	42
Appendix.....	48

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Sveriges långsiktiga klimatmål innebär att till 2045 ska Sverige ha netto noll utsläpp av växthusgaser och efter 2045 ska utsläppen istället vara negativa. Mer specifikt ska utsläppen 2045 vara minst 85% lägre än 1990 och resterande utsläpp täcks genom kompletterande åtgärder såsom, upptag i skog och mark, utsläppsminskningar utanför Sverige och lagring av koldioxid från biologiska källor (Naturvårdsverket, u.å.e). Utöver de svenska klimatmålen måste Sverige också förhålla sig till EU:s klimatmål som bland annat har som mål att hela EU ska ha netto noll utsläpp av växthusgaser 2050 för att sedan ha negativa utsläpp (Europeiska kommissionen, u.å.). Både Sveriges och EU:s klimatmål syftar till att uppfylla Parisavtalet från 2015. Målet med Parisavtalet är att begränsa den globala uppvärmningen till under 2°C och helst till 1.5°C (UNFCCC, u.å.). För att nå dessa mål måste alla sektorer göra förändringar i hur fossila resurser används. Inte minst kemisektorn, och mer specifikt för detta arbete, plastindustrin.

Plast är ett samlingsnamn för olika typer av organiska eller semi-organiska polymerer och eventuella tillsatser. Polymerer består i sin tur av monomerer som är små molekyler som repeteras genom polymerisation för att bilda makromolekylen, det vill säga polymeren. De vanligast förekommande ämnena i polymerer är kol, väte och syre, men kväve, klor, fluor och svavel är också vanligt förekommande (Baur et al., 2019). Det finns otaliga varianter av plast och dessa kan hittas överallt i dagens samhälle i allt från kläder och förpackningar till byggmaterial och medicinsk utrustning. Globalt tillverkades 390 miljoner ton plast 2021 och produktionen uppskattas öka flerfaldigt till 2050 till följd av framför allt ekonomisk tillväxt och befolkningstillväxt (Plastics Europe, 2022; OECD, 2022b).

Idag produceras majoriteten av all plast från fossilt råmaterial såsom naturgas och olja, endast runt 1% av producerad plast är biobaserad (Plastics Europe, 2022). Genom hela plastens livscykel sker utsläpp av växthusgaser, från extraktion av råvara, krackning, processenergi, samt utsläpp vid förbränning eller nedbrytning i slutet av plastens livscykel (Bauer et al., 2022). Enligt en uppskattning är plastics koldioxidavtryck 5 kg CO₂ per kg plast varav 2,7 kg CO₂ per kg plast är bundet i materialet och återstående 2,3 kg CO₂ per kg fördelat över övriga processteg (Bauer et al., 2022). Utsläpp av växthusgaser från global produktion av plast uppskattas stå för 3,4% av de totala globala utsläppen av koldioxid 2019 (OECD, 2022a).

Till skillnad från processtegen som använder fossilt bränsle som energikälla går det inte att avkarbonisera plasten utan man måste istället använda ickefossilt kol för att kunna göra sektorn fossilfri (Kähler *et al.*, 2021). De alternativa källor till fossilt kol som finns är biomassa, återvunnet kolinnehållande material och insamling av koldioxid, antingen direkt från atmosfären eller från punktkällor som industrin. Utöver plastindustrin finns det flera andra sektorer som också förväntas göra en omställning till fossilfritt, till exempel förväntas flygbranschen till stor del behöva gå över till biobränsle från skogen (Fossilfritt Sverige and Föreningen Svenskt Flyg, 2018). Det är därför av intresse att undersöka massbalansen mellan behovet av kolatomer inom plastindustrin och tillgängliga kolkällor.

1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med detta examensarbete är att uppskatta det framtida behovet av kol till svensk plastanvändning samt storleken på tillgängliga fossilfria kolflöden i Sverige för att skapa en bild av hur försörjningen av kolatomer till svensk plastanvändning fri från jungfrulig fossil råvara hade kunnat se ut 2050.

Med tillgängliga flöden menas de flöden som anses vara lättast att ersätta utifrån dess nuvarande användning. Till exempel anses restprodukter som går till förbränning med energiåtervinning som mer tillgängliga än de flöden som går till en primärprodukt.

Med fossilfria kolflöden syftas i detta arbete på insamlad koldioxid från luft eller rökgas, insamlat plastavfall, biogena flöden som skogsråvara eller avfall med biologiskt ursprung, medan torv kommer att räknas som fossilt då det inte längre är en del av det biogena kolkretsloppet. Att plastavfall räknas som fossilfri källa trots att majoriteten av plast har fossilt ursprung beror på att den inte är jungfrulig och att kolet i plastavfallet kan anses ha nått biosfären. Alternativt kan återvinning av plastavfall ses som en minskning av mängden råvara som behövs istället för en kolkälla, med samma resultat i slutändan. Utöver det kommer den fossila andelen av plasten minska när ingen jungfrulig fossil råvara längre används i enlighet med arbetets syfte.

För att uppnå syftet har följande frågeställningar formulerats:

- Hur stort Sveriges framtida behov av plast förväntas bli och hur mycket kol som finns bundet i plasten?
- Vilka är Sveriges största källor till "tillgängligt" fossilfritt kol och hur stor mängd kol finns inom dessa?

- Är källorna tillräckligt stora för att täcka det förväntade framtida behovet av kol från plastproduktion?
- Hur hade försörjningen av kol till svensk plastproduktion kunnat se ut uppdelat på materialåtervinning, olika biobaserade kolkällor och infångad koldioxid?

1.3 Avgränsningar

Fokus ligger på framför allt fasta flöden där kolet är bundet i biologiskt material eller avfall men även insamling av koldioxid tas upp som alternativ. Utöver det gäller:

- Arbetet fokuserar på den plast som används inom Sverige. Att fokusera på användningen är intressant då det i slutändan är den som avgör hur mycket resurser ett land behöver. I Sveriges fall är importen och exporten ungefär lika stor men så hade inte behövt vara fallet.
- Biomassa från odling av åkermark skulle kunna vara en möjlig källa till kol för plastproduktion men är inte helt utan problem. Till exempel har det genom åren debatterats om hur användningen av grödor och åkermark för tillverkning av biobränslen och bioenergi påverkar matproduktionen och matpriserna. Runt mitten av 00-talet ökade priset på flera matvaror i olika delar av världen och debatten om matproduktion mot energigrödor tog fart och flera menar att ökad produktion och lönsamhet av energigrödor ökar priset på mat (Karlberg, 2007; Alexander och Hurt, u.å.). Det anses samtidigt finnas möjlighet att öka produktionen av energigrödor på åkerareal som av olika anledningar inte brukas och därmed inte skulle påverka tillförseln till samma grad (Naturvårdsverket, u.å.d). Kriget i Ukraina och en minskad export av grödor därifrån till följd av detta har gett liv åt debatten igen och frågan om mat eller energi är återigen aktuell (Hodgson and Terazono, 2022). Med anledning av dessa motsägelsefulla faktorer och svårigheter att bedöma hur balansen mellan produktion av mat och energigrödor ser ut i framtiden kommer inte kolpotentialen från jordbruket kartläggas. Potentialen hos restprodukter från jordbruket kommer att undersökas yttligt i senare delar av arbetet.
- Frågorna angående eventuell konkurrens om fossilfria kolatomer från andra sektorer, kostnader för fossilfri plast, samt vad för typ av styrmedel som hade krävts för att möjliggöra övergången från fossilt till fossilfritt är utanför ramen för denna uppsats. Dessa aspekter är alla högst relevanta vid en praktisk övergång och kommer kort redogöras för i diskussionen.

- Materialåtervinning till samma material antas vara mer effektivt ur systemsynpunkt än återvinning av kolatomer. Alltså att pappersavfall används till att producera nytt papper och plastavfall används till att producera ny plast i den mån det är tekniskt möjligt.
- Fokus i detta arbete är klimatpåverkan av plasticsystemet på grund av användningen av fossil råvara. Plast påverkar inte bara klimatet utan är även problematiskt ur miljösynpunkt. Stora mängder plast, både i form av makro och mikroplast, hamnar i naturen genom nedskräpning och läckage i värdekedjan. Utöver det används även en mängd olika kemikalier för att ge önskade egenskaper till materialet. Även om detta är viktiga aspekter för plastfrågan i sin helhet så hamnar det utanför ramarna för detta arbete.

1.4 Metod

Arbetet inleddes med en litteraturstudie för att skapa en förståelse för de system och processer som arbetet innefattar. Materialet samlades in från akademiska databaser såsom LUBSearch och Google Scholar, samt från olika branschorganisationers, intresseorganisationers och myndigheters hemsidor. Först undersöktes och kvantifierades dagens plastanvändning, avfallsflöden och biomassafloeden utifrån mängden kol i flödet. Därefter utformades scenarier över framtida plastanvändning med utgångspunkt i dagens användning, historiska trender och gjorda prognoser. Utifrån dessa scenarier samt förväntade kolflöden gavs sedan förslag över hur försörjningen av kol till svensk plastanvändning kan se ut.

2. Sveriges plastflöden

2.1 Plastanvändningen idag

Det här arbetet är avgränsat till den svenska plastanvändningen, vilken approximeras av mängden plastråvara som sätts på marknaden. I Sverige sattes 1,3 miljoner ton plastråvara på marknaden under 2019 vilket motsvarar ungefär 120 kg/person (Fråne *et al.*, 2022). Mängden plastråvara som satts på marknaden bygger på statistik från Statistiska centralbyrån (SCB) och har beräknats genom användandet av KN-koder samt definierats enligt sambandet import + produktion - export. Viss osäkerhet i datan finns då inte alla företag som importerar eller exporterar plast inom EU är uppgiftsskyldiga då de inte når specifika tröskelvärden men har uppskattats av SCB.

Utöver plastråvara som sattes på marknaden sattes även minst 0,7 miljoner ton plastprodukter på marknaden (Fråne *et al.*, 2022). Enligt Fråne *et al.* (2022) kan mängden råvara och produkt inte likställas då inte alla produkttyper inkluderats i rapporten. Produkter som inte rapporteras med samma KN-koder och mängden plast i dessa produkter då inte tas med statistiken, plastinnehållande produkter importerar, samt att råvaran används till produkter som därefter exporterar. Av den anledningen har mängden råvara som satts på marknaden använts som approximation för att uppskatta den svenska plastanvändningen. Denna uppskattning innebär att den svenska användningen är 120 kg/person och kan jämföras med den genomsnittliga användning inom EU som uppgick till 130 kg/person. Detta beräknas utifrån siffror på total plastanvändning (67 miljoner ton) och en befolkningensmängd i EU 2019 på 513 miljoner (OECD/Statista, 2022; Eurostat, 2019). Då per capita användningen för Sverige och EU är av liknande nivå antas 1,3 miljoner ton vara en rimlig uppskattning av Sveriges nuvarande plastanvändning.

2.2 Plastanvändningen 2050

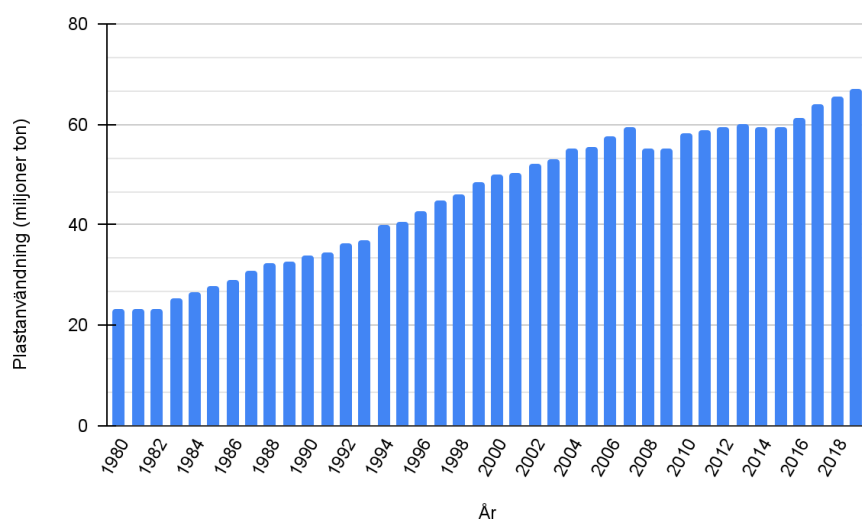
I denna rapport presenteras fyra scenarier för plastbehovet år 2050 vilka i sin tur konverteras till ett kolbehov. Det första scenariot, scenario A, är baserat på data över tidigare års plastanvändning. Det andra scenariot, scenario B, är baserat på prognoser för plastanvändning utifrån använd litteratur samt Sveriges förväntade befolkningensmängd år 2050. Det tredje scenariot, scenario C, är baserat på antaganden att samma per capita användning som idag bibehålls men tar hänsyn till prognoser av Sveriges beräknade befolkningensmängd år 2050.

Den motsvarande mängden kol som finns i plasten kommer också att presenteras parallellt. Den beräknas genom att anta ett medelvärde för plastics kolhalt, därmed läggs

ingen vikt vid olika plasttypers specifika kolhalt. Kolhalten i de vanligaste plasttyperna är runt 75% (Smeaton, 2021), och det är den siffran som används för att estimeras mängden kol som behövs för att tillgodose plastanvändningen.

2.2.1 Scenario A - hög tillväxt

I scenario A används data över tidigare års plastanvändning och ett antagande om att samma årliga tillväxt gäller ända fram till 2050. I figur 1 syns den årliga plastanvändningen i EU mellan 1980 och 2019. Då ingen långtidsdata hittades för Sverige så antas tillväxten kunna approximeras av tillväxten i EU.



Figur 1. Plastanvändning mellan 1980 och 2019 i miljoner ton inom EU. Data från (OECD/statista, 2022).

Medeltillväxten från år till år över hela perioden är 2,8% och medeltillväxten de tio sista åren, 2009-2019, är 2%. Scenario A kommer användas som högtillväxtscenario och 2,8% (Tillväxt_A) kommer därför att användas för att ge störst kontrast mellan olika scenarier. Den framtida användningen beräknas då enligt:

$$\text{Förväntad plastanvändning 2050} = \text{Plastanvändning 2019} * (\text{Tillväxt}_A)^{31}$$

Detta ger en framtida användning på **3 miljoner ton plast** motsvarande **2,3 miljoner ton kol** 2050, vilket motsvarar en 2.3x ökning. Värt att notera är att datan i figur 1 är hämtad från Statista och graden av tillförlitlighet är osäker då det inte är helt tydligt var datan kommer ifrån eller hur den är framtagen, bara det att den är från OECD. Den antas vara tillräckligt tillförlitlig för ändamålet då det finns flera andra osäkerheter när

framtida plastanvändning uppskattas. Data över just plastanvändning är överlag svår att hitta och det är därför EU data har använts för att uppskatta Sveriges historiska användning.

2.2.2 Scenario B - medel tillväxt

Scenario B är baserat på prognoser för plastanvändning 2060 som OECD har gjort, samt prognoser för svensk befolkningstillväxt. EU:s medlemsstater som är med i OECD, däribland Sverige, förväntas nästan dubbla sin per capita plastanvändning fram till 2060 från 2019 års nivåer enligt OECD:s basscenario (OECD, 2022). Enligt detta scenario kommer plastanvändningen för dessa länder öka med 90% till 2060 från 2019.

Scenariot baseras på att ingen ny policy införs rörande plast, ekonomisk tillväxt är den primärt drivande faktorn samt att marknadsdelen för återvunnen plastråvara ökar från 6% till 12%. Sveriges befolkning förväntas nå 12,3 miljoner år 2060 (SCB, 2023). Den totala svenska användningen 2060 kan då beräknas enligt:

$$\text{Plastanvändning 2060} = \text{Plastanvändning per person (2019)} * \text{Förväntad ökning av plastanvändning per person} * \text{Förväntad befolkning (2060)}$$

Detta ger en förväntad plastanvändning för 2060 på 2,8 miljoner ton som kan användas för att beräkna en årlig medeltillväxt (tillväxt_B) enligt:

$$(\text{Tillväxt}_B)^{41} = \text{Förväntad plastanvändning 2060} / \text{Plastanvändning 2019}$$

Den erhållna tillväxten på 1,9% används för att beräkna den förväntade plastanvändningen 2050 enligt:

$$\text{Förväntad plastanvändning 2050} = \text{Plastanvändning 2019} * (\text{Tillväxt}_B)^{31}$$

Detta ger den slutgiltiga förväntade användningen på **2,3 miljoner ton plast** eller **1,7 miljoner ton kol** 2050, vilket motsvarar en 1,8x ökning.

2.2.3 Scenario C - låg tillväxt

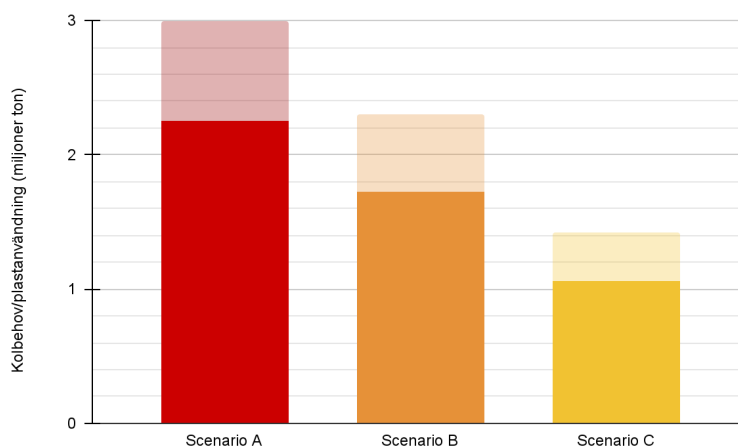
Det tredje scenariot är lågtillväxtscenario där användningen per capita antas stanna på ungefär samma nivå som idag genom implementering av olika policyer. Det allra första steget i avfallshierarkin är "förebygga" och innebär att minska mängden avfall som genereras genom olika metoder. En mindre mängd avfall som genereras innebär i sin tur att plastanvändningen minskar (Naturvårdsverket, u.å.a). I november 2022 kom till exempel ett förslag med målen att bland annat minska mängden onödiga förpackningar

och främja återbrukningsbara förpackningslösningar (Europeiska kommissionen, 2022). I detta scenario antas den totala plastanvändningen därför bara bero på den förväntade befolkningstillväxten enligt SBC. Med en förväntad befolkning på 11,8 miljoner år 2050, blir då den totala användningen **1,4 miljoner ton plast** eller **1,1 miljoner ton kol** vilket motsvarar en 1,1x ökning och en årlig tillväxt på 0,3%.

2.3 Summering av plastbehovet

Hur den faktiska tillväxten kommer att se ut går inte att säga, men scenarierna visar på ett möjligt spann för framtida plastanvändning. Idag har Sverige nästan dubbelt så hög användning som det globala medelvärdet på ungefär 60 kg/person och någon typ av stagnation hade kunnat förväntas. Samtidigt så använder USA ungefär 250 kg/person, 130 kg mer per person än Sverige, så en ökad användning är inte en orimlighet. Om man tittar på de två senaste kartläggningarna av plastanvändningen i Sverige så kan man se att det sattes mer råvara på marknaden 2016 än 2019 (Fråne *et al.*, 2022). Även om det såklart är för lite data för att visa på någon trend så skulle det kunna visa på viss stagnation av plastanvändningen i Sverige idag. Plastanvändningen kan också förändras genom att materialsammansättningen i produkter förändras. På så vis kan förändringar i plastanvändning ske utan att konsumtionsvanor ändras.

I figur 2 presenteras den förväntade plastanvändningen och det inbäddade kolet 2050 enligt de tre scenarierna. Mängden kol som behövs kommer i senare avsnitt att sättas i relation till mängden kol som återfinns i de fossilfria källorna. Mängden plastavfall som genereras antas vara proportionell mot plastanvändningen och scenario A-C kommer därför användas när mängden plastavfall uppskattas i kapitlet 3.2.3.

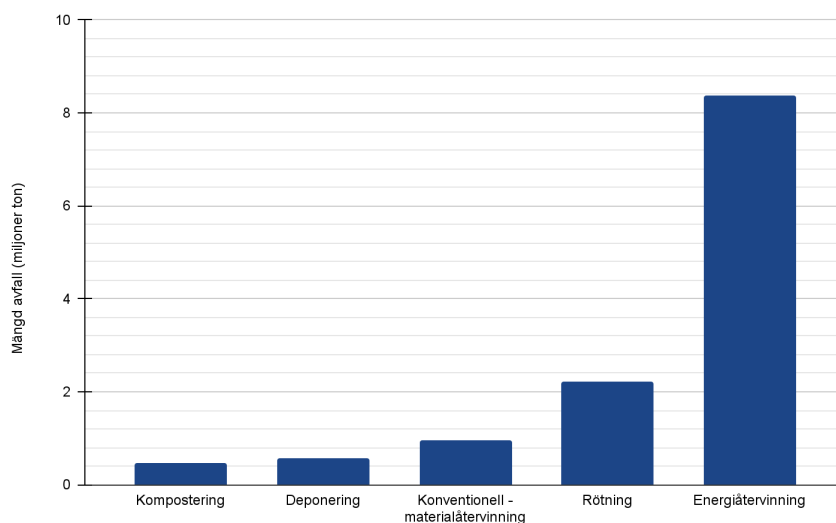


Figur 2. De hela staplarna visar mängden plast och de opaka staplarna visar mängden kol som behövs för att täcka det framtida plastbehovet enligt de olika scenarierna

3. Avfall

3.1 Sveriges avfall idag

År 2020 uppkom 35.7 miljoner ton avfall, exklusive gruvavfall, i Sverige (Naturvårdsverket, 2020). Avfallet består av både mineraliskt avfall som till exempel betong, metall och glas men även stora mängder kolinnehållande avfall som matavfall, träavfall, pappersavfall och plast. Det tillkommer också flera heterogena avfallsströmmar som blandat avfall, hushållsavfall och sjukvårdsavfall. Dessa kan bestå av flera olika typer av avfall, både mineraliskt och kolinnehållande. De avfallstyper som anses kunna ha en betydande mängd kolinnehållande avfall har summerats och sorterats utifrån vilken behandlingstyp som tagit emot avfallet. De fem största behandlingstyperna utifrån mängden mottaget kolinnehållande avfall presenteras i figur 3. Eftersom avfallsströmmarna sällan är homogena och smuts och felsortering kan förekomma så är siffrorna inte helt jämförbara ur kolinnehållsperspektiv.



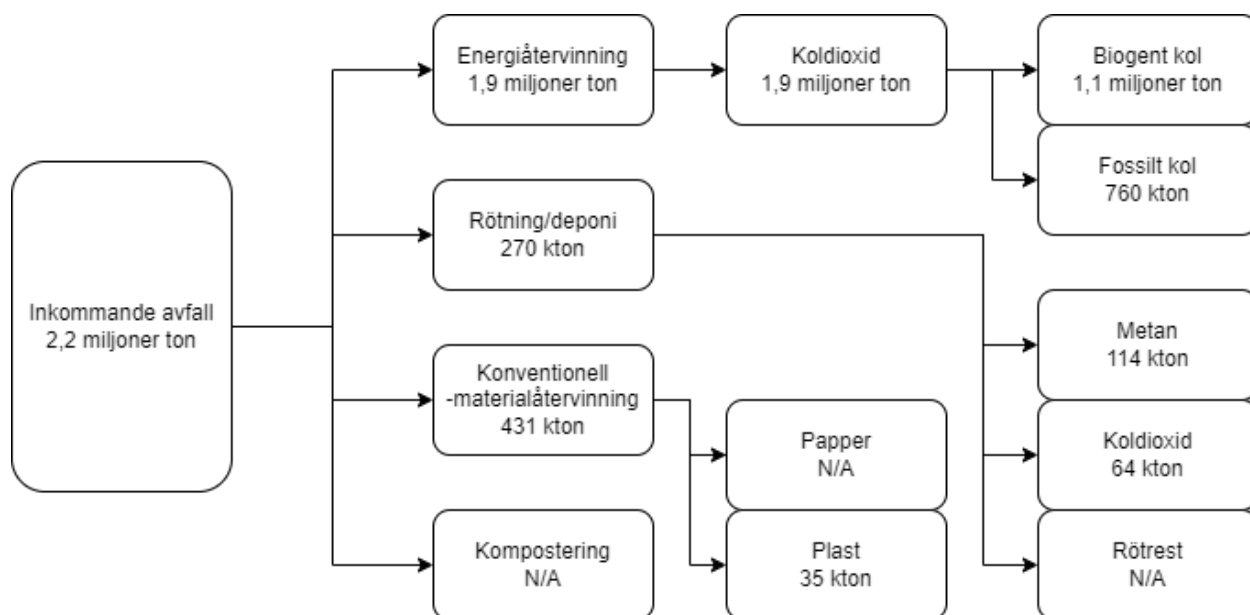
Figur 3. Mängden kolinnehållande avfall som tas emot vid respektive behandlingstyp. Data från Naturvårdsverket (2020).

De inkommande flöden som presenterats i figur 3 klassas alla som "ickefarligt avfall", men utöver detta finns även kolinnehållande flöden som är klassade som "farligt avfall". Det farliga avfallet inkluderas ej då det antas vara olämpligt som råvara för plastproduktion samt att mängden farligt avfall är försumbart i sammanhanget. Nedan beskrivs de olika behandlingstyperna och mängden kol i de avfallsflöden som hanteras kvantifieras. Även om ett avfallsflöde innehåller kol är det av olika anledningar inte säkert att flödet antas vara relevant för att använda till plastproduktion. Det kan bero på

både tekniska begränsningar och att avfallet används för annat syfte som anses vara en mer effektiv användning av materialet. Motivering för detta ges senare i avsnittet. Eventuellt gör tekniska förbättringar eller systemförändringar att flöden, som inte ansetts vara relevanta i detta arbete, är av intresse i framtiden och därför presenteras alla de största kolkällorna.

För att kvantifiera mängden kol i avfallssektorn är det ibland mer effektivt att undersöka utgående flöden, som till exempel mängden koldioxid som släpps ut i rökgasen, från de olika behandlingstyperna än de inkommande avfallsströmmarna. Anledningen till kvantifieringen görs "baklänges" för vissa behandlingstyper är på grund av de, ofta, heterogena flödena (som kan variera över tid, och geografiskt) och att mängden kol i olika typer av avfall inom respektive avfallsflöde hade behövt uppskattas i hög grad.

Figur 4 visar kolflöden inom avfallssektorn 2020. De flöden som inte ansetts lämpliga eller tillgängliga för plasttillverkning har markerats med "N/A". Alla flöden beskrivs mer utförligt i kommande delkapitel.



Figur 4. Mängden kol i avfallssektorn 2020 och dess största flöden. Figuren är baserad på omvandlingar och antaganden som gjorts i kapitel 3.1.

3.1.1 Energiåtervinning

Energiåtervinning innebär att avfallet förbränns i kraftvärmeanläggningar och att energi i form av el och värme utvinns samtidigt som koldioxid släpps ut i rökgasen. För att ta reda på hur mycket kol som finns i det avfall som behandlas genom energiåtervinning

kan man titta på mängden koldioxidutsläpp som uppkommer vid avfallsförbränning. Sverige rapporterar nämligen sina utsläpp till FN enligt klimatkonventionen UNFCCC och data över koldioxidutsläpp går därmed att hitta (Naturvårdsverket, 2022). Enligt Naturvårdsverket 2022 är de svenska utsläppen av fossila växthusgaser från avfallsförbränning 2,8 miljoner ton koldioxidekvivalenter 2020. Vid avfallsförbränning är 60% av växthusgasutsläppen 2019 av biogent ursprung och 40% av fossilt ursprung. Den totala mängden biogen och fossil koldioxid som släpps ut från svenska avfallsförbränningsanläggningar blir då 7,1 miljoner ton. Omvandlingsfaktorn för att beräkna mängden kol bundet i koldioxid är 0,27 ,från appendix. Den totala mängden kol i avfallet som behandlas genom energiåtervinning beräknas då till **1,9 miljoner ton**.

Den fossila andelen koldioxid från energiåtervinning antas härstamma exklusivt från plast (Naturvårdsverket, u.å.b). Fördelat på plastavfall (fossilt) och biogent avfall är mängden kol som behandlas genom energiåtervinning **0,8 miljoner ton** respektive **1,1 miljoner ton**. Genom att konvertera mängden fossilt kol till plast likt vi konverterat plast till kol tidigare fås att 0,8 miljoner ton kol motsvarar 1 miljon ton plast. Detta stämmer någorlunda väl överens med Fråne et.al (2022) som kartlagt att 1,1 miljoner ton plastavfall går till energiåtervinning (Frånes data är från 2019 och national inventory report 2022 är från 2020 men skiljer inte mycket från national inventory report 2021 där datan är från 2019)

3.1.2 Rötning samt deponi

Rötning är den avfallsbehandligstyp dit näst mest kolinnehållande avfall skickas för behandling. Rötning innebär att biologiskt nedbrytbart material behandlas och biogas, rötrest samt koldioxid bildas (Naturvårdsverket 2020). Störst mängd inkommande avfall är av typen "animaliskt och blandat matavfall" och därefter "gödsel och urin från djur". Totalt produceras 2.3 TWh biogas i Sverige. All biogas produceras inte från avfall, en betydande mängd produceras till exempel från avloppsslam på avloppsreningsverk, vilken uttryckligen inte ingår i avfallsstatistiken (Energigas Sverige 2023, Naturvårdsverket 2020). Trots att inte all biogas produceras från avfall kommer all biogasproduktion att presenteras under detta avsnitt istället för att biogas från avfall och biogas från andra källor ska presenteras i separata avsnitt. Även gas insamlad från deponi räknas in under rötning istället för att få ett eget avsnitt.

Mängden kol i biogasen som produceras i Sverige har beräknats genom att först omvandla 2.3 TWh till en ekvivalent volym biogas genom att använda tabellerat värmevärde för biogas. Biogas består innan eventuell upparbetning av ungefär 65 volym-% metan och 35 volym-% av koldioxid (Svenskt gastekniskt center [SGC] 2012). Mängden kol i respektive gas beräknades sedan med hjälp av respektive gas densitet samt förhållandet mellan gasernas och kols molmassa. Utförlig beräkning finns i

appendix. Utifrån dessa beräkningar är det totalt **178 kton** kol i den producerade biogasen, **114 kton** bundet i metan och **64 kton** bundet i koldioxid. Av den producerade biogasen facklas idag 9% bort av olika skäl. En del av biogasen som produceras vid deponier facklas bort då den innehåller luft som är svår att separera, och en del av biogasen facklas bort som överskottsgas (Energigas Sverige, 2022).

Utöver gaserna återstår en del kol i rötresten, nämligen 28-47% av rötrestens torrsvikt (Möller 2015). År 2021 producerades 3 miljoner ton (våtvikt) rötrest i Sverige med en genomsnittlig torrsubstanshalt på 12% (Energigas Sverige 2022). Det skulle innebära att det genomsnittligen finns **120 kton** kol i rötresten. Idag används 87% av rötresten som gödningsmedel för att cirkulera näringsämnen. Andelen kol i rötresten varierar dock beroende på hur biologiskt nedbrytbart substratet är. Siffran på 28-47% gäller för biogasproduktion från jordbruksrester och gödsel och behöver inte nödvändigtvis överensstämma helt med den genomsnittliga kolhalten i den totala mängden rötrest.

Även då det kan finnas betydande mängder kol kvar i rötresten lämpar det sig inte som substrat till plastproduktion dels för den låga torrhalten och dels för att den består av många andra ämnen. Kraven på inkommande substrat kommer att beskrivas i kapitel 6 där metoder för plastframställning beskrivs. Utöver att rötresten är en olämplig kolkälla för plastproduktion så främjar det kretsloppet av näringsämnen inom jordbruket (Salomon och Wivstad, 2013). Av dessa anledningar kommer rötresten därför inte tas med i den slutgiltiga summeringen av tillgängliga kolflöden.

3.1.3 Konventionell materialåtervinning

Vid konventionell materialåtervinning återvinns det insamlade avfallet till samma material. Av de kolinnehållande avfallsfraktionerna dominerar pappers och pappavfall på 0,9 miljoner ton och därefter plast på 46 kton.

Den största mängden kolinnehållande avfall som går till konventionell materialåtervinning är papper och papp. Papper kan ha lite olika sammansättning beroende på kvalitet och syfte, men består till nästan 100% av lignocellulosa. Vanligt skrivpapper består till 85-99% av cellulosa och resten lignin medan tidningspapper har större andel hemicellulosa och lignin (Sun and Cheng, 2002). Cellulosa har den kemiska formeln $(C_6H_{10}O_5)_n$ och molmassan 162 g/mol. Tillsammans med molmassan för kol kan massförhållandet mellan kol och cellulosa beräknas till 0.44. Hemicellulosa och lignin har en mer komplicerad kemisk struktur men kommer att antas ha samma massförhållande som cellulosa. Genom att anta 100% lignocellulosa i pappret beräknas mängden kol till **0,4 miljoner ton**.

Som nämnt i avgränsningen antas materialåtervinning till samma material vara mest effektiv ur systemperspektiv. Samtidigt finns det EU mål kring grad av återvinning av olika avfallstyper, till exempel finns det mål om att papp och kartong ska återvinnas till 85% 2030 (Europaparlamentet, 2018). Material som inte är plast kommer därför inte att ses som en kolkälla (så länge kvaliteten är hög nog för att återvinnas till ny produkt) i detta arbete. När returpapper inte längre är tjänligt för återvinning går det till energiåtervinning och är då av intresse som möjlig kolkälla. Om förbränningen sker i anslutning till pappersbruken eller om det hamnar som avfall (och då statistikförs som avfall) och sen energiåtervinns är oklart.

Mängden kol i det plastavfall som går till konventionell materialåtervinning beräknas enligt samma metod som i föregående avsnitt, alltså att kolmängden i plast är 75%. Av de 46 kton plastavfall som går till konventionell materialåtervinning är den motsvarande mängden kol **35 kton**. Till skillnad från papper så är plaståtervinning en mycket lämplig källa och leder till ökad cirkularitet. Utöver det så är förhållandet mellan de olika ämnen som plasten består av mer lämpade för plastproduktion än om man använder andra material. Det är redan rätt ämnessammansättning så att säga.

Totalt går **0,4 miljoner ton** kol till konventionell materialåtervinning men endast kol i plasten antas vara lämplig för plastproduktion ur systemperspektiv.

3.1.4 Kompostering

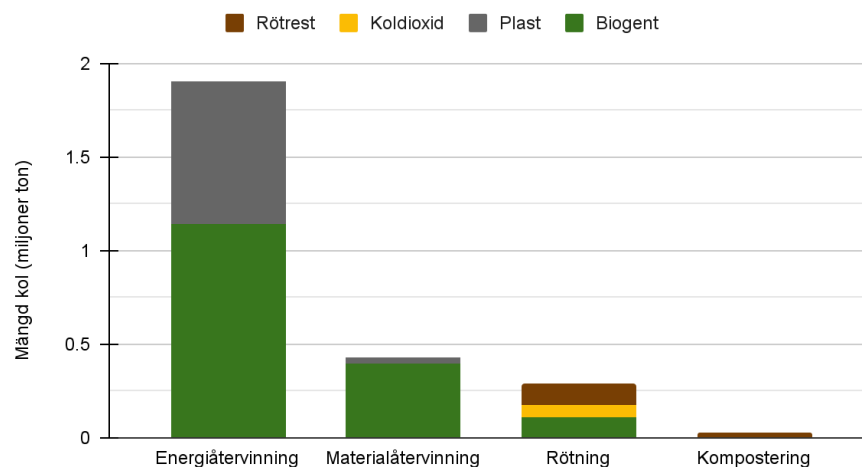
Kompostering innebär att avfallet används som jordförbättring och tar emot liknande avfallstyper som rötning gör. Då den totala mängden avfall som går till kompostering är förhållandevis liten (se figur 1) antas posten inte ha så stor betydelse för den totala mängden kol som hittas i avfallssektorn. Av den anledningen kommer några antagande göras om andelen kol i det inkommande avfallet. Det första är att andelen är samma som för rötning och det andra är att "samrötning" bara tar emot avfall som rötkälla. Samrötning står för ungefär hälften av energin och då hälften av kolet. Andelen kol i det avfall som rötning tar emot blir då 6% beräknat genom att dividera mängden kol som samrötning står för och totala mängden inkommande avfall. Det ger en total mängd kol på **30 kton** till kompostering.

Av samma anledning som för rötresten i 3.1.2 kommer kompostering inte att tas med i de slutgiltiga summeringarna.

3.1.5 Grafisk summering av 3.1

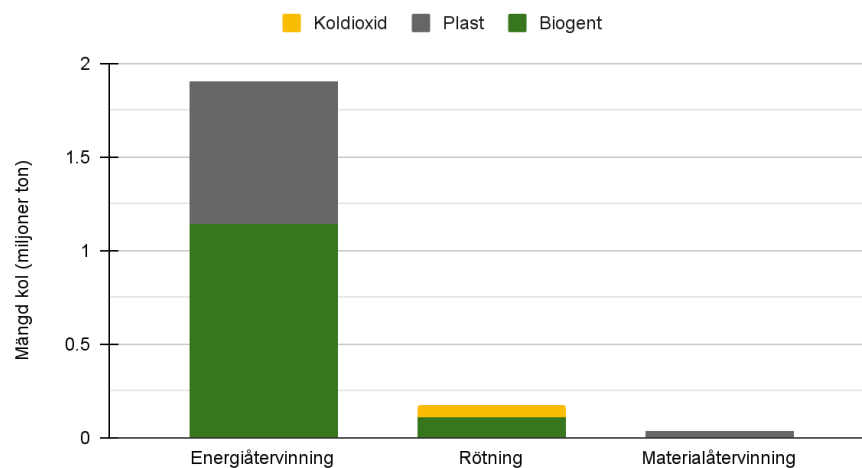
Figur 5 visar de idag största källorna till kol inom avfallssektorn fördelat på behandlingstyp. Figur 6 visar samma sak som figur 5 exklusive rötrest, papper och kompostering då dessa inte ansetts lämpliga eller att de ansetts ha ett annat, mer effektivt användningsområde.

Kolflöden inom avfallssektorn 2019



Figur 5. Mängden kol inom avfallssektorn fördelat på avfallsbehandlingstyp.

Tillgängliga kolflöden inom avfallssektorn 2019



Figur 6. Mängden kol inom avfallssektorn fördelat på avfallsbehandlingstyp, exklusive de flöden som inte ansetts vara tillgängliga för plastproduktion.

3.2 Sveriges avfall 2050

Den här delen utgår utifrån trender, mål eller projektioner för avfall som finns i litteraturen. Där inga tydliga trender, mål eller projektioner kan hittas för en viss avfallstyp antas tillväxten följa befolkningstillväxten. Eftersom den totala mängden uppkommet plastavfall antas följa plastanvändningen enligt scenario A-C behandlas plastavfallet under separat avsnitt och inte under respektive avfallsbehandlingstyp. De biogena avfallsflödena behandlas fortfarande under respektive avfallsbehandlingstyp.

3.2.1 Biogent avfall - Rötning, deponi och kompostering

Då dessa behandlingstyper i stor mån har liknande sammansättning av inkommande avfall (rötning och kompostering) eller liknande produkt (rötning och deponi) kommer de att behandlas under samma avsnitt. För att göra det enklare summeras alla under benämningen rötning i grafer som presenteras längre ned.

Mängden producerad biogas från deponier har minskat och förväntas fortsätta minska sedan deponi av organiskt material förbjöds 2005 (Energigas Sverige, 2022). Enligt Energigas Sverige (2022) så används deponigasen framför allt lokalt eller så facklas den bort då metanhalten är för låg. Av dessa anledningar antas mängden användbar biogas från deponi vara noll eller nära noll 2050.

Enligt Naturvårdsverket (2022) så ökar mängden avfall som går till rötning medan mängden avfall som går till kompostering minskat. Från 2018 till 2020 ökade rötning med 10% medan kompostering minskade något.

Den tekniska potentialen för biogasproduktion från avfall, gödsel och restprodukter uppskattas vara 4-5 TWh 2030 (Energigas Sverige och Fossilfritt Sverige, 2020). Den totala svenska biogaspotentialen från avfall, slam och rester (exklusive odlingsrester från jordbruket) uppskattas till 5.4 TWh (Börjesson, 2016). Till 2050 antas den fulla potentialen kunna uppnås och mängden kol beräknas då genom tidigare metod till **418 kton** varav **267 kton** i metan och **151 kton** i koldioxid.

3.2.2 Biogent avfall - Energiåtervinning

I kapitel 3.1.1 presenterades att 1,1 miljoner ton kol uppkom från biogena källor vid avfallsförbränning 2019. Av de inkommande avfallstyperna till energiåtervinning kan "blandat avfall", "hushållsavfall och liknande", "träavfall" samt "sorteringsrester" alla innehålla biogent avfall. Av dessa är det enda rent biogena avfallsflödet "träavfall", de andra är heterogena flöden som kan innehålla bland annat biogent avfall men även

plastavfall och mineraliskt avfall. Träavfall uppstår framför allt vid olika typer av byggprojekt och kan innehålla snickerier, pallkragar, lister, plankor (Ragn Sellis, u.å.). Blandat avfall och hushållsavfall kan till exempel innehålla biogent kol från trädgårdsavfall, kontorspapper, möbler, kläder, kuvert och kladdiga förpackningar (Hylte kommun, 2022; Naturvårdsverket, u.å.c). Hur tillväxten av den biogena fraktionen inom dessa avfallstyper kommer att se ut är svårt att säga då litteratur och data ofta saknas. Tillväxten för de avfallsströmmar som innehåller biogent kol antas därför följa befolkningstillväxten.

Med den förväntade årliga befolkningstillväxten på 0,3% blir den totala mängden biogent kol från energiåtervinning **1,3 miljoner ton**.

3.2.3 Plastavfall 2050

Mängden plastavfall som uppkommer i Sverige antas endast bero på mängden plast som används under samma period. Detta är en förenkling då inte all plast som sätts på marknaden blir till avfall samma år utan det är viss förskjutning, till exempel kan det dröja många år innan plast i bilar och byggnader blir till avfall. För att uppskatta mängden plastavfall som uppkommer 2050 antas förhållandet mellan plastanvändning och uppkommet avfall vara konstant. Mängden uppkommet avfall ökar då med samma faktor som respektive scenarios plastanvändning ökat.

Av det plastavfall (och gummiavfall) som behandlades 2020 materialåtervanns 120 kton, 1,1 miljoner ton energiåtervanns och 76 kton används som bränsle i cementindustrin (Fråne *et al.*, 2022). Totalt blir det 1,3 miljoner ton plastavfall. Det är inte allt plastavfall som behandlas i Sverige som har uppkommit i Sverige utan 300 kton plast i anmälningspliktigt avfall till energiåtervinning samt 115 kton informationspliktigt plastavfall, även kallat grönlistat avfall, importerades från framför allt Norge och Storbritannien (Fråne *et al.*, 2022). Samtidigt exporterades 126 kton grönlistat avfall ut ur Sverige. Det betyder att den mängd plastavfall som uppkom i Sverige var ungefär **1 miljon ton**. Eftersom det importerade avfallet inte beror på Sveriges plastanvändning kommer det inte heller att räknas med i detta arbete då det inte riktigt kan klassas som ett svenskt flöde. Värt att notera är att Fråne *et al.* (2022) nämner att det finns ganska mycket osäkerheter i datan, bland annat finns det oklarheter i om smuts, fukt och felsorterat material räknats med eller inte vilket påverkar resultatet.

Från kapitel 2.2 har vi sett att i scenario A ökar användningen 2,3x gånger jämfört med 2019 och för scenario B och C är motsvarande siffra 1,8x och 1,1x. Mängden plastavfall samt korrelerade mängden kol uppskattas genom att multiplicera respektive faktor med 1 miljon ton. Den förväntade mängden plastavfall 2050 för respektive scenario

presenteras i tabell 2.

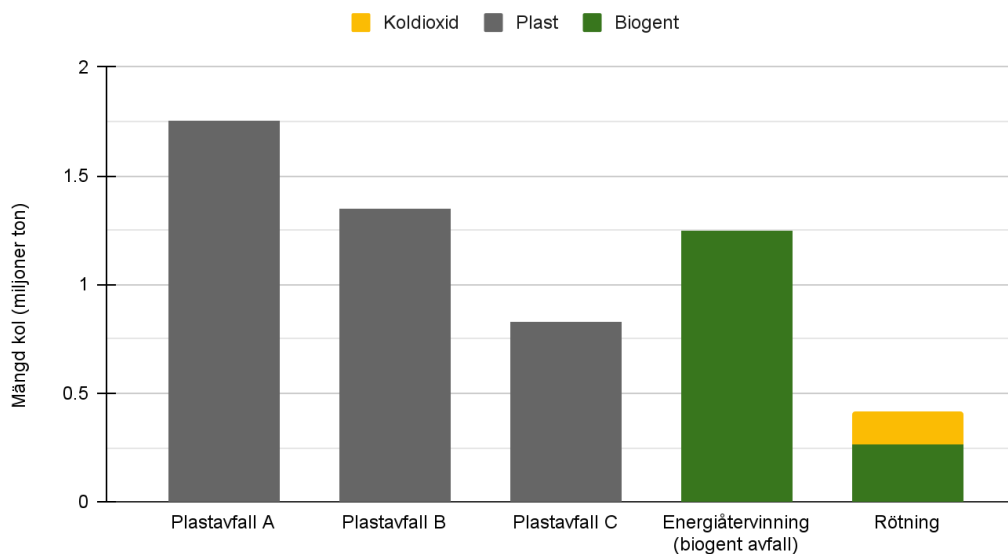
Tabell 2. Beräknad mängd plastavfall för respektive scenario samt korrelerad mängd kol.

Scenario	Mängd plastavfall uppkommet i Sverige (miljoner ton)	Mängd kol bundet i samma mängd plast (miljoner ton)
A	2,3	1,8
B	1,8	1,4
C	1,1	0,8

3.2.4 Grafisk sammanställning av 3.2

I figur 7 presenteras de förväntade framtida kolflödena inom avfallssektorn. Då mängden plastavfall förväntas bero på plastanvändningen finns en stapel för respektive scenario A-C. De största kolkällorna förväntas finnas i plastavfall och den biogena delen av avfall som energiåtervinns.

Kolföden inom avfallssektorn 2050

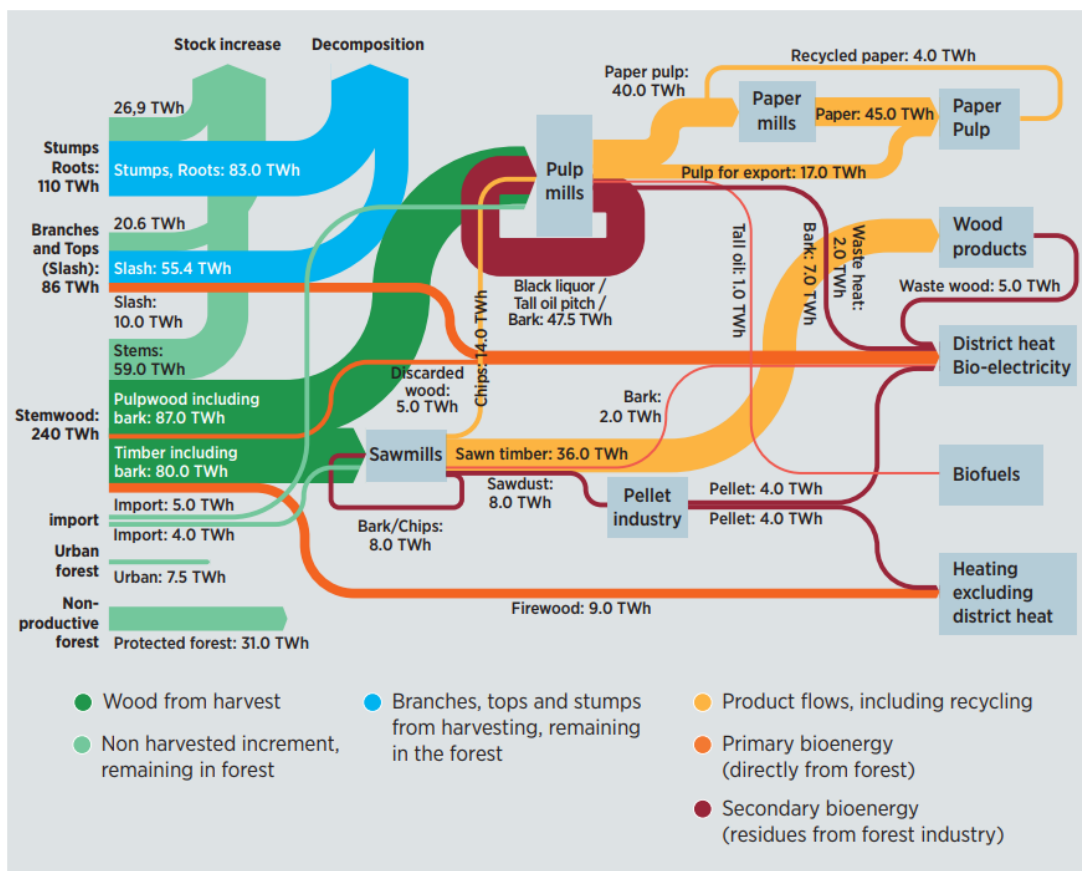


Figur 7. Den förväntade mängden kol inom avfallssektorn 2050.

4. Skogsindustrin

4.1 Skogsindustrin nutid

Sverige har stora mängder skog och en väl utvecklad skogsindustri. 70% av Sveriges yta täcks idag av skog och Sverige är världens fjärde största exportör av trävaror, massa och papper (Skogsindustrierna, 2023). I figur 8 visas tillväxten av skog år 2015 och flöden av olika trävaror inom sektorn, presenterat som energi. Den avverkade skogen 2015 motsvarade 329 TWh eller 75% av samma års totala tillväxt, vilket innebär en nettoökning av skogsförråden (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2019). De röda och orangea pilarna är flöden som går till energiutvinning, de mörkgröna och gula pilarna visar flöden som går till produkter, de blå pilarna är avverkade flöden som lämnas kvar i skogen och de ljusgröna pilarna är oavverkad skog.



Source: Svebio analysis of data from Statistics Sweden (SCB), Swedish Energy Agency (SEA), Swedish Forest Industries (Skogsindustrierna), Swedish Forest Inventory, SLU, Swedish Pellets Council (Pelletsförbundet) and others (2018)

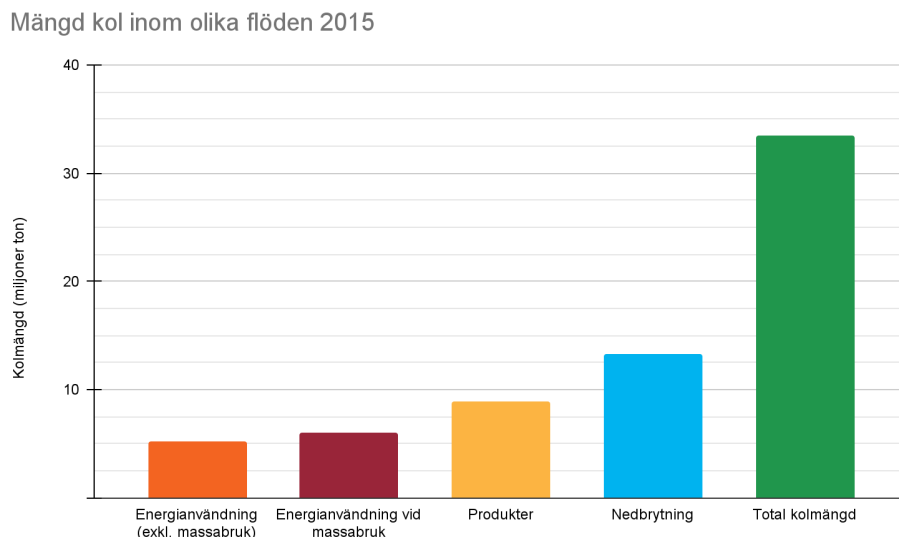
Figur 8. Biomassflöden i svensk skog 2015. Bildkälla: IRENA, 2019

Den mest värdefulla delen av trädet, den nedre delen av stammen, går till sågverken medan den övre, tunnare delen av stammen går till massabruken (IRENA, 2019). Av den mängd massaved och timmer som går till massabruken och sågverken är det bara runt 50% av materialet som blir till produkter, resten blir till bi- och restprodukter. Den stora mängden bi- och restprodukter består av bland annat spillbitar och sågspån från sågverken samt hemicellulosa och lignin från massabruken där framför allt cellulosan i träet går till pappersmassa. Bi- och restprodukterna används framför allt för att täcka sågverkens och massabrukens interna energibehov i form av el och värme (IRENA, 2019). Utöver bi- och restprodukter går en del grot, som är en förkortning av "grenar och toppar", samt avvisad massaved till energiproduktion, här främst till extern el och värmeproduktion. Grot och stubbar lämnas i stor utsträckning kvar i skogen för att förmultna. Detta görs delvis av ekologiska skäl men primärt då grot är en lågvärdig produkt och att det inte alltid är ekonomiskt lönsamt att ta ut den (Fossilfritt Sverige, 2021).

De flöden som presenterats är kvantifierade i energitermer. För att visa de korrelerade kolflödena måste omvandlingar göras. Trä kan ha olika värmevärde beroende på vilken del av trädet man tittar på (till exempel bark eller kärnträ), vilken form träet är i (till exempel flis eller sågspån) samt träets fukthalt (Ringman, 1995). På grund av detta är det svårt att göra exakta omvandlingar utefter varje flödes sammansättning. För att förenkla antas samma värmevärde kunna användas oavsett del eller form av trä som flödet avser. Massabruken använder till stor del biprodukterna svartlut och tallbeck som energikälla. Dessa har inte samma karaktär som de "rena" träbränslena och beräknas med annan metod för inte påverka resultatet lika mycket om antagandet som görs för övriga flöden inte stämmer för massabrukens interna energiflöde.

Barrträ, vilket utgör majoriteten av svenskt trä, har ett genomsnittligt kolinnehåll på 51% av den torkade vikten (Lamlom och Savidge, 2003) och värmevärdet för torkat trä är 5.3MWh/ton (Forest Research, u.å.). Med antagande om att kolinnehåll och värmevärde gäller för alla flöden blir den totala mängden kol (exklusive massabrukens interna användning av svartlut och tallbeck) som ingår i den avvertrade skogen är **27 miljoner ton kol** fördelat över produkter, nedbrytning och energiproduktion. Från de 23 svenska massabruk med utsläpp större än 300 kton biogen koldioxid 2017 var utsläppen 22,2 miljoner ton koldioxid totalt samma år (Energimyndigheten, 2021). Detta är en viss underskattning när man tittar på alla svenska massabruk men förväntas inkludera majoriteten av utsläppen. Enligt Energimyndigheten (2021) stod hälften av de anläggningar som hade koldioxidutsläpp större än 100 kton 2018 för 80% av de totala utsläppen från massabruken. Genom att använda omvandlingsfaktorn 0.27 blir mängden kol i form av biogen koldioxid vid massabruken **6 miljoner ton**.

I figur 9 visas storleken på skogsindustriens kolflöden fördelat över olika värdekedjor.



Figur 9. Ungefärlig fördelning av skogens kolflöden idag. Alla flöden är inte tillgängliga för plastproduktion.

Det är inte allt kol som presenteras i figur 9 som är "tillgängligt" för plastproduktion. Kolet bundet i produkter samt grot och stubbar som lämnas för nedbrytning anses till exempel ha begränsad tillgänglighet. Kol bundet i produkter är inte relevant för plastproduktion, delvis för att atomerna är "upptagna" samt att de produkter som stannar i Sverige i sinom tid blir till avfall vilket hade lett till viss dubbelräkning om produkter hade inkluderats. Av de pappers-, massa- och träprodukter som produceras är det endast 15% som stannar inom Sverige medan 85% exporteras (Svensson *et al.*, 2023). Dubbelräkningen om man tittar på flödet "produkt" hade därför inte varit allt för stort men kolet anses ändå inte vara tillgängligt. Den potentiella mängden grot och stubbar som hade kunnat tas ut ur skogen ur teknisk, ekonomisk och ekologisk synpunkt är begränsad men 50% av grot och 20% av stubbar hade kunnat tas ut utan att skada den biologiska mångfalden (IRENA, 2019). Det motsvarar ungefär **4 miljoner ton kol** enligt tidigare antaganden.

Ungefär samtidigt som jag slutförde mina omvandlingar av IRENA:s (2019) kartläggning av energiflöden inom skogsindustrin blev jag varse om en kartläggning av biogena kolflöden inom Sveriges skogsvärdekedjor av Svensson *et al.* (2023) som hade avslutats kort dessförinnan. I kartläggningen uppskattades mängden kol inom sektorn, exklusive grot och stubbar som lämnas i skogen, till 19 miljoner ton. Samma siffra utifrån IRENA (2019) och mina omvandlingar är också 19 miljoner ton kol. Störst skillnad är det i rapporterade mängden importerat virke där Svensson *et al.* (2023)

presenterat 1,9 miljoner ton kol och mina beräkningar gett 0,9 miljoner ton, vilket skulle kunna förklaras av olika importvolymmer 2015 och 2020. I tabell 2 presenteras en jämförelse av värden mellan mina uppskattningar som utgår ifrån IRENA (2019) och de från Svensson et al (2023), även om de är baserade på olika års avverkning.

Tabell 2. Mängd kol inom respektive flöde

Rapport	Svensson et al (2023)	IRENA (2019) + egna omvandlingar
Avverkningsår	2020	2015
Energi (exkl massabruk)	5,5 miljoner ton kol	5,2 miljoner ton kol
Energi till massabruken	6,6 miljoner ton kol	6,1 miljoner ton kol
Produkter	10,7 miljoner ton kol	8,9 miljoner ton kol
Totalt	22,8 miljoner ton kol	20,2 miljoner ton kol

Eftersom värdena är i samma storleksordning antas de mängder kol jag kommit fram till vara rimliga och kommer att användas fortsättningsvis.

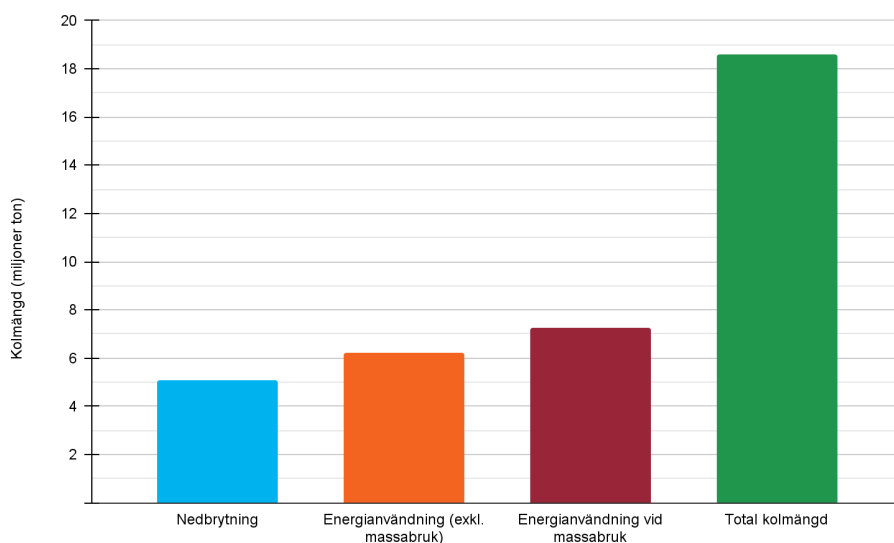
4.2 Skogsindustrin 2050

Hur de kolflöden som hittas inom skogsindustrin kommer att se ut 2050 kommer främst att baseras på prognoser och rapporter från industrin och intresseorganisationer. För att förenkla antas förhållandet mellan de kolflöden som presenterats i kapitel 4.1 vara samma 2050 som idag och alla flöden antas öka i samma takt som den totala avverkningen.

Som tidigare nämnts så är den årliga tillväxten i skogen i dagsläget större än den årliga avverkningen och en nettoökning av skogslagret råder. Det finns alltså utrymme att öka avverkningen något till följd av minskad lagerökning. Alternativt kan avverkningen ökas utan att påverka lagerökningen om den årliga tillväxten ökar, till exempel genom ökad gödning inom skogsbruket eller de stigande temperaturerna till följd av klimatförändringarna (IRENA, 2019). Samtidigt finns en oro att ett varmare klimat samt ett ökat skogsbruk ökar spridningen av till exempel svampsjukdomar i skogen (Sveriges lantbruksuniversitet[SLU], 2023). Sjukdomar kan i sin tur minska tillväxten inom skogen.

Prognosen för mängden avverkad skog 2050 är ungefär 98 skogskubikmeter vilket, jämfört med avverkningen 2015 på ungefär 81 skogskubikmeter, innebär en ökning på cirka 20% (SLU, 2016). Skogsstyrelsen visar lite högre siffror på avverkningen vilket troligen beror på att de använder andra metoder för att beräkna avverkningen, oavsett vad skillnaden beror på så är trenden en ökning av både tillväxt och avverkning (SLU, 2016; Skogsstyrelsen, u.å.). Alla de kolflöden som presenterats i kapitel 4.1 antas därför att öka med 20% till 2050.

Som nämnts i kapitel 4.1 anses inte alla flöden som presenterats som "tillgängliga". De flöden som anses "tillgängliga" är alla de som går till energi på ett eller annat vis samt en andel av grot och stubbar som lämnas kvar i skogen för nedbrytning. I figur 10 presenteras den förväntade storleken på de kolflöden som anses "tillgängliga" 2050.

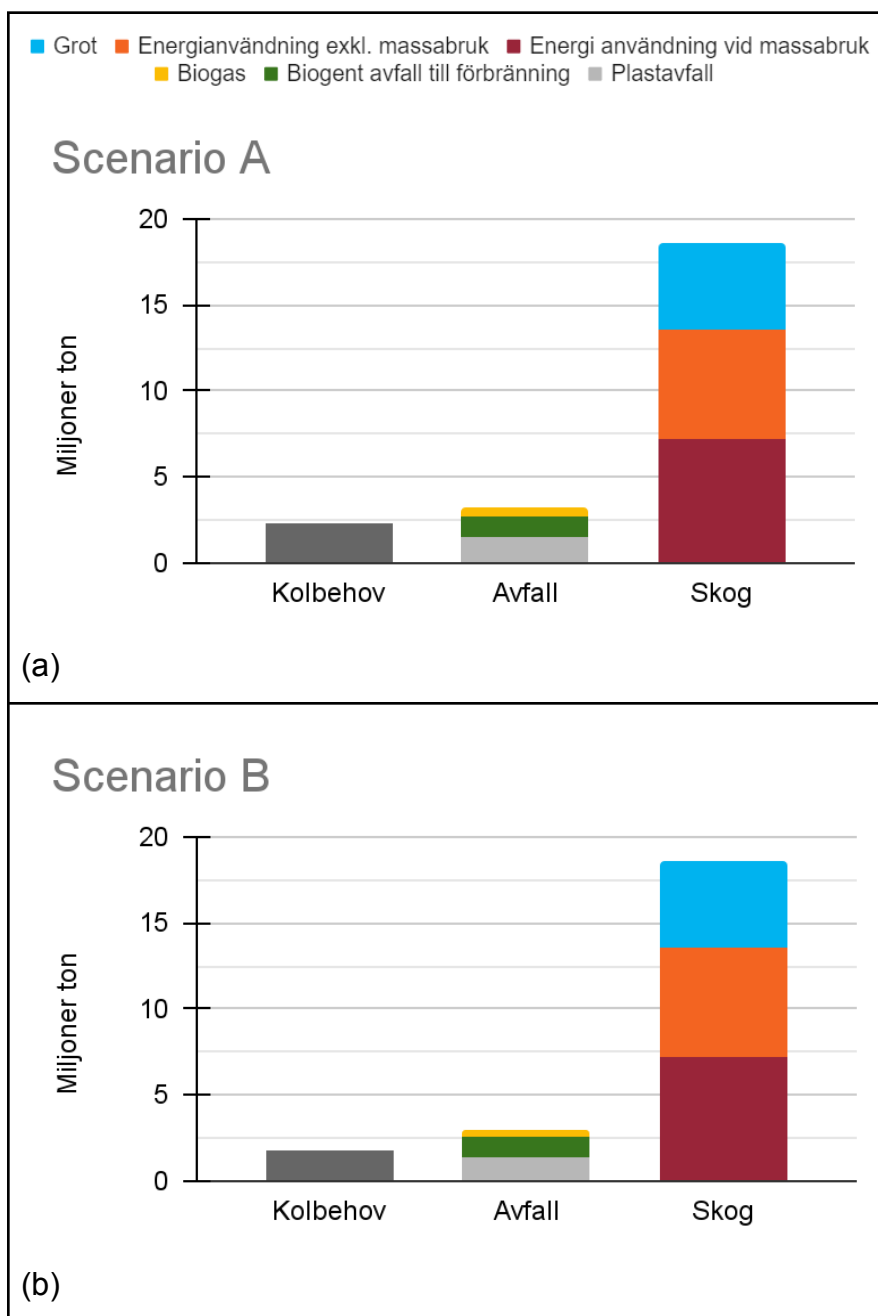


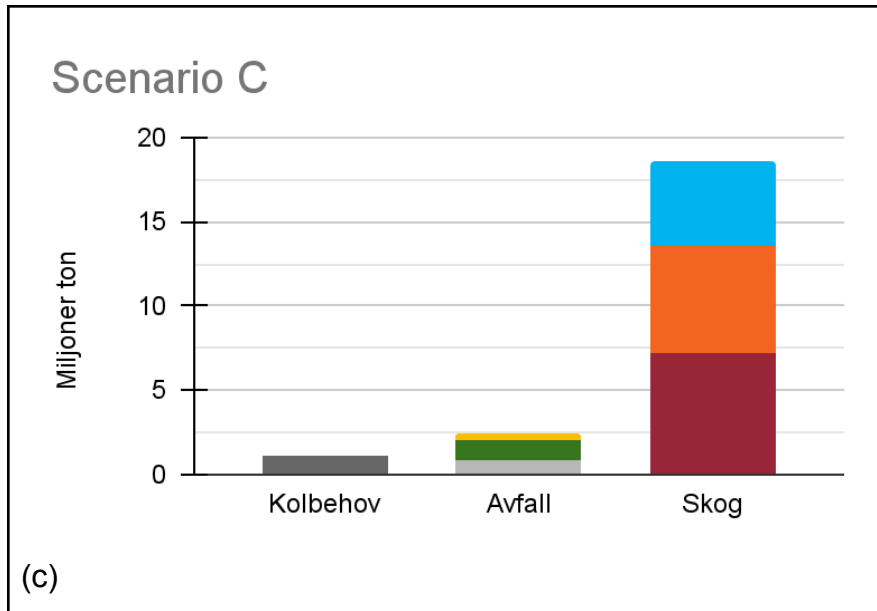
Figur 10. Mängden kol inom skogsindustrins "tillgängliga" flöden 2050 fördelat över de primära flödena.

Värt att notera är att avverkningen av skogen är ett omdiskuterat ämne och vad ekologiskt hållbart skogsbruk är finns oenigheter kring. Om ökad avverkning, eller för den delen dagens avverkning, ryms inom ramen för framtida miljömål är inte helt klart (Material Economics, 2021). Det betyder att värdena som presenteras i figur 10 kan vara en överskattning och bör tas med en nypa salt. Graden av avverkning kan bero mycket på hur framtida miljömål och regelverk utformas.

5. Samlat resultat över behov och källor

I figur 11 visas den samlade bilden av mängden kol som behövs för att täcka plastanvändningen samt mängden tillgängligt kol inom avfallssektorn och skogssektorn, alla värden är baserade på förväntade mängder 2050.





Figur 11. (a-c) Kolbehovet för scenario A-C samt tillgängliga kolflöden från avfalls- och skogssektorn.

“Biogas” inkluderar både kolet i koldioxiden och i metanet. Alla flöden är inte direkt tillgängliga som råvara, speciellt det som går till energi vid massabruken då detta till största del består av svartlut från massatillverkningsprocessen. I detta fall är kolet framförallt tillgängligt som koldioxid från rökgasen men metoder för att utvinna lignin från svartluten utvecklas och kan i framtiden eventuellt göra att kolet är tillgängligt i utvunnet lignin istället.

6. Metoder för återvinning av kolatomer

Det finns en mängd olika produktionsmetoder för att gå från kolråvara, i form av avfall, koldioxid eller biomassa, till plast. De som anses vara mest relevanta och tekniskt mogna presenteras i kapitel 6.1-6.4. De metoder som tagits med är mekanisk plaståtervinning, kemisk återvinning i form av pyrolys och förgasning, och till sist insamling av koldioxid från punktkällor. De tekniska begränsningarna som finns på inkommande material samt energibehovet presenteras nedan, för de valda metoderna. Energitillbehovet för elektrolys presenteras i kapitel 6.4 då vissa metoder/inkommande material kommer behöva tillsats av vätgas.

För att få en jämförbar bild över de olika metodernas energiåtgång kommer de generella processtegen för att gå från "råvara" till "ny plast" inkluderas. I och med den stora mängden olika plastsorter som finns kommer ett medelvärde mellan polyeten (PE) och polypropen (PP) användas i de processteg där det är relevant. PE och PP har valts då de är några av de vanligaste plastsorterna (Palm et al, 2016). Det medelvärde för processenergi för PE och PP som fortsatt används i denna uppsats kommer baseras på processvägarna presenterade av Palm et al 2016 samt viktas utifrån förhållandet mellan totalt kolinnehåll hos PE och PP. Eventuell energiåtgång vid transporter av avfall, flis, koldioxid etc. kommer inte att inkluderas, utan antas vara lika för alla metoder. Vid vissa processer bildas även biprodukter som är ointressanta för plastproduktionen men då kolet är kvar i biprodukterna och då dessa antas vara användbara i andra sammanhang kommer energibehovet allokteras jämnt mellan produkt och biprodukt. För de processteg där ingen information om förhållandet mellan primärprodukt, oreagerad reaktant och biprodukt finns så antas 85% koleffektivitet.

6.1 Mekanisk återvinning av plastavfall

Vid mekanisk återvinning sker ingen större kemisk förändring i plastavfallet, och det är heller inte alla typer av plast som kan återvinnas på detta sätt. I princip alla termoplaster kan återvinnas mekaniskt, vilket inkluderar till exempel polyeten (PE), polypropen (PP) och polyvinylklorid (PVC) (Plastics Europe, u.å.). Det finns flera processteg vid mekanisk återvinning och innefattar bland annat att insamlat plastavfall sorteras, tvättas, rivs ner och återgranuleras för att sedan kunna bli nya plastprodukter. Vilka steg som krävs och i vilken ordning beror på plastavfallet och anläggningen. Till exempel är plastavfall från industrin ofta renare än från konsumenter, både när det kommer till smuts och innehåll av olika plasttyper (Ragaert et al., 2017). Kvaliteten på den "nya" plasten beror bland annat på hur väl sorterad plastavfallet är då plastens egenskaper kan förändras när olika plasttyper blandas. Plastens kvalitet minskar också med upprepad återvinning då polymerkedjorna kan brytas och bindas om på grund av den

termiska och mekaniska stress plasten utsätts för under processen (Ragaert et al., 2017).

Energibehovet vid mekanisk återvinning är 0.53 MWh/ton färdig plastgranulat. Processen är inte fri från förluster, för 1 ton ny plastgranulat går det åt 1,5 ton plastavfall vilket innebär en 66% koleffektivitet om avfallet antas vara fritt från andra föroreningar (Jeswani et al., 2021). Det avfall som sorterats ut kan sedan skickas till förbränning med energiproduktion eller eventuellt till kemisk återvinning.

6.2 Termokemiska metoder

6.2.1 Pyrolys (kräver homogena flöden, PE, PP, PS)

Pyrolys innebär att organiskt material bryts ner termiskt utan tillgång till oxideringsmedel såsom koldioxid, syre eller vattenånga. Processen sker mellan 300°C och 850°C och påverkas av en rad olika processparametrar som till exempel tryck och katalysatormaterial. Nedbrytningsprodukterna och förhållandena mellan dem skiljer sig beroende på olika processparametrar och vilken typ av råmaterial som används. Generellt kan nedbrytningsprodukterna delas in i fasta (kol, aska och föroreningar som glas och metall), flytande (blandning av kolväten även kallat pyrolysolja) och gasformiga ämnen (kolmonoxid, koldioxid, metan och vätgas)(Shah et al., 2023).

Fördelningen mellan fast, flytande och gasformig produkt varierar som sagt, men det går att nå hög andel pyrolysolja med framför allt PE, PP och PS som råvara. Andelen olja kan nå 97 vikt% i vissa fall och ofta runt 80-90 vikt% med noll eller nära noll procent fast material (Shah et al., 2023). Andelen pyrolysolja i förhållande till fast och gasformig produkt antas vara 85% av vikten i detta arbete.

Pyrolysoljan kan sedan ersätta naftan som råvara vid krackning i konventionell plastproduktion. För att det ska funka effektivt krävs att pyrolysoljan är fri från kontamination som svavel och klor samt att syrehalten är så låg som möjligt (Roosen et al., 2020). De plastsorter som bäst lämpar sig till pyrolys är polypropen (PP), polyeten (PE) och polystyren (PS) (Cañete Vela et al., 2022). Den gasformiga andelen kan förbrännas men kan också skickas vidare och med annan processväg användas för att bilda till exempel metan eller metanol.

Energiåtgången vid pyrolys uppgår till 0,9 MWh per ton pyrolysolja (Jeswani et al., 2021). Kolandelen i pyrolysoljan antas vara samma som hos etan och propan, 85 viktprocent.

6.2.2 Förgasning (mer blandade flöden)

Förgasning kan konvertera nästan alla typer av kolbaserade material till syntesgas som är en blandning av främst vätgas och kolmonoxid. Processen sker under hög temperatur och i kontakt med syre och/eller ånga (National Energy Technology Laboratory, u.å.). Förgasning med ånga är mer gynnsamt när syntesgasen ska användas som råvara till kemikalieproduktion då förhållandet mellan vätgas och kolmonoxid (H_2/CO) är högre (Shah *et al.*, 2023). Produktförhållandet i syntesgas beror på råvaran och eventuell tillsats av vätgas kan behövas för att göra vätgas-kolmonoxidförhållandet mer gynnsamt. Den generella processen innefattar en water-gas-shift-reaktion, där en lämplig kvot mellan kolmonoxid och vätgas uppnås, följt av en metanbildningsprocess (Lechtenböhmer *et al.*, 2016). Metanbildningen är en exoterm reaktion och kräver därför ingen tillsats av energi (Ren *et al.*, 2020).

Specifika data på processenergin som går åt vid förgasning var svår att hitta och energiåtgången kommer därför normaliseras mot energiåtgången vid pyrolys. Enligt Cañete Vela *et al.* (2022) så är det totala energibehovet för termokemisk återvinning genom pyrolys och förgasning 44% respektive 81% av energibehovet vid traditionell plastproduktion. Det innebär i sin tur att förgasning har runt 80% högre energiåtgång än pyrolys. Den presenterade energiåtgången är baserad på den totala mängden processenergi som går åt från "plastavfall" till "ny plast" och inte bara processenergin för förgasningssteget. Då det inte står vilka efterkommande processvägar siffrorna är baserade på antas förgasningssteget vara 50% mer energikrävande per mängd kol än pyrolyssteg. Detta hänvisas till den högre processtemperaturen vid förgasning än vid pyrolys.

6.3 Koldioxid från punktkälla som råvara

Koldioxid kan användas som kolkälla vid kemikalietillverkning genom att reagera den med vätgas. Koldioxiden kan samlas in direkt från luften eller från punktkällor såsom rökgas. Insamling av koldioxid kan till exempel vara ett bra alternativ om råvaran inte lämpar sig för andra metoder utan kan då först genomgå förbränning med energiutvinning och sen kan den bildade koldioxiden samlas in.

Energimängden som krävs för att samla in koldioxiden beror främst på koldioxidkoncentrationen i gasen man samlar in den ifrån men också hur stor del av koldioxiden som ska extraheras från gasen. För insamling av koldioxid direkt från luften där koncentrationen är 400 ppm minimi är behovet cirka 20 kJ/mol koldioxid, medan det vid en molfraktion på 0,4 går åt cirka 5 kJ/mol koldioxid för att sedan närma sig noll när molfraktionen närmar sig 1 (Jiang *et al.*, 2023). Koncentrationen av koldioxid från punktkällor varierar med vilken typ av anläggning utsläppen sker vid men kan variera

mellan 4-40% (Majeed och Svendsen, 2018; Jiang *et al.*, 2023). Antagande om typisk koldioxidkoncentration på 15-20% för svenska punktkällor och en insamlingsgrad på 95% ger ett motsvarande energibehov på 6-8kJ/mol koldioxid. Det motsvarar 0,044 MWh/ton koldioxid eller 0,16 MWh/ton kol.

Den insamlade koldioxiden kan sedan reagera med vätgas genom till exempel en Sabatierreaktion för att bilda metan. Sabatierreaktionen är exoterm och potentiellt användbar spillvärme bildas, samtidigt är reaktionen inte så effektiv och mycket av reaktanterna lämnas oreagerad och behöver återcirkuleras (Palm *et al.*, 2016). Ungefär 60% av kolet i reaktanten reagerar men antas närma sig 100% med återcirkulation. Det är tydligt att det är produktionen av vätgas som är det mest energikrävande steget och eventuella energibehov vid Sabatierreaktionen antas vara försumbara.

Metan kan sedan reageras med syre genom "Oxidative Coupling of Methane" (OCM), något som beskrivs i Palm *et al.* (2016). Oreagerad metan förs sen vidare för att reagera i en "methanol to propylene" (MTP) process. OCM har en kolselektivitet på 85% och MTP en kolselektivitet på 55%. Totalt binds 72% av kolet i det inkommande metanet i antingen eten eller propen och resten i koldioxid samt längre kolkedjor. Energitillbehovet för respektive process är 40 kWh/ton eten och 19 MWh/ton propen

6.4 Vätgas genom elektrolys av vatten

Vissa metoder kräver tillsats av väte för att få den ämnessammansättning som behövs för att bilda de mellanprodukter som krävs för den slutgiltiga plastproduktionen. Elektrolys innebär att vatten delas till sina beståndsdelar, syre och väte, genom att föra en elektrisk ström genom vattnet (Bazzanella och Ausfelder, 2017). Det är framför allt relevant när koldioxid används som råvara eller när det inkommande materialet inte har samma ämnessammansättning som polymeren.

Det teoretiskt lägsta energibehovet vid elektrolys av vatten är 39.4 kWh/kg H₂ och motsvarar det högre värmevärdet för vätgas (Bazzanella och Ausfelder, 2017). Detta är så klart inte det praktiska energibehovet som är högre. Till 2050 finns uppskattningar på att de flesta metoderna för elektrolys av vatten ska nå energieffektivitet lägre än 45 kWh/kg H₂ (IRENA, 2020). Enligt Bazzanella och Ausfelder (2017) går det med vissa metoder att minska elbehovet genom att använda högvärdig spillvärme men 45 kWh/kg H₂ kommer att användas i detta arbete.

6.5 Traditionell produktion av PE och PP från nafta

Polyeten och polypropen produceras traditionellt från bland annat nafta, en fraktion från raffineringen av råolja från oljeindustrin. I korthet består processen i två steg, det första är krackning av naftan till eten/propen och sedan polymerisation av eten/propen till polyeten/polypropen (Russo et al., 2021). Det mest energikrävande steget är krackningen av naftan, vilket uppgår till 6,1 MWh/ton PE och 10,6 MWh/ton PP, detta inkluderar både elektrisk energi och bränsle för processvärme. Motsvarande siffror för polymerisationen är 0,6 MWh/ton PE och 0,3 MWh/ton PP.

Det viktade medelvärdet mellan produktion av PP och PE blir 8,1 MWh/ton_{prod} för krackningen och 0,5 MWh/ton_{prod} för polymerisationen. Medelvärdet baseras på C/C förhållandet mellan PE och PP som presenterats i kapitel 6.3.

Pyrolysoljan antas kunna ersätta nafta fullt ut.

6.6 Sammanställning av processernas energibehov

I tabell 3 presenteras energibehovet samt koleffektiviteten för de viktigaste processtegen vid produktion av polyeten och polypropen. Tabellen ger en överblick över vilka processteg som är mest energikrävande och som då troligen har störst påverkan på det totala energibehovet. De processvägar som valts ut är exempel och är inte nödvändigtvis i enlighet med hur det skulle se ut i verkligheten. Det finns andra processvägar samt processer som inte är tillgängliga idag men som skulle kunna vara ett alternativ i framtiden vilka hade gett ett annat resultat.

Tabell 3. Energibehovet för varje processteg samt koleffektiviteten baserad på andelen kol som hamnar i önskad produkt. Energibehovet avser den totala mängden kol i processteget, alltså både önskad produkt och eventuell biprodukt.

Produktion av vätgas		
Processteg	Energibehov	Koleffektivitet (%)
1. Elektrolys av vatten för vätgas	45 MWh/ton vätgas	N/A
Mekansik återvinning		
Processteg	Energibehov	Koleffektivitet (%)
1. Plastavfall till "nytt" plastgranulat	0.6 MWh/ton kol*	66
Pyrolys		
Processteg	Energibehov	Koleffektivitet (%)
1. Plastavfall till pyrolysolja	1,2 MWh/ton kol	85
2. Pyrolysolja till eten/propen	9,4 MWh/ton kol*	85
3. Eten/propen till PE/PP	0,6 MWh/ton kol*	85
Förgasning		
Processteg	Energibehov	Koleffektivitet (%)
1. Organiskt material till syngas	1,7 MWh/ton kol	95
2. Syngas (+vätgas***) till metan	0 MWh/ton kol	85
3. Metan till eten/propen	13,2 MWh/ton kol	72
4. Eten/propen till PE/PP	0,6 MWh/ton kol*	85
Koldioxid som råvara		
Processteg	Energibehov	Koleffektivitet (%)
1. Insamling av koldioxid	0,16 MWh/ton kol**	95
2. Koldioxid+vätgas till metan***	0 MWh/ton kol	95
3. Metan till eten/propen	13,2 MWh/ton kol	72
4. Eten/propen till PE/PP	0,6 MWh/ton kol*	85
Uppgraderad biogas		
Processteg	Energibehov	Koleffektivitet (%)
1. Metan till eten/propen	13,2 MWh/ton kol	72
1. Eten/propen till PE/PP	0,6 MWh/ton kol*	85

*Enheten är per ton kol i plasten. **Ingen allokering till den mängd kol som blir över i koldioxiden i rökgasen. ***Energigången för vätgasproduktion adderas för sig.

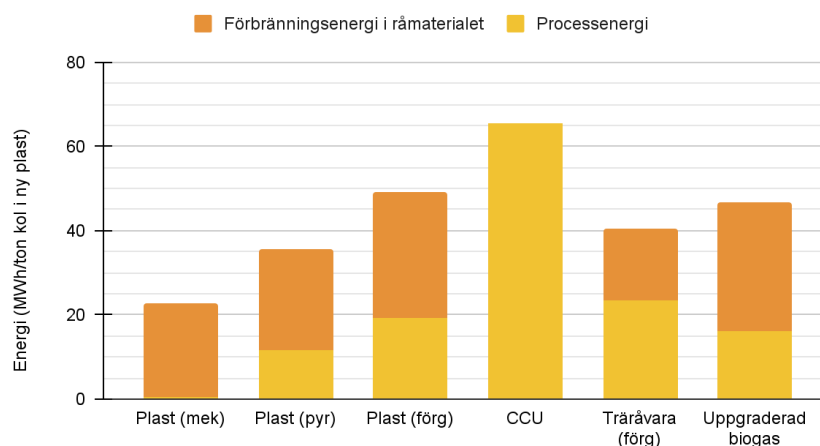
Alla värden i tabell 3 är ungefärliga och har inte tagit hänsyn till eventuella synergistiska processfördelar som hade kunnat minska den totala energigången eller öka

effektiviteten. Syftet är att kunna användas som hjälpmedel i kommande delkapitel genom att jämföra mängden energi som krävs för att gå från råmaterial till färdig plast.

6.7 Sammansatt energiåtgång vid plastproduktion

I figur 12 presenteras energiåtgången för att producera ny plast från olika råmaterial. Energiförbrukningen är beräknad utifrån tabell 3 men inkluderar även energiförbrukningen för att producera den vätgas som behövs vid produktion från insamlad koldioxid samt förgasning av träråvara. Mängden vätgas som behövs vid plastproduktion från vätgas är baserat på den process Palm et al 2016 beskrivit. Vid förgasning av träråvara baseras behovet av väte på skillnaden i väte/kol-förhållandet mellan PE/PP och träråvara vilket är 0,22 för PE/PP och 0,13 för träråvara (Björnsson et al., 2021; Calero et al., 2023). Biogent avfall antas ha samma egenskaper som träråvara.

Processenergi och förbränningsenergi per ton kol i ny plast



Figur 12. Energiåtgången för att producera ett ton ny plast från ett givet råmaterial (gult) samt energimängden man kan utvinna genom att förbränna samma råvara, också normaliserat mot ett ton ny plast (orange).

Figur 12 visar även mängden energi som finns bundet i råmaterialet om det skulle användas som bränsle, vilket det till stor grad görs idag. Anledningen att presentera förbränningsenergin är att ge en mer rättvis bild sett till hur råvaran används idag. För detta används undre värmevärdet för PE/PP, metan samt för träråvara och är runt 12 MWh/ton för PE/PP, 14 MWh/ton för metan och 3,5-5 MWh/ton för träråvara beroende på torrhalt (Svenskt gastekniskt center [SGC], 2012; Ioelovich, 2018; Forest Research, u.å.). Förbränningsenergin har beräknats från mängden energi i den mängd råvara som behövs för att producera ett ton plast utifrån den totala koleffektiviteten presenterat i

tabell 3. Från figur 12 blir det tydligt att insamling av koldioxid är den klart mest energikrävande produktionsvägen och att mekanisk återvinning är den minst energikrävande produktionsvägen. För de andra produktionsvägarna beror deras relativa energibehov på om förbränningsenergin tas med eller inte.

7. Möjlig fördelning av råvara för att tillgodose plastindustrins behov av kol

I det här kapitlet presenteras möjliga fördelningar av råvaror för att täcka kolbehovet och resultaten diskuteras. Fördelningsförslagen baseras på kolbehov och kolkällor som presenterats i kapitel 5, samt energibehovet per ton ny plast och koleffektiviteten för olika processvägar som presenteras i kapitel 6.

7.1 Kolbehov, kolkällor och energiåtgång

I figur 11 presenteras kolbehoven för scenario A, B och C samt de förväntade tillgängliga kolflöden inom avfalls- och skogssektorn. Från figurerna blir det tydligt att den mängd kol som behövs för att förse plastproduktionen är förhållandevis liten jämfört med mängden kol som finns tillgängligt inom framför allt skogssektorn för alla scenarier. I figuren kan man även se att mängden tillgängligt kol inom avfallssektorn är större än kolbehovet, oavsett scenarier. Med en kombination av kolåtervinningsmetoder kan kol från avfallssektorn förse hela den svenska plastanvändningen med grönt kol. Om ingen hänsyn tas till behovet av kol från andra sektorer finns det alltså mer tillgängligt kol än vad plastanvändningen behöver. I verkligheten finns det dock flera andra sektorer som också förväntas ha ett behov av fossilfritt kol till deras omställning från fossil råvara. Att svara på om mängden kol inom kolkällorna räcker för att försörja plastanvändningen blir alltså lite mer komplicerat med detta i beaktning. Exempel på sektorer som förväntas behöva större mängder fossilfritt kol i form av biomassa i framtiden är delar av transportsektorn som är svåra att elektrifiera och cementindustrin men även lagring av kol i form av bio-CCS förväntas öka. I ett flertal utredningar har den totala bioenergipotentialen beräknats och slutsatsen ger att ambitiösa omstruktureringar måste göras inom alla sektorer för att efterfrågan på gröna atomer inte ska överskrida produktionspotentialen. Exempel på omstruktureringar innebär elektrifiering inom till exempel transportsektorn, kemiindustrin och skogsindustrin, ökad energieffektivisering inom till exempel värmesektorn och skogsindustrin, samt ökad cirkularitet inom framför allt kemiindustrin. Elektrifiering minskar behovet av bioenergi genom att använda el producerat från till exempel vind eller solenergi, energieffektivisering minskar det totala energibehovet och då också behovet av bioenergi, och cirkularitet gör så att råvaran stannar inom systemet längre och behovet av ny råvara minskar därför (Fossilfritt Sverige, 2021; Material Economics, 2021). Det kommer alltså krävas stora och snabba förändringar men det förväntas alltså vara möjligt att förse det ökande behovet av biogent kol om detta sker, även om marginalen förväntas vara ganska liten.

De flesta råvarorna kan antingen användas som de är via de metoder som nämnts i kapitel 6 eller efter förbränning som insamlad koldioxid för att tillverka plast. Det kan finnas anledning att basera beslut kring vilken metod som skulle vara mest effektiv på systemnivå just eftersom det förväntas finnas konkurrens om råvaran.

I figur 12 ser vi att produktion av plast från insamlad koldioxid är det mest energiintensiva alternativet av de som presenterats här. Samtidigt kan vi se att när förbränningsenergin för råvaran räknas med blir skillnaden betydligt mindre. När skillnaden blir mindre ökar rimligheten i att använda insamlad koldioxid för plastproduktion ur ett energiperspektiv. Samtidigt har ingen hänsyn tagits till eventuella samkörningsfördelar eller skalfördelar beaktats när processenergin beräknats. Om det är så att det finns stora energibesparingar här hade insamling av koldioxid blivit ännu mindre gynnsam i förhållande till övriga alternativ. Processenergin för mekanisk återvinning är extremt liten jämfört med processenergin för övriga metoder men det skulle kunna förklaras genom lägre processtemperaturer och enklare process.

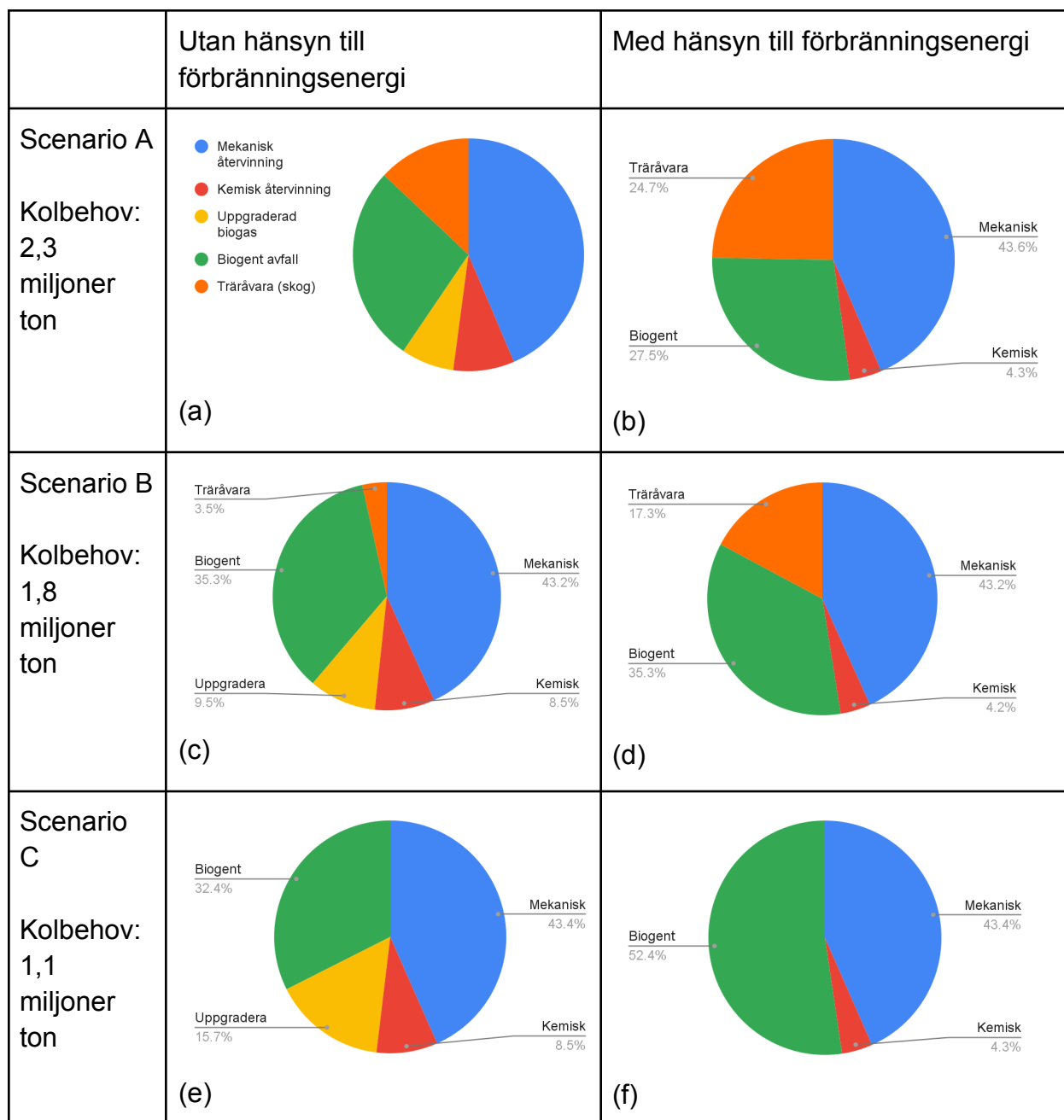
Energiåtgången är också baserat på ett medelvärde för att producera PE och PP och det är inte säkert att det är en rättvis representation för andra plasttyper eller den totala energiåtgången för att producera all den plast som behövs. För att tillverka andra typer av plast från okonventionell råvara används eventuellt andra processer som har annan energiåtgång och kan innebära andra tekniska svårigheter. En vidare undersökning där fler av de vanligaste plasttyperna undersöks hade kunnat ge en mer representativ bild av hur försörjningen av kolatomer till plastanvändningen hade kunnat se ut baserat på energiåtgång och eventuella tekniska krav.

7.2 Möjlig tillförsel av kolatomer

Behovet av att återcirkulera kolatomer för att kunna övergå till fossilfri plastproduktion är av stor betydelse och vikten av återcirkulation finns väl dokumenterat i litteraturen. Cañete Vela et.al (2022) presenterade ett samåtervinningsscenario av naturliga och syntetiska kolinnehållande material på global skala för att helt kunna fasa ut fossil råvara från det globala plasticsystemet. I scenariot återcirkuleras ungefär hälften av kolet i biogent avfall och nästan 100% av kolet i plastavfallet genom mekanisk och termokemisk återvinning till nya syntetiska material.

I figur 13 presenteras sex cirkeldiagram med förslag över hur kolbehovet för respektive scenario kan förses. Diagrammen har baserats på data över kolbehov, koltillgång, energiåtgång och koleffektivitet från figur 11, figur 12 och tabell 3, samt ett plastscenario för 2050 i EU där 56% av plastavfallet förväntas kunna återvinnas mekaniskt och 11% återvinnas kemiskt (Material Economics, 2018). Resterande mängd består av plastavfall som går till förbränning samt förluster vid återvinning, vilket också förväntas hamna på

förbränning till viss mån. Utgångspunkten för figur 13 är att förse kolbehovet samtidigt som lägsta möjliga energiåtgång uppnås. I den vänstra kolumnen har ingen hänsyn tagits till råmaterialens förbränningsenergi utan bara processenergin. I den högra är både processenergin och förbränningsenergin medräknad, detta då majoriteten av råvaran används som bränsle idag och energin därmed hade behövt "ersättas". Baserat på detta har råvara adderats efter stigande energiåtgång tills att råvaran "tar slut". Mekanisk återvinning (blå) av plast har lägst energiåtgång både med och utan förbränningsenergin inräknad och i enlighet med Material Economics (2018) antas 56% av plastavfallet kunna användas. På samma sätt adderas kemiskt återvunnen plast (röd) som 11% av plastavfallet. I fallet där hänsyn tas till förbränningsenergi har förgasning av plast högre energiåtgång än förgasning av träråvara/biogent avfall (orange/grön). Hälften av 11% antas kunna återvinnas via pyrolys och det är därför andelen kemiskt återvunnen plast är lägre i figur 12 (b), (d) och (f). Metan (gul) har lägre energiåtgång än biogent avfall och träråvara när ingen hänsyn tas till förbränningsenergin men högre när förbränningsenergin räknas med. Därför är metan med i figur 13 (a), (c) och (e) men inte i (b), (d) och (f). Biogent avfall har antagits ha samma egenskaper som träråvara men tros inte vara lika omstritt ur konkurrenssynpunkt så används förs så långt det "räcker". För metan och biogent avfall (och träråvara) har hänsyn tagits till koleffektiviteten i tabell 3 och mängden kol från dessa är alltså lägre än vad som presenterats i figur 11.

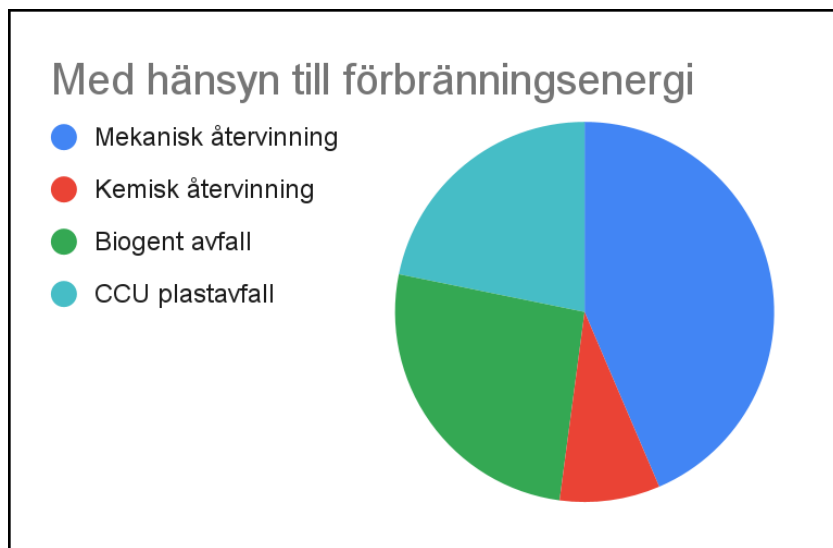


Figur 13. (a)-(f) visar sex olika cirkeldiagram över hur kolbehovet hade kunnat förses. Hela cirkeln kan summeras till kolbehovet för respektive scenario. Fördelningen av råmaterialen har gjorts efter "lägsta energibehov". I vänstra kolumnen har endast processenergin räknats med, i högra har både processenergin och förbränningsenergi räknats med.

Från figur 13 ses att mängden träråvara som behövs minskar med minskat kolbehov och är lägre när ingen hänsyn tas till råmaterialens förbränningsenergi. För scenario C kan kolbehovet till hundra procent förses med kol från avfallssektorn utan att energiåtgången blir högre. Förutsättningen för att plasttillverkningens kolbehov kan förses i enlighet med figur 13 är att energibehovet som råvaran idag förser ersätts med ett annat energislag, till exempel via elektrifiering, även om olika effektiviseringsåtgärder hade kunnat minska energibehovet. Att andelen plastavfall, både mekaniskt och kemiskt återvunnen, är samma i (a)-(f) beror på att mängden plastavfall är proportionell mot plastanvändningen.

Som nämnts i kapitel 7.1 så hade det varit möjligt att förse hela kolbehovet med kol från avfallssektorn utifrån de utformade scenarierna för plastanvändningen 2050 och den uppskattade mängden kol inom sektorn. Koleffektiviteten i tabell 3 innebär inte att kolet som inte gått till önskad produkt är förlorat utan det finns kvar i biprodukter och som koldioxid. I vissa fall skulle biprodukterna kunna användas till att tillverka plast via processvägar som inte tagits upp i detta arbete och om så inte är fallet kan de troligtvis förbrännas och kolet bundet i koldioxiden samlas in. I figur 12 kan man se att energibehovet för plastproduktion via CCU inte är väldigt mycket större än vid förgasning av plast eller användandet av metan när förbränningsenergin är inräknad. Det innebär att en större mängd av kolet inom avfallssektorn, och kanske mer specifikt kolet i plastavfall, hade kunnat tillvaratas om energiåtgången prioriterades lägre. Det blir alltså ett avvägande mellan värdet på kolatomer kontra värdet av energi, som i verkligheten troligtvis skulle avgöras av ekonomiska faktorer.

Om istället för att prioritera minimering av energiåtgång, och istället maximering av kolcirkulation prioriterats hade resultatet sett annorlunda ut. Figur 14 visar hur försörjningen av kol hade kunnat se ut om i första hand återvinningen av plastavfall maximeras genom mekanisk återvinning, kemisk återvinning och till slut förbränning med insamling av koldioxid. Mängden kol från CCU baseras på kvarvarande mängd kol efter mekanisk och kemisk återvinning med ett antagande om att 15% av detta går förlorat. Figuren gäller för alla scenarier, även om den totala mängden kol figuren representerar inte är densamma.



Figur 14. Tillförseln av kol för att försörja plastanvändningens kolbehov fördelat över olika kolkällor efter maximering av kolcirkulering inom plastsektorn. Gäller scenario A, B och C.

I figur 14 så försörjs kolbehovet ungefär till 75% av kol från plastavfall även om energiåtgången blir högre än för (b), (d) och (f) i figur 13. De kvarvarande 25 procenten behöver då komma från biogena källor såsom biogent avfall, biogas eller restprodukter från skogen. Det är inte helt otänkbart att det kommer behövas en viss mängd kol från biogena kolkällor eftersom det alltid kommer finnas vissa förluster vid insamling och återvinning av plastavfall som inte helt går att undvika och om plastanvändningen fortsätter öka måste den ökande behovet av kol komma från biogena källor. Med den förväntade stora konkurrensen om biogena kolatomer i åtanke blir det också tydligt att så lågt kolbehov som möjligt och så hög recirkulation som möjligt gör det lättare att få den potentiella mängden biogent kol att räcka till.

Energibehovet som figur 13 b, d och f motsvarar är 40,4 TWh, 31,4 TWh och 19,1 TWh beräknat utifrån energibehovet presenterat i figur 12, inklusive förbränningsenergin. När istället cirkulationen av kol inom plastsektorn maximeras som i figur 14 ökar energibehovet med ungefär 20% för alla scenarier. Det är fortfarande en stor ökning av energibehovet men kanske inte orimligt stort så att prioritering av cirkulation inte skulle vara ett alternativ. De potentiella energibehoven är för övrigt ganska stora med tanke på att Sveriges totala tillförsel av energi var 552 TWh 2018 (Energimyndigheten, 2020). Tanken var aldrig att explicit titta på energibehovet utan bara kunna använda det i jämförande syfte och som nämnts tidigare har ingen beaktning tagits till eventuella samkörningsfördelar, så det totala energibehovet kan vara något överdrivet.

7.3 Allmän diskussion / påverkande faktorer

7.3.1 Ekonomi och logistik

I det här arbetet har jag valt att vikta olika råmaterial och processer utifrån energiåtgång men i verkligheten har ekonomi och kostnader den kanske största betydelsen. Om figur 13 och 14 gjorts om med lägst kostnad per ton plast som utgångspunkt hade till exempel kostnaden för råmaterialet, energibehovet och elpriset, infrastruktursinvesteringar och underhållskostnader gjort att försörjningen av kol sett annorlunda ut.

Med logistik menas till exempel var råmaterial uppstår, var produktion sker, vilken form råmaterialet har och hur det kan transporteras och är i slutändan kanske också en ekonomisk fråga. Avfall uppstår utspritt över hela Sverige, rester från skogsbruk uppstår också utspritt över stora delar av Sverige. Det betyder att råmaterialet antingen behöver transporteras över långa sträckor eller att plastproduktionen behöver spridas ut över mindre anläggningar, vilket i sin tur betyder att skalfördelar, som kommer med större centraliserad produktion, går förlorade.

7.3.2 Övriga kolkällor

Det här arbetet har framför allt tittat på kolflöden inom avfallssektorn och skogsindustrin men utöver dessa finns flera sektorer med betydande kolflöden. Anledningen till att inte fler kolflöden studerats är främst att tiden för arbetet började bli knapp. Andra kolkällor som inte tagits med i detta arbete är till exempel jordbruksrester och oanvänd åkermark, sjögräs och alger eller havsbaserade kolkällor, direkt insamling av koldioxid från luften genom direct air capture (DAC) och kol bundet i byggnader/deponier.

Enligt Börjesson (2016) finns en bioenergipotential på 30-35 TWh 2050 från halm, nedlagd åkermark, åkermark i träda och överskottsmark av vallodling. Det är dock förhållandevis stor osäkerhet på resultatet. Största osäkerheten är potentialen från åkermark i träda och överskottsmark av vallodling med ett intervall på 10-48 TWh. Med ett snabbt men bristfälligt antagande om att samma egenskaper gäller som för skogsråvara innebär det att 30-35 TWh motsvarar ungefär 3 miljoner ton kol. Detta är en betydande mängd kol och överskrider det förväntade behovet. Det kan finnas anledning att undersöka den faktiska mängden kol inom sektorn mer noggrant i fortsatta studier.

För tång och alger uppskattas potentialen 2050 ligga på 0,6-1,5 TWh (Börjesson, 2016). Med samma omvandlingsfaktorer motsvarar det 100 kton kol.

För DAC är den teoretiska potentialen av kol i luften i princip oändlig. Här är det egentligen energi som är den begränsande faktorn då koncentrationen av koldioxid i luften är låg och att separera den då är energikrävande. Som ses i figur 12 är processen att göra plast från koldioxid också väldigt energikrävande i förhållande till andra metoder.

En mängd kol är också "lagrat" i plast i byggnadsbeståndet även om det i takt med att gamla byggnader rivs sorteras ut till avfall. I gamla deponier finns också en mängd plast som inte kommer att brytas ner. Teoretiskt hade en viss mängd av detta nog kunnat grävas upp och användas igen. Hur stor denna potential skulle vara är oklart men hade kunnat vara av intresse att undersöka vidare.

7.3.3 Downsizing

En möjlighet som inte togs med i kapitel 2 är en minskad plastanvändning genom mycket striktare regler och policyer kring hur och vid vilka tillämpningar plast får användas. Från figur 13 och 14 ser vi att den relativa mängden råvara som inte är plastavfall är konstant men att den absoluta mängden denna andel representerar hade minskat med minskad plastanvändning. Baserat på de antaganden som gjorts hade downsizing alltså inte påverkat det relativa resultatet men det hade minskat totala behovet av kol och likaså energiåtgång och kostnader.

7.3.4 Energiproduktion

Hela detta arbete utgår ifrån ökad produktion av förnybar el. Både då konventionell plastproduktion idag främst använder fossila bränslen till processenergi och att majoriteten av kolinnehållande råvaror idag används som bränsle på olika sätt. Ökad elproduktion från fossilfria källor är alltså en förutsättning för fossilfri plast.

8. Slutsats

Syftet med arbetet har varit att undersöka möjligheten att förse den svenska plastanvändningen med fossilfritt kol. Detta arbete visar att den svenska plastanvändningen kan tillgodose sitt behov av ickefossilt kol genom återvunnen plast, annat kolinnehållande material från avfallssektorn samt bi- och restprodukter från skogsindustrin.

Utifrån de scenarier som presenterats beräknades plastanvändningens behov av fossilfritt kol till 1,1-2,2 miljoner ton vilket är betydligt mindre än den förväntade mängden tillgängligt fossilfritt kol som förväntas finnas i avfallssektorn och skogsindustrin på 22 miljoner ton. Majoriteten av det tillgängliga kolet finns inom

skogsindustrin där det förväntas finnas runt 20 miljoner ton. Sveriges stora skogsindustri är alltså en fördel i omställningen.

För att undersöka vilka kolkällor som är de mest effektiva att förse kolbehovet med, har de utvärderats utifrån ungefärliga energibehov för olika processvägar, inklusive råmaterialets förbränningsenergi. När minimering av energibehovet prioriteras kan ungefär 50% av kolet komma från återvunnen plast, främst genom mekanisk återvinning men även termokemisk återvinning. Resterande mängd kol måste komma från biogena källor, antingen från avfallssektorn eller skogsindustrin. När återcirkulation av kolatomer inom plastsektorn prioriteras kan istället 70% av kolbehovet förses genom återvunnen plast. Den ökade mängden återvunnet kol kommer delvis från förgasning men främst genom energikrävande insamling av koldioxid och plastproduktion genom denna. Resterande mängd kol måste som tidigare komma från biogena källor. Det är tydligt att mekanisk återvinning av plast är det minst energikrävande alternativet. Även om det finns vissa problem med kvaliteten på den nya plasten kan det finnas anledning för plastindustrin att driva för ökad effektivisering och förbättring av alla led, från tillverkad produkt till insamling och hantering av plastavfall för att kunna maximera mängden plast som kan återvinnas mekaniskt.

Arbetet har endast fokuserat på plastanvändningens behov av fossilfritt kol. I Sverige finns det dock flera andra sektorer som liksom plastsektorn kommer behöva ställa om till fossilfritt till år 2050. Detta skapar en nationell konkurrens om de tillgängliga fossilfria kolatomerna. Huruvida det tillgängliga kolet räcker för att täcka Sveriges totala behov av kol från alla sektorer kan inte detta arbete svara på utan fortsatta studier hade då behövts.

Klart är att någon typ av nationellt samarbete mellan olika sektorer behövs för att uppnå en optimal fördelning av fossilfritt kol utifrån maximal nytta, både ur kolsynpunkt men även ur energisynpunkt med flera.

Källförteckning

- Bauer, F. et al. (2022) 'Plastics and climate change—Breaking carbon lock-ins through three mitigation pathways', *One Earth*, 5(4), pp. 361–376. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.03.007>.
- Baur, E., Osswald, T.A. and Rudolph, N. (2019) 'Plastics Handbook', in E. Baur, T.A. Osswald, and N. Rudolph (eds) *Plastics Handbook*. Hanser, p. I–XXI. Available at: <https://doi.org/10.3139/9781569905609.fm>.
- Bazzanella, A.M. and Ausfelder, F. (2017) 'Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry'.
- Björnsson, L. et al. (2021) 'Integrating bio-oil production from wood fuels to an existing heat and power plant - evaluation of energy and greenhouse gas performance in a Swedish case study', *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 48, p. 101648. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101648>.
- Börjesson, P. (2016) *Potential för ökad tillförsel och avsättning av inhemsk biomassa i en växande svensk bioekonomi*. 97. Lund, Sweden: Institutionen för teknik och samhälle Avdelningen för miljö- och energisystem.
- Calero, M. et al. (2023) 'Oil and gas production from the pyrolytic transformation of recycled plastic waste: An integral study by polymer families', *Chemical Engineering Science*, 271, p. 118569. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118569>.
- Cañete Vela, I. et al. (2022) 'Co-recycling of natural and synthetic carbon materials for a sustainable circular economy', *Journal of Cleaner Production*, 365, p. 132674. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132674>.
- Energigas Sverige (2022) *Produktion av biogas och rötrest och dess användning år 2021*. Stockholm, pp. 25–26.
- Energigas Sverige and Fossilfritt Sverige (2020) *Färdplan för fossilfri konkurrenskraft: Gasbranchen*. Available at: <https://www.energigas.se/publikationer/rapporter/gasbranschens-fardplan-for-fossilfri-konkurrenskraft/>.
- Energimyndigheten (2021) *Första, andra, tredje...*, p. s.16-19.
- Europaparlamentet (2018) *Kretsloppssamhället: Nya mål för återvinning inom EU | Nyheter | Europaparlamentet, Europaparlamentet*. Available at: <https://www.europarl.europa.eu/news/sv/headlines/society/20170120STO59356/kretsloppssamhallet-nya-mal-for-atervinning-inom-eu> (Accessed: 19 October 2023).
- Europeiska kommissionen (2022) *European Green Deal: Putting an end to wasteful packaging*, European Commission - European Commission. Available at: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_7155 (Accessed: 4 May 2023).
- Europeiska kommissionen (u.å.) *Långsiktig strategi för 2050*, commission.europa.eu. Available at:

https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_sv (Accessed: 4 July 2023).

Forest Research (u.å.) 'Typical calorific values of fuels', Forest Research. Available at: <https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/ftthr/biomass-energy-resources/reference-biomass/facts-figures/typical-calorific-values-of-fuels/> (Accessed: 31 May 2023).

Fossilfritt Sverige (2021) Strategi för fossilfri konkurrenskraft: Bioenergi och bioråvara i industrins omställning.

Fossilfritt Sverige and Föreningen Svenskt Flyg (2018) Färdplan för fossilfri konkurrenskraft: Flygbranchen.

Fråne, A. et al. (2022) Kartläggning av plastflöden i Sverige 2020. Available at: <https://www.naturvardsverket.se/om-oss/publikationer/7000/978-91-620-7038-0/> (Accessed: 27 April 2023).

Hodgson, C. and Terazono, E. (2022) 'Food vs fuel: Ukraine war sharpens debate on use of crops for energy', Financial Times, 12 June. Available at: <https://www.ft.com/content/b424067e-f56b-4e49-ac34-5b3de07e7f08> (Accessed: 20 April 2023).

Hylte kommun (2022) Så sorterar du hushållsavfall, hylte. Available at: <https://www.hylte.se/byggabomiljo/avfallochatervinning/sasorterarduhushallsavfall.4.703ff97213c9229d0b790a.html> (Accessed: 19 May 2023).

Ioelovich, M. (2018) 'Energy Potential of Natural, Synthetic Polymers and Waste Materials - A Review', Academic Journal of Polymer Science, 1(1). Available at: <https://doi.org/10.19080/AJOP.2018.01.555553>.

IRENA (2019) Bioenergy from boreal forests: Swedish approach to sustainable wood use. Abu Dhabi. Available at: <https://www.irena.org/publications/2019/Mar/Bioenergy-from-boreal-forests-Swedish-approach-to-sustainable-wood-use> (Accessed: 27 May 2023).

IRENA (2020) Green hydrogen cost reduction: scaling up electrolyzers to meet the 1.5 C climate goal. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

Jeswani, H. et al. (2021) 'Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery', Science of The Total Environment, 769, p. 144483. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483>.

Jiang, Y. et al. (2023) 'Energy-effective and low-cost carbon capture from point-sources enabled by water-lean solvents', Journal of Cleaner Production, 388, p. 135696. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135696>.

Kähler, F. et al. (2021) 'Turning off the Tap for Fossil Carbon: Future Prospects for a Global Chemical and Derived Material Sector Based on Renewable Carbon', Industrial Biotechnology, 17(5), pp. 245–258. Available at: <https://doi.org/10.1089/ind.2021.29261.fka>.

Karlberg, L.A. (2007) Energigrödornagör maten dyrare. Available at: <https://www.nyteknik.se/energi/energigrodornagor-maten-dyrare/189725> (Accessed: 20 April 2023).

Lamlom, S.H. and Savidge, R.A. (2003) 'A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species', *Biomass and Bioenergy*, 25(4), pp. 381–388. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00033-3).

Lechtenböhmer, S. et al. (2016) 'Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – Implications for future EU electricity demand', *Energy*, 115, pp. 1623–1631. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.110>.

Majeed, H. and Svendsen, H.F. (2018) 'Characterization of aerosol emissions from CO₂ capture plants treating various power plant and industrial flue gases', *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 74, pp. 282–295. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.04.016>.

Material Economics (2018) *The Circular Economy - a Powerful Force for Climate Mitigation*, *materialeconomics*. Available at: <https://materialeconomics.com/publications/publication/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation> (Accessed: 4 October 2023).

Material Economics (2021) *Den svenska ekvationen för bioresurser, annex till Klimatagenda för Sverige*.

Möller, K. (2015) 'Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. A review', *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), pp. 1021–1041. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0284-3>.

National Energy Technology Laboratory (u.å.) 5.1. Gasification Introduction, *netl.doe.gov*. Available at: <https://netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/intro-to-gasification> (Accessed: 13 September 2023).

Naturvårdsverket (2020) *Avfall i Sverige 2020*, naturvårdsverket. Available at: <https://www.naturvardsverket.se/om-oss/publikationer/7000/978-91-620-7048-9/> (Accessed: 26 March 2023).

Naturvårdsverket (u.å.a) *Avfallshierarkin visar stegen vi behöver ta*, naturvårdsverket. Available at: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/avfall/pagaende-arbeten/avfallshierarkin-visar-stegen-vi-behoover-ta/> (Accessed: 23 May 2023).

Naturvårdsverket (u.å.b) *El och fjärrvärme, utsläpp av växthusgaser*, naturvårdsverket. Available at: <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-el-och-fjarrvarme/> (Accessed: 8 May 2023).

Naturvårdsverket (u.å.c) *För dig med tomt eller trädgård*, naturvårdsverket. Available at: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/invasiva-frammande-arter/for-dig-som->

privatperson/med-tomt-eller-tradgard/ (Accessed: 19 May 2023).

Naturvårdsverket (u.å.d) Hållbar bioenergi, naturvardsverket.se. Available at: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimatet-och-energin/hallbar-bioenergi/> (Accessed: 20 April 2023).

Naturvårdsverket (u.å.e) Sveriges klimatmål och klimatpolitiska ramverk, naturvardsverket.se. Available at: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/sveriges-klimatarbete/sveriges-klimatmal-och-klimatpolitiska-ramverk/> (Accessed: 4 July 2023).

OECD (2022) Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060. OECD. Available at: <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.

Palm, E., Nilsson, L.J. and Åhman, M. (2016) 'Electricity-based plastics and their potential demand for electricity and carbon dioxide', *Journal of Cleaner Production*, 129, pp. 548–555. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.158>.

Plastics Europe (2022) 'Plastics - the Facts 2022 • Plastics Europe', Plastics Europe. Available at: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/> (Accessed: 21 January 2023).

Plastics Europe (u.å.) 'Recycling technologies • Plastics Europe', Plastics Europe. Available at: <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/recycling-technologies/> (Accessed: 11 September 2023).

Ragaert, K., Delva, L. and Van Geem, K. (2017) 'Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste', *Waste Management*, 69, pp. 24–58. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>.

Ragn Sells (u.å.) Träavfall behandlat, Ragnsells.se. Available at: <https://www.ragnsells.se/kundservice/information/sorteringsguide/Tra/traavfall-behandlat/> (Accessed: 19 May 2023).

Ren, J. et al. (2020) 'Methanation of syngas from biomass gasification: An overview', *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), pp. 4223–4243. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.023>.

Ringman, M. (1995) Trädbränslesortiment - definitioner och egenskaper. 5. Uppsala: Sveriges lantbruksuniversitet [SLU]. Available at: <https://www.slu.se/globalassets/ew/ew-centrala/forskkn/popvet-dok/faktaskog/faktaskog95/4s95-05.pdf>.

Roosen, M. et al. (2020) 'Detailed Analysis of the Composition of Selected Plastic Packaging Waste Products and Its Implications for Mechanical and Thermochemical Recycling', *Environmental Science & Technology*, 54(20), pp. 13282–13293. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03371>.

Russo, S. et al. (2021) 'Exergy-Based Assessment of Polymers Production and Recycling: An Application to the Automotive Sector', *Energies*, 14(2), p. 363. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14020363>.

Salomon, E. and Wivstad, M. (2013) Rötrest från biogasanläggningar - återföring av växtnäring i ekologisk produktion. Uppsala: SLU, EPOK - Centrum för ekologisk produktion och konsumtion.

SCB (2023) Befolkningsprognos för Sverige, Statistiska Centralbyrån. Available at: <https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/manniskorna-i-sverige/befolkningsprognos-for-sverige/> (Accessed: 29 April 2023).

Shah, H.H. et al. (2023) 'A review on gasification and pyrolysis of waste plastics', *Frontiers in Chemistry*, 10. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2022.960894> (Accessed: 12 September 2023).

Skogsindustrierna (2023) Fakta och nyckeltal - Skogsindustrierna, skogsindustrierna. Available at: <https://www.skogsindustrierna.se/om-skogsindustrin/skogsindustrin-i-korthet/fakta--nyckeltal/> (Accessed: 27 May 2023).

Skogsstyrelsen (u.å.) Avverkning, [skogsstyrelsen.se](https://www.skogsstyrelsen.se). Available at: <https://www.skogsstyrelsen.se/statistik/statistik-efter-amne/avverkning/> (Accessed: 13 October 2023).

SLU (2016) Skogsdata 2016 Tema: Skogen då, nu och i framtiden. Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet [SLU].

Smeaton, C. (2021) 'Augmentation of global marine sedimentary carbon storage in the age of plastic', *Limnology and Oceanography Letters*, 6(3), pp. 113–118. Available at: <https://doi.org/10.1002/lol2.10187>.

Sun, Y. and Cheng, J. (2002) 'Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review', *Bioresource Technology*, 83(1), pp. 1–11. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00212-7).

(Svenskt gastekniskt center [SGC], S. (2012) *Basdata om biogas*. ISBN: 978-91-85207-09-1. Malmö, p. 7.

Svensson, S. et al. (2023) 'Kartläggning av biogena kolflöden i de skogsbaserade värdekedjorna i Sverige'.

Sveriges lantbruksuniversitet[SLU] (2023) *Framtidens skog*, SLU.SE. Available at: https://www.slu.se/institutioner/skoglig-mykologi-vaxtpatologi/forskning/skogspatologi/framtidens_skog/ (Accessed: 13 October 2023).

UNFCCC (u.å.) The Paris Agreement | UNFCCC, unfccc.int. Available at: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (Accessed: 4 July 2023).

Appendix

Tabell A1. Omvandlingsfaktorer för mängden kol i några olika kolinnehållande ämnen

	Molmassa (g/mol)	Omvandlingsfaktor (till kol)	Omvandlingsfaktor (från kol)
Kol	12	x1	x1
Koldioxid	44	x0,27	x3,67
Cellulosa	162	x0,44	x2,25
Metan	16	x0,75	x1,33

Beräkningar av mängden kol i biogasen

Energimängden biogas har omvandlats till kol genom tabellerade värden på dess, energidensitet, volymförhållandet (metan/koldioxid), densitet (metan, koldioxid, och biogas) samt förhållandet mellan kolets och gasernas molmassor (kol/metan och kol/koldioxid).

Sammansättning på biogas

Biogas består till största delen av metan och koldioxid, men det förekommer också en rad andra komponenter i biogasen. Gasens sammansättning påverkar i sin tur gasens egenskaper, såsom densitet och energiinnehåll.

		Deponigas	Rötgas	Naturgas
Undre värmevärde	MJ/Nm ³	16	23	39
	<u>kWh/Nm³</u>	4,4	<u>6,5</u>	11,0
	MJ/kg	12,3	20	48
Densitet	kg/Nm ³	1,3	1,1	0,82
Relativ densitet	-	1,1	0,9	0,63
Wobbe index	MJ/Nm ³	18	27	55
Metantal		>130	>135	73
Metan	<u>Vol-%</u>	45	<u>65</u>	90
Metan, variation	Vol-%	35–65	60–70	85–92
Högre kolväten	Vol-%	0	0	9
Vätgas	Vol-%	0–3	0	—
Koldioxid	<u>Vol-%</u>	40	<u>35</u>	0,7
Koldioxid, variation	Vol-%	15–40	30–40	0,2–1,5
Kväve	Vol-%	15	0,2	0,3
Kväve, variation	Vol-%	5–40	—	0,3–1,0
Syre	Vol-%	1	0	—
Syre, variation	Vol-%	0–5	—	—
Svavelväte	ppm	<100	<500	3,1
Svavelväte, variation	ppm	0–100	0–4000	1,1–5,9
Ammoniak	ppm	5	100	—
Totalklor som Cl ⁻	mg/Nm ³	20–200	0–5	—

Källor: *Energigas och miljö*, SGC 2006.

Energinet.dk. www.energinet.dk. 2011-02-15

Tabell A2. Omvandlingsstegen från energi till mängd kol. All energi finns i metanet.

Nutid(densitet)				
		6,5kWh/Nm3	Metan 0.66kg/Nm3	
		Metan 65%	CO2 1.9kg/Nm3	Mkol/Mmetan=12/16
		Koldioxid 35%	Biogas1,1kg/Nm3	Mkol/Mkoldioxid=12/4
	energi(KWh)	volym (Nm3)	Massa(ton)	massa kol(ton)
biogas	2 300 000 000	353 846 154	389 231	178 025
Metan	2 300 000 000	230 000 000	151 800	113 850
koldioxid		123 846 154	235 308	64 175
2050(densitet)				
			Metan 0.66kg/Nm3	
		Metan 65%	CO2 1.9kg/Nm3	Mkol/Mmetan=12/16
		Koldioxid 35%	B.gas1,1kg/Nm3	Mkol/Mkoldioxid=12/4
	energi(KWh)	volym (Nm3)	Massa(ton)	massa kol(ton)
biogas	5 400 000 000	830 769 231	913 846	417 971
Metan	5 400 000 000	540 000 000	356 400	267 300
koldioxid		290 769 231	552 462	150 671