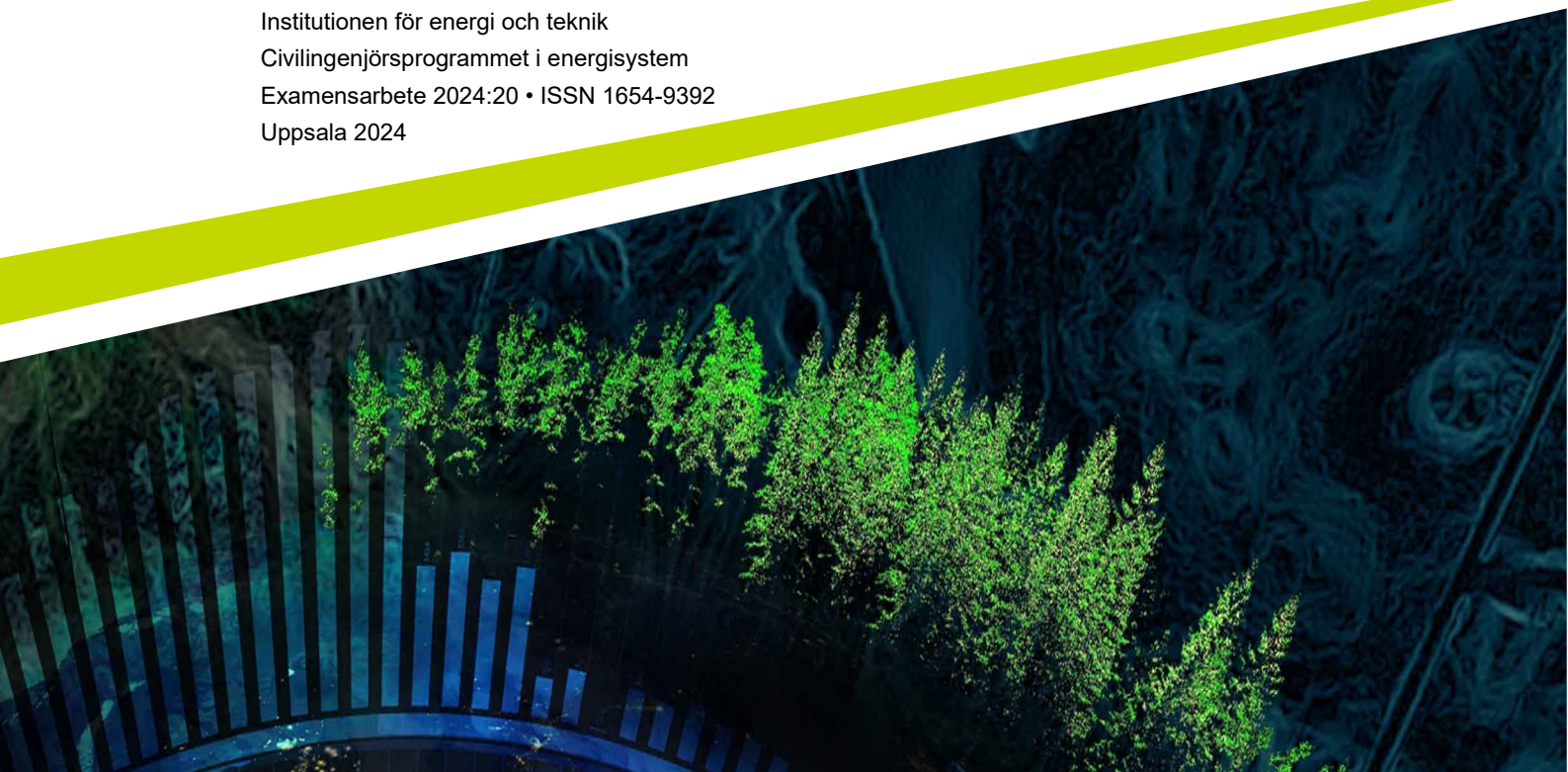




Kolflöden och potentiella kolsänkor i Stockholms stads geografiska område

Filippa Norrman

Examensarbete • 30 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för energi och teknik
Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Examensarbete 2024:20 • ISSN 1654-9392
Uppsala 2024



Kolflöden och potentiella kolsänkor i Stockholms stads geografiska område

Carbon Flows and Potential Carbon Sinks in the Geographical Area of the City of Stockholm

Filippa Norrman

Handledare: Maria Johansson, Ecoloop AB.
Ämnesgranskare: Cecilia Sundberg, SLU, Institutionen för energi och teknik
Examinator: Åke Nordberg, SLU, Institutionen för energi och teknik

Omfattning: 30 hp
Nivå och fördjupning: Avancerad nivå, A2E, teknik
Kurstitel: Examensarbete i energisystem
Kurskod: EX1016
Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Kursansvarig inst.: Institutionen för energi och teknik
Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2024
Upphovsrätt: Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
Delnummer i serien: 2024:20
ISSN: 1654-9392

Nyckelord: förnybara energiresurser, teknologi, energiresurshantering.

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakultet för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för energi och teknik

Abstract

Carbon Flows and Potential Carbon Sinks in the Geographical Area of the City of Stockholm

This master's thesis examines the carbon flows and sinks within the geographical of Stockholm, focusing on the contributions of different sectors to carbon dioxide emissions and how these emissions can be mitigated through the implementation of carbon sinks. The transportation sector is the largest source of fossil carbon flows, while the electricity and heating sectors account for the largest biogenic carbon dioxide emissions. Forests and land within the geographical area of the city of Stockholm serve as significant carbon sinks and possess considerable carbon storage.

The master's thesis identifies the most relevant carbon sinks for the geographical area of the City of Stockholm, including urban trees, green roofs, and the construction of multi-family residential buildings with timber structures. These carbon sinks are evaluated based on their potential to reduce climate impact and their cost-effectiveness. The construction of multi-family residential buildings with timber structures is found to have the highest potential for carbon sequestration. Meanwhile, green roofs and urban trees contribute to both carbon sequestration and the improvement of the urban environment.

The analysis in the master's thesis highlights the importance of land use for the net effect of carbon sinks. Converting land that already functions as a carbon sink can lead to the release of carbon, thereby reducing the overall carbon sequestration capacity.

The implementation of carbon sinks can reduce Stockholm's emissions by 4-10 %, but this alone is insufficient to achieve carbon neutrality by 2040. The study concludes that in order to achieve the climate goals of the City of Stockholm, it requires an implementation of carbon sinks in combination with emission reductions.

This study also includes an evaluation of both BECCS and biochar production to provide a comprehensive view of their potential to reduce the City of Stockholm's climate impact. Calculations indicate that utilizing park and garden waste for biochar production can generate negative emissions ranging from 286-433 kilotons of carbon dioxide equivalents, corresponding to up to 28 % of the City of Stockholm's emissions in 2022. BECCS with heat recovery can almost compensate for 40 % of the emissions in the City of Stockholm in 2022.

Populärvetenskaplig sammanfattning

Detta examensarbete görs inom ramen för projektet Reflow som leds av Stockholms stad. Det syftar till att hjälpa staden minska sina nettokoldioxidutsläpp genom olika strategier för kolinlagring, så kallade kolsänkor. I Stockholm, där utrymme är en begränsande faktor, blir det avgörande att implementera effektiva kolsänkor som inte kräver stora markområden. Analysen inkluderar utsläpp från transport, el, uppvärmning, avfall samt skog och mark. Transportsektorn står för en stor del av de totala utsläppen av växthusgaser och använder främst fossila bränslen, medan biobränslen som används inom el- och uppvärmningssektorn orsakar biogena koldioxidutsläpp. Till skillnad från sektorer som transport och energi som orsakar stora utsläpp, fungerar Stockholms stads skogar och grönområden som viktiga kolsänkor och kollager.

Stockholms stads klimatredovisning kartlägger främst de territoriella utsläppen som sker inom stadens geografiska område. Dock orsakar stockholmarnas konsumtion av varor och tjänster utanför stadens och landets gränser även betydande konsumtionsbaserade utsläpp. Dessa konsumtionsbaserade utsläpp inkluderas inte i stadens officiella klimatredovisning, trots att de uppstår till följd av stockholmarnas konsumtionsmönster. För att ge en komplett bild av stadens totala klimatpåverkan bör därför även de konsumtionsbaserade utsläppen inkluderas utöver de territoriella utsläppen. Det skulle skapa en helhetssyn som möjliggör ett effektivt och transparent miljöarbete. Detta blir centralt i stadens klimatarbete, där en klimatbudget har satts upp med mål om årlig utsläppsminskning för att till slut nå koldioxidneutralitet 2040. För att uppnå detta krävs utsläppsreduceringar, men även kompletterande åtgärder som införandet av kolsänkor.

Kolsänkor definieras som platser eller tekniker som kan absorbera och lagra koldioxid från atmosfären. I detta examensarbete identifierades flera viktiga kolsänkor som kan hjälpa Stockholm stad att minska sina utsläpp. För att välja ut relevanta kolsänkor utvärderades en rad olika metoder för kolinlagring baserat på deras tekniska mognadsgrad och lämplighet för implementering i Stockholm stad. Teknisk mognadsgrad beskriver hur välutvecklad och beprövad en viss teknik är. En potentiell kolsänka som fortfarande befinner sig i forskningsstadiet bedöms ha en låg teknisk mognadsgrad.

För de kolsänkor som ansågs vara relevanta beräknades den förväntade årliga mängden kol som respektive metod kan lagra per kvadratmeter. Tre kolsänkor identifierades ha högst potential för kolinlagring: stadsträd med biokol, gröna tak, och nybyggnation av flerbostadshus med trästomme istället för betongstomme. Dessa kolsänkor utvärderades vidare i en fallstudie av bostadsområdet Norra 2 i Norra Djurgårdsstaden. Utifrån förutsättningarna i Norra 2 kunde kolsänkornas teoretiska potential, samt kostnadseffektivitet i form av kostnad per inlagrad koldioxidekvivalent beräknas. Kolsänkorna utvärderades även baserat på andra relevanta fördelar och nackdelar som bör övervägas vid implementering.

Stadsträd bidrar till långsiktig kolinlagring och hjälper till att sänka temperaturen på sommaren genom skugga och avdunstning. De kan även erbjuda livsmiljöer för många arter. Med tanke på kostnadsaspekten uppvisar stadsträd relativt låg kostnad per inlagrad koldioxidekvivalent och hög potential som kolsänka.

Den andra metoden som undersöktes var gröna tak som binder kol under en kortare tidsperiod och ökar biodiversiteten genom att fungera som livsmiljöer för insekter. De minskar också avrinning från tak och förbättrar luftkvaliteten genom att filtrera föroreningar. I jämförelse med stadsträd uppvisar gröna tak en högre kostnad per inlagrad koldioxidekvivalent och lägst potential som kolsänka i denna fallstudie.

Slutligen undersöktes nybyggnation av flerbostadshus med trästomme istället för traditionell

betongstomme. Att bygga flerbostadshus med trästomme leder till att biogent kol lagras under hela husets livstid och på så sätt hålls åtskilt från atmosfären, vilket minskar koncentrationen av växthusgaser. Trä är en förnybar resurs som, om den skördas hållbart kan minska byggsektorns klimatpåverkan avsevärt. Det gick inte att hitta entydig information om kostnaden för att bygga med trästomme. I fallstudien konstaterades det att det initialt kan vara dyrare än att bygga flerbostadshus med betongstomme, men att det blir kostnadseffektivt om även klimatpåverkansaspekten vägs in. Att bygga med trästomme uppvisade högst potential som kolsänka i fallstudien av Norra 2 i detta examensarbete.

Fallstudien visar även att markanvändningen spelar en avgörande roll för kolsänkornas nettoeffekt. Om mark som redan fungerar som kolsänka tas i anspråk för byggnation, frigörs en betydande mängd kol, vilket minskar den totala kolinlagringspotentialen. Det är därför viktigt att noggrant planera och undvika att använda mark som innehåller stora mängder lagrat kol.

För att uppnå sina klimatmål behöver Stockholm stad prioritera implementering kolsänkor i kombination med minskade utsläpp av växthusgaser, främst från transportsektorn. Att bygga flerbostadshus med trästomme visade sig ha högst potential som kolsänka samt vara kostnadseffektivt om klimatpåverkan vägs in i bedömningen. Samtidigt kan stadsträd och gröna tak bidra till både kolinlagring och en bättre stadsmiljö, även om de initiala kostnaderna kan vara högre.

Beräkningar i detta arbete visar också att det kan uppstå betydande energiförluster vid produktion av biokol och användning av BECCS i kraftvärmeanläggningar för att lagra kol. Men om park- och trädgårdsavfall som annars inte används för energiproduktion, tas tillvara för att producera biokol genereras både värme och elektricitet som en extra fördel. Vid användning av BECCS med värmeåtervinning, kan denna teknik nästan kompensera för nästan 40 % av utsläppen i Stockholm stad 2022. Det innebär att BECCS med värmeåtervinning spelar en stor roll i att minska stadens koldioxidutsläpp.

Exekutiv sammanfattning

I detta examensarbete undersöks kolflöden och kolsänkor inom Stockholms stads geografiska område, med fokus på hur olika sektorer bidrar till koldioxidutsläpp och hur dessa utsläpp kan minskas genom implementering av kolsänkor. Analysen visar att transportsektorn är den största källan till fossila kolflöden, medan el- och uppvärmningssektorn, står för de största biogena koldioxidutsläppen. Skog och mark i Stockholm stad fungerar som kolsänka och besitter därmed ett betydande kollager. Dessa resultat inkluderar främst det territoriella utsläppen inom stadens gränser men belyser även vikten av att inkludera det konsumtionsbaserade utsläppen som förväntas vara stora och ha en betydande påverkan för att staden ska uppnå sina uppsatta miljömål.

Arbetet identifierar de mest relevanta kolsänkorna för Stockholm stad som visade sig vara stadsträd, gröna tak och nybyggnation av flerbostadshus med trästomme. Dessa kolsänkor utvärderas baserat på deras potential att minska klimatpåverkan, deras kostnadseffektivitet som kolsänka samt andra betydande fördelar och nackdelar som bör övervägas vid implementering.

Nybyggnation av flerbostadshus med trästomme visade sig ha högst potential för kolinlagring, medan gröna tak och stadsträd bidrar till både kolinlagring och förbättring av den urbana miljön. Den ekonomiska aspekten för att bygga flerbostadshus med trästomme varierar, men det konstateras att denna metod kan vara kostnadseffektiv i förhållande till den potentiella mängden koldioxidinlagring.

Implementeringen av kolsänkor kan minska Stockholms utsläpp med 4–10 %, men detta är inte tillräckligt för att uppnå koldioxidneutralitet år 2040. För att nå klimatmålen behöver Stockholm stad fortsätta att utveckla arbetet med att minska utsläppen, främst från transportsektorn, i kombination med implementering av kolsänkor.

Arbetet inkluderar även en utvärdering av både BECCS och biokolproduktion för att ge en helhetsbild av deras potential att minska Stockholms stads klimatpåverkan. Beräkningar visar att användning av park- och trädgårdsavfall för biokolproduktion kan generera negativa utsläpp på 286-433 kiloton koldioxidekvivalenter, motsvarande upp till 28 % av Stockholms stads utsläpp år 2022. BECCS med värmeåtervinning kan nästan kompensera för hela 40% av Stockholms stads utsläpp år 2022.

Detta arbete visar också att markanvändningen spelar en avgörande roll för kolsänkornas nettoeffekt. Om mark som redan fungerar som kolsänka tas i anspråk kan en betydande mängd kol frigöras, vilket minskar den totala kolinlagringspotentialen. Det är därför viktigt att noggrant planera och undvika att exploatera mark som besitter stora kollager.

Ordlista

- Kolsänka: En naturlig eller konstgjord reservoar som fångar upp koldioxid från atmosfären och lagrar i skogar, hav eller mark.
- Kolflöde: Beskriver rörelsen av kol mellan olika reservoarer och atmosfären genom fotosyntes, respiration och förbränning. Kolflöden kan även beskriva hur kol förflyttas mellan samhällets olika sektorer.
- Kolinlagring: Minska mängden koldioxid i atmosfären genom att binda den i marken, växtlighet eller genom mekaniska och mineraliska metoder.
- Koldioxidavskiljning: Innebär att koldioxid fångas upp från atmosfären för att sedan lagras. Tillämpning på biogen koldioxid från storskalig förbränning kan möjliggöra negativa utsläpp.
- Koldioxidekvivalent: Ett mått som används för att jämföra utsläppen av olika växthusgaser baserat på deras globala uppvärmningspotential (GWP).
- GWP: Ger ett mått på hur mycket värme en växthusgas absorberas i atmosfären över en viss tidsperiod, jämfört med koldioxid.
- Kollager: Mängden kol som är lagrad i en viss reservoar, exempelvis i skog, mark eller hav.
- Växthusgas: Gaser som bidrar till växthuseffekten genom att absorbera och återstråla värme i atmosfären.
- Biogena utsläpp: Utsläpp av växthusgaser från biomassa och biologiska processer, genom exempelvis nedbrytning av organiskt material, respiration och förbränning av biomassa.
- Antropogena utsläpp: Utsläpp av växthusgaser som orsakas av mänskliga aktiviteter, exempelvis förbränning av fossila bränslen.
- Territoriella utsläpp: Utsläpp som sker inom ett lands gränser.
- Produktionsbaserade utsläpp: Utsläpp som sker vid produktion av varor och tjänster inom ett land, oavsett var varorna och tjänsterna konsumeras.
- Konsumtionsbaserade utsläpp: Utsläpp som är kopplade till konsumtionen av varor och tjänster inom ett land, oavsett var de produceras.
- IPCC(The Intergovernmental Panel on Climate Change): En FN-organisation som sammanställer och utvärderar vetenskaplig information om klimatförändringar.
- GHG Protocol(Greenhouse Gas Protocol): En global standard för att mäta och hantera växthusgasutsläpp från företag och organisationer.
- GPC Protocol (Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories): Standard som är anpassad för att mäta och rapportera växthusgasutsläpp i städer.
- ISO 14064: Internationell standard för att kvantifiera och rapportera växthusgasutsläpp.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Mål och Syfte	3
1.2	Frågeställningar	3
1.3	Avgränsningar	3
2	Bakgrund	4
2.1	Kolets kretslopp	4
2.2	Kolflöden och växthusgasutsläpp	5
2.2.1	Effekter av ökade växthusgaskoncentrationer	5
2.3	Kolsänkor	6
2.3.1	Koldioxidavskiljning	7
2.4	Hur beräknas klimatpåverkande utsläpp	8
2.4.1	Globala Standarder för Utsläppsberäkningar	9
2.5	REFLOW	10
2.6	Tidigare studier	11
2.6.1	Nationella kolflöden	11
2.6.2	Urbana kolflöden	11
2.7	Stockholm stad	12
2.7.1	Kolbudget och utfall	12
2.7.2	Kolförråd i Skog och Mark	13
3	Metod	14
3.1	Litteraturstudie	14
3.1.1	Datainsamling	14
3.1.2	Flödesschema	15
3.1.3	Antaganden	15
3.2	Potentialberäkningar av kolsänkor	15
3.2.1	Antagande vid potentialberäkningar	17
3.3	Fallstudie	18
3.3.1	Förändrad markanvändning	19
3.3.2	Övriga aspekter	19
3.4	Biokol och BECCS	19
3.4.1	Antagande	21
4	Resultat	22
4.1	Kolflöden och klimatutsläpp i Stockholm stads geografiska område	22
4.1.1	Flödesschema	22
4.1.2	Transportsektor	23
4.1.3	Fjärrvärme och el	24
4.1.4	Konsumtionsbaserade utsläpp	25
4.2	Potentiella kolsänkor	25
4.3	Potentialberäkning	26
4.4	Fallstudie	28
4.4.1	Åtgärd 1: Stadsträd med biokol	29
4.4.2	Åtgärd 2: Gröna tak	29
4.4.3	Åtgärd 3: Flerbostadshus med trästomme	29
4.4.4	Ekonomisk aspekt	31

4.5	Fördelar och nackdelar	31
4.5.1	Förändrad markanvändning	33
4.6	Biokolproduktion och BECCS	33
4.6.1	Klimatnytta	34
4.6.2	Biokolproduktion i Stockholm stad	35
5	Diskussion	37
5.1	Hur ser resursflödet för kol ut i Stockholm stads geografiska område uppdelat på aktörer, aktiviteter och naturmiljöer?	37
5.1.1	Konsumtionsbaserade utsläppen	37
5.2	Vilka kolsänkor är mest relevanta för en stad generellt, och mer specifikt Stockholm stad?	37
5.2.1	Tidsperspektivet	38
5.3	Vilken potential har de mest relevanta kolsänkorna att minska Stockholms stads klimatpåverkan, och hur mycket skulle implementeringen kosta?	38
5.3.1	Ekonomiska aspekter	39
5.4	Finns det några andra fördelar eller nackdelar som bör beaktas vid övervägandet av dessa åtgärder	40
5.4.1	Förändrad Markanvändning	40
5.4.2	Kolbudget och kolsänkor	40
5.5	Rekommendationer till Reflow och Stockholm stad	40
5.6	Påverkan på energisystemet	41
5.7	Framtida studier	42
6	Slutsatser	42

1 Inledning

Den ökade användningen av fossila bränslen som kol, olja och naturgas har markant bidragit till högre koldioxidhalter i atmosfären, vilket i sin tur har intensifierat växthuseffekten och den globala uppvärmningen[1]. I arbetet mot den globala uppvärmningen och klimatförändringarna antogs Parisavtalet vid FN:s klimatkonferens 2015. Syftet med Parisavtalet är att begränsa den globala uppvärmningen genom att hålla temperaturökningen under 2 grader Celsius jämfört med förindustriell tid, med en strävan att inte överskrida en ökning på 1,5 grad[2].

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) sammanställer vetenskap om klimatförändringar för att stödja klimatpolitik. Deras syntesrapport från 2023 betonar allvaret i klimatkrisen och behovet av att begränsa uppvärmningen till under 1,5 grader Celsius för att undvika katastrofala konsekvenser[3]. Rapporten lyfter fram vikten av kolsänkor och kolinlagring som kritiska metoder för att minska koldioxidhalten i atmosfären. Genom att skydda och återställa ekosystem samt använda tekniska lösningar kan vi lagra mer kol. IPCC uppmanar politiker att snabbt genomföra omfattande åtgärder för att minska utsläppen och undvika de värsta scenarierna[3].

Flertalet nationer runt om i världen har antagit klimatmål för att nå nettonollutsläpp av växthusgaser. Sveriges långsiktiga klimatmål är att vara koldioxidneutral till 2045 och därefter uppnå negativa utsläpp[4]. Det innebär att senast 2045 ska det inte finnas några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären, därefter ska utsläppen av växthusgaser underskrida mängden koldioxid som tas upp. För att Sverige ska uppnå klimatmålen måste utsläppen av växthusgaser minskas med minst 85 % i jämförelse med referensåret 1990 och den resterande utsläppsmängden kan hanteras genom kompletterande åtgärder, där ökade kolsänkor är en viktig kategori[4].

På regeringens uppdrag har en strategi utarbetats för att identifiera åtgärder som kan leda Sverige mot nettonollutsläpp efter 2045[5]. Strategin fokuserar på att förstärka nationella kolsänkor, särskilt inom LULUCF-sektorn (Land Use, Land Use Change, and Forestry), och utforskar tekniker som koldioxidavskiljning och lagring (CCS). Dessutom innefattar uppdraget att utvärdera möjligheterna för Sverige att bidra till utsläppsminskningar internationellt, som ett komplement till de inhemska insatserna[5].

Kolsänkor definieras i detta arbete som en process som aktivt ökar mängden kol lagrat i skog, hav eller mark. Dessa inkluderar naturbaserade och konstgjorda metoder för att fånga upp och lagra koldioxid. Kolsänkornas förmåga att binda koldioxid ger upphov till kolinlagring och skapandet av kollager. Kolinlagring innebär att koldioxid från atmosfären binds i marken, växtlighet eller andra reservoarer. BECCS (BioEnergy with Carbon Capture and Storage) kan fungera som kolsänkor genom att de avskiljer och lagrar koldioxid från biogena och källor.

Kolinlagring har störst potential i områden med stora skogs- och jordbruksarealer. Städernas intensiva industriverksamheter och konsumtionsmönster bidrar dock med nästan 70 % av de globala koldioxidutsläppen, trots att de bara täcker cirka 3 % av jordens landyta. Detta gör det viktigt att hantera de utsläpp som genereras i tätbebyggda områden.

Detta examensarbete utförs inom projektet REFLOW *Datadriven analys och visualisering av kommunens dolda resursflöden*, som tar fram metoder för att beskriva och visualisera de fysiska resursflödena i en kommun för att föreslå och prioritera åtgärder för att minska miljöbelastningen från stadens invånare och verksamheter[6]. Detta arbete fokusera på att identifiera kolflöden i en stads geografiska område samt analysera potentialen för implementering av kolsänkor inom stadens gränser. Genom att analysera kolflöden kan detta medföra ett proaktivt miljöarbete, där utsläpp förhindras redan innan de uppstår. Kolsänkornas potential beräknas för att kunna föreslå prioriteringar för stadens arbete med kolinlagring.

1.1 Mål och Syfte

Syftet med detta arbete är att identifiera kolflöden och möjliggöra proaktivt miljöarbete genom att minska effekterna av klimatutsläpp genom implementering av kolsänkor inom Stockholm stads geografiska område.

Det övergripande målet är att arbetet ska föreslå prioriteringar för stadens arbete med kolinlagring. Dessa prioriteringar kommer att vara till stöd för stadens klimatarbete och projektet REFLOW, och kan komma att vara ett underlag till framtagandet av konkreta prioriteringar och strategier för kolinlagring.

1.2 Frågeställningar

1. Hur ser kolflödet ut i Stockholm stads geografiska område uppdelat på aktörer, aktiviteter och naturmiljöer?
2. Vilka kolsänkor är mest relevanta för en stad generellt, och mer specifikt Stockholm stad?
3. Vilken potential har de mest relevanta kolsänkorna att minska Stockholms stads klimatpåverkan, och hur mycket skulle implementeringen kosta? Finns det några andra fördelar eller nackdelar som bör beaktas vid övervägandet av dessa åtgärder?

1.3 Avgränsningar

Detta arbete fokuserar på kolsänkor som kan integreras i nybyggda bostadsområden i Stockholm stad, exempelvis tillsats av biokol i trädgropar och grönområden, gröna tak och byggnader i trä. Dessa kolsänkor har identifierats som möjliga lösningar inom Stockholm stads exploateringsområden för att minska stadens klimatpåverkan.

BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) inkluderas inte i fallstudien, eftersom de inte direkt relaterar till nybyggnation av bostadsområden. BECCS planeras däremot införas vid ett av Stockholm stads värmekraftverk, och har därför utvärderats som jämförelse. Genom att inkludera BECCS som jämförelse ges en bredare bild av kolsänkornas potential i relation till de byggnadsfokuserade lösningarna som undersöks i fallstudien.

2 Bakgrund

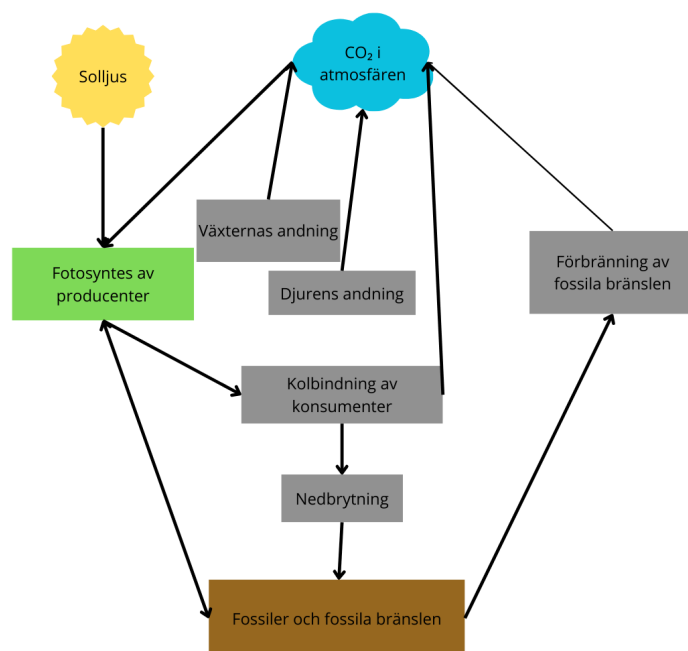
I detta avsnitt presenteras en övergripande bakgrund till ämnet. Inledningsvis behandlas kolets kretslopp, följt av kolflöden, koldioxidutsläpp samt kolsänkor. Därefter belyses konsekvenserna av de ökade koncentrationerna av växthusgaser i atmosfären. Sedan beskrivs olika strategier och standarder för beräkning och rapportering av klimatpåverkan. Avslutningsvis presenteras en mer ingående litteraturstudie av tidigare studier inom ämnesområdet.

2.1 Kolets kretslopp

Kol är en grundläggande beståndsdel i allt liv på jorden, återfinns i DNA och proteiner och spelar en central roll i jordens biogeokemiska cykler[7]. Kol återfinns i många former, bland annat i jord, skogar, hav och i atmosfären[7].

Kolcykeln, som beskriver transporten av kol mellan dessa reservoarer, är avgörande för regleringen av jordens klimat. Genom fotosyntesen absorberar växter koldioxid från atmosfären och omvandlar den till glukos, vilket bygger upp deras biomassa och frigör syre som en biprodukt[7, 8]. När växter och andra organismer dör, överförs majoriteten av det lagrade kolet tillbaka till jorden. Nedbrytningsprocesser kan sedan frigöra detta kol som koldioxid tillbaka till atmosfären, vilket sluter cykeln[7]. Denna process beskrivs i figur 1.

Om kolcykeln befinner sig i balans hjälper den kontinuerliga processen till att minska atmosfärens koncentration av växthusgaser, eftersom kol kontinuerligt tas upp och lagras i levande biomassa och jordens olika kolsänkor, som skogar och hav. Platser där mer kol absorberas än vad som frigörs, fungerar som kolsänkor[7]. Platser eller processer som släpper ut mer kol än vad som absorberas kallas kolkällor. Biogena kolkällor omfattar markanvändning, skogsbränder, nedbrytning av växter och organismer, samt vissa industriella processer som involverar biologiskt material[8]. Mängden utsläpp av växthusgaser har rubbat kolcykeln, vilket gör att den inte längre befinner sig i balans[7].



Figur 1: Beskriver kolcykeln där kol förflyttas mellan atmosfären, växter, djur, nedbrytning, förbränning av fossila bränslen och fotosyntesen som drivs av solljuset

Biogena koldioxidutsläpp frigörs i atmosfären både från biologiska processer, såsom nedbrytning av organiskt material och från antropogena processer som användning och förbränning av biomassa[8]. Antropogena processer drivs av mänskliga aktiviteter och främst förbränningen av fossila bränslen. Förbränning av fossila bränslen stör balansen i kolcykeln och resulterar i en ökad koncentration av koldioxid i atmosfären[9]. Koldioxidutsläpp från antropogena källor genereras framför allt genom förbränning av fossila bränslen inom energiproduktion, transportsektorn och industriella processer[10]. Dessutom leder avskogning och förändringar i markanvändningen till ökade koldioxidutsläpp drivna av antropogena processer[10].

2.2 Kolflöden och växthusgasutsläpp

Att studera kolflöden inom en stads geografiska område syftar till att identifiera hur kol rör sig och fördelas inom staden[11]. Kolflöden avser både rörelsen och fördelningen av kol, koldioxidutsläpp samt processer som absorberar eller lagrar kol, såsom kolsänkor och kolinlagring. Denna rapport analyserar därför flöden av kol, vart koldioxidutsläppen sker och möjlighet till kolinlagring.

I urbana miljöer är användningen av fossila bränslen inom energisektorn och industriella processer, såsom kol, olja och naturgas, de primära källorna till koldioxidutsläpp[12]. Dessa utsläpp, som kan spåras till mänsklig aktivitet, är huvudsakligen ansvariga för den ökande koncentrationen av växthusgaser i atmosfären[13].

Växthusgaser omfattar olika klimatpåverkande gaser, varav varje har en unik uppvärmningspotential (Global Warming Potential, GWP). För att sammanställa olika växthusgaser i en gemensam mängdenhet används koldioxidekvivalenter. Denna enhet erhålls genom att omvandla en gasens uppvärmningspotential till koldioxidekvivalenter[14]. Till exempel har metan, i jämförelse med koldioxid, en 28 gånger högre uppvärmningspotential under ett hundraårs perspektiv, vilket innebär att ett ton utsläpp av metan genererar 28 ton koldioxidekvivalenter[14]. Att omvandla samtliga växthusgaser till koldioxidekvivalenter är en förutsättning för att kunna genomföra jämförbar klimatrapportering mellan olika sektorer och länder.

2.2.1 Effekter av ökade växthusgaskoncentrationer

Den ökade koncentrationen av växthusgaser i atmosfären reflekterar mer värmestrålning tillbaka till jordens yta, vilket höjer medeltemperaturen både på land och i vatten[15]. Från mitten av 1700-talet till maj 2021 har den genomsnittliga koldioxidkoncentrationen ökat från 280 ppm till 419 ppm, vilket har lett till en global genomsnittlig temperaturökning med 1,17°C sedan 1880[16, 17].

Denna temperaturökning har resulterat i klimatförändringar och negativa miljöeffekter, såsom smältande glaciärer och inlandsisar, höjda havsnivåer och förlorade livsmiljöer för marina arter[18]. Klimatförändringarna har också ökat förekomsten av extremväder som stormar, orkaner och kraftiga regnfall som i sin tur leder till naturkatastrofer i form av översvämningar och torka [19].

Ökade kolkoncentrationer i atmosfären stör också kolutbytet mellan atmosfären och haven. Haven fungerar som en kolsänka, men ökade kolnivåer försvårar detta utbyte och påverkar marina organismer negativt. Koraller är särskilt känsliga för ökade havstemperaturer och kolhalter, vilket kan leda till kedjereaktioner som påverkar flera arter och människor som är beroende av fiske[20, 21].

2.3 Kolsänkor

I detta arbete diskuteras kolsänkor, ett begrepp som definierar en process med förmåga att absorbera och lagra koldioxid från atmosfären, vilket bidrar till att minska koldioxidkoncentrationen i atmosfären.

Växande biomassa, såsom träd och växter, spelar en avgörande roll för att lagra kol. Biomassa består till ungefär 50% av kol när de når sin fulla tillväxt, vilket växterna tar upp från atmosfären genom fotosyntesen[22]. Årliga grödor såsom spannmål binder kol under en kort tidsperiod, eftersom de skördas regelbundet, medan vedartade växter som träd lagrar kol över mycket längre tid. Långlivade växter lagrar betydande mängder kol, vilket bidrar till deras roll som långsiktiga kolsänkor[22].

Ett effektivt sätt att öka kolinnehållet i marken och skapa en kolsänka är att tillföra biokol[23]. Biokol skapas genom pyrolys av växtmaterial, en process som innebär upphettning under syrefria förhållanden[23]. Under pyrolysen omvandlas ungefär hälften av växtens kol till brännbar gas medan den andra halvan blir biokol, en stabil form av kol som bryts ned mycket långsamt under naturliga förhållanden[23]. I marken anses biokolet vara stabilt under en lång tidsperiod, med en halveringstid på 150-5000 år. Detta gör biokol till en metod för långsiktig kolinlagring. Biokol kan produceras från olika typer av organiskt material, inklusive restprodukter som park- och trädgårdsavfall[24]. Eftersom det går åt energi för att tillverka biokol är det viktigt att undersöka vilken energi och råmaterial som används vid tillverkningen av biokol ur ett livcykelperspektiv. Om fossil energi används vid pyrolysisprocessen kan klimatpåverkan istället bli negativ[25].

Skogar och andra typer av vegetation som gräsmarker och betesmarker är också viktiga kolsänkor som står för lagringen av ungefär en fjärdedel av de globala koldioxidutsläppen[7]. Den svenska skogen innehåller ett stort kolförråd i form av biomassa och kollager i mark[26]. På grund av minskad tillväxt och ökad avverkning ökar inte det svenska kolförrådet lika snabbt som för tio år sedan[26].

Skogen betraktas som en kolsänka, medan dikade torvmarker kan vara en källa till växthusgaser[26]. Ursprungligen är våtmarker också viktiga kolsänkor eftersom de lagrar kol i våta, syrefattiga förhållanden vilket förhindrar att organiskt material bryts ned och frigör koldioxid[27]. När dessa torvmarker dikas, det vill säga dräneras för att användas till jordbruk eller andra former av markanvändning, exponeras torven för luft[27]. I kontakt med luft ökar nedbrytningen av organiskt material och frigör växthusgaser[27]. Denna process omvandlar torv och våtmarker från att vara en kolsänka till kolkälla.

Träprodukter från skogen kan även användas för att ersätta material som genererar stora mängder utsläpp av växthusgaser vid tillverkning. På så sätt kan träprodukter lagra kol under långa perioder och samtidigt hjälpa till att fasa ut utsläppsintensiva industrier som betong, stål och plast[26]. Hur träden används kan påverka kolinlagringen, om träd förbränns som flis i ett värmeverk återgår kolet direkt till atmosfären. Däremot kan kolet bevaras i träprodukter som möbler och byggnader, där det kan lagras i många år[23]. Det är viktigt att ökad användning av träprodukter kommer från ett hållbart skogsbruk för att inte öka avskogning eller ändrad markanvändning, eftersom både skog och mark kan innehålla stora mängder kol som frigörs när marken tas i bruk eller skog avverkas[7].

Kol i mark spelar en betydande roll i naturbaserade lösningar, där det står för en fjärdedel av den totala potentialen att mildra klimatförändringar genom delas att skydda befintligt markkol och att återställa torvmarker med högt kolinnehåll[28]. I marktyper som myrar, torvmarker och träsk kan koldioxid fångas och lagras under långa tidsperioder, uppemot 70 000 år[7]. Dessutom kan kolen i marken och leverera viktiga ekosystemtjänster[28].

Hav och andra vattenmiljöer bidrar betydligt till koldioxidupptaget, där de absorberar och lagrar omkring en fjärdedel av den atmosfäriska koldioxiden på jorden [7]. Hav som absorberar för mycket koldioxid riskerar att försuras, vilket utgör ett hot mot många vattenlevande organismer och den biologiska mångfalden[7]. Det hotade tillståndet för vattenlevande organismer leder också till en minskning av kolinlagringen, vilket skapar en negativ kedjereaktion. Havens förmåga att fånga upp koldioxid kan ökas ytterligare genom att gödsla begränsade områden för att öka den biologiska aktiviteten och mängden koldioxid som absorberas[23]. För att undvika försurning och öka mängden koldioxid som haven kan lagra kan vattnets pH-värde justeras med hjälp av alkaliska ämnen[23]. Växter på havsbotten, såsom ålgräs, har också kapaciteten att absorbera och lagra kol, vilket gör dem till potentiella kolsänkor. Expansion av ålgräsbäddar kan inte bara förbättra biologisk mångfald utan också bidra till minskad erosion[23].

2.3.1 Koldioxidavskiljning

IPCC rapport ”*Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*” beskriver hur koldioxidavskiljning (CDR) kommer ha en central roll i att uppnå netto-noll utsläpp av växthusgaser och mildra klimatförändringarna[29]. CDR inkluderar avlägsnandet av koldioxid från atmosfären genom antropogena aktiviteter. Däremot inkluderas inte naturens koldioxidupptag som inte har påverkats av mänsklig aktivitet, men om dessa gödslas för att öka kolupptaget räknas det som CDR[29]. En central del är vart den uppfångade mängden koldioxiden lagras och detta kan göras på land, i hav, geologiskt eller i produkter. Metoder som är ämnade att fånga upp utsläpp från fossila bränslen anses inte vara CDR eftersom det inte sker något upptag av atmosfärens koldioxid. Men om CCS (Carbon Capture and Storage) eller CCU (Carbon Capture and Utilization) används för att fånga upp koldioxid direkt från atmosfären och sedan lagras geologiskt eller i produkter ger metoden upphov till en minskning av atmosfärens koldioxidhalt och kan därmed räknas som CDR[29].

Tabell 1: Beskriver hur kolsänkor kan kategoriseras utifrån CDR-metoder enligt IPCC:s definition[29]. System beskriver vart avlägsnandet sker på land eller i havsmiljö och process beskriver hur avlägsnandet sker. GROT står för grenar och toppar och består av toppardelar av träden som blir kvar efter avverkning.

CDR-metod	Implementering	System	Lagring	Process	Tid (år)
Skogsplantering, skogsförvaltning	Trädplantering, skogs-skötsel	Land	Vegetation	Biologisk	10-100
Markkol	Agroforestry, Jordbruk, Virke i byggnation	Land	Vegetation, jord, sediment	Biologisk	10-100
Biokol	GROT, skogsrester, organiskt avfall, grödor	Land	Jordar	Biologisk	10-100
BECCS	GROT, och skogsrester, organiskt avfall, grödor	Land	Geologiskt	Biologisk	100-1000
DACCS	Fasta sorbenter, Flytande lösningsmedel	Land	Geologiskt	Kemisk	100-1000
Vittring	Bergarter	Land	Mineraler	Geokemisk	100-1000
Återställa våtmarker	Återvåtning, Återplantering	Land	Vegetation, jord, sediment	Biologisk	100-1000
Havsalkalinitet	Karbonatstenar	Hav	Mineraler	Kemisk	100-1000
Havsgödsling	Gödsling	Hav	Marina sediment	Biologisk	>10000

Tabell 1 beskriver hur olika metoder för kolsänkor kan kategoriseras. Tabellen visar olika på CDR-

metoder som inkluderar förbättrad skogsförvaltning, våtmarksrestaurering och markkolinlagring, direkt luftkoldioxidavskiljning och lagring (DACCS), bioenergi med koldioxidavskiljning och lagring (BECCS) och mineralisering[29].

Metoderna som presenteras i Tabell 1 kategoriseras efter deras roll i kolcykeln, det vill säga var avlägsnandet av koldioxiden sker och tidskalan för lagringen av den avlägsnade koldioxiden[29]. Tidskalan för de olika metoderna är varierande och beror på lagringsformen. Geologiska lager beräknas kunna lagra kol i tiotusen år eller längre och är också mindre sårbara för förändringar i klimatet i jämförelse med kol som lagras i mark och jord på land som kan påverkas av ett förändrat klimat[29].

Tidsperspektivet i Tabell 1 definieras utifrån tre olika tidsperioder: decennier till århundraden, århundraden till millennier, tiotusen år eller längre[29]. Processen för vart avlägsnandet av koldioxiden sker beskrivs av landbaserad biologisk borttagning, havsbaserad biologisk borttagning, geokemisk eller kemisk borttagning[29]. De olika CDR-metoderna har olika implementeringsalternativ som till exempel förbättrad skogsförvaltning kan implementeras genom skogsskötsel där kolet lagras i vegetation (biomassa) genom biologiska processer på land.

BECCS (BioEnergy with Carbon Capture and Storage) kombinerar bioenergi med infångning och geologisk lagring av koldioxid som frigörs vid förbränning av biomassa. Den infångade koldioxiden leds således om från atmosfären till berggrunden genom geologisk koldioxidinlagring, vilket skapar ett flöde från atmosfären till geologiska lager[24]. Stockholm Exergi planerar att bygga en BECCS-anläggning vid sitt biokraftvärmeverk i Värtan, med potential att fånga in 800 000 ton koldioxid per år[30].

DACCS (Direct Air Capture and Storage) är en annan metod för att fånga upp och lagra koldioxid. DAC utnyttjar kemiska reaktioner för att binda in koldioxid direkt från atmosfären, med fasta eller flytande lösningsmedel[24].

Vid vittring av mineraler binds koldioxid in, och denna process kan utnyttjas för koldioxidinlagring genom att öka takten av vittringen och lagra de resulterade produkterna i jorden, berggrunden eller havet[24].

2.4 Hur beräknas klimatpåverkande utsläpp

Svenska myndigheter utvärderar klimatpåverkan utifrån tre olika metoder: territoriella, produktionsbaserade och konsumtionsbaserade. Den första metoden är inriktad på att uppfylla klimatomålen, medan de två övriga metoderna syftar till att inkludera fler aspekter av klimatpåverkan[31]. För att fånga olika aspekter av klimatpåverkan skiljer sig de tre metoderna åt i geografisk begränsning[31].

Tabell 2: Visar skillnaden mellan territoriella, produktionsbaserade och konsumtionsbaserade utsläpp i Sverige år 2020. Utsläppen redovisas totalt för hela Sveriges befolkning i miljoner ton koldioxidekvivalenter och per person i ton koldioxidekvivalenter.

Kategori	Totala utsläpp (miljoner ton CO ₂ e)	Per capita (ton CO ₂ e)
Territoriella utsläpp	46,0	4,4
Produktionsbaserade utsläpp	48,0	4,6
Konsumtionsbaserade utsläpp	79,0	8,0

Tabell 2 jämför tre olika metoderna för beräkning av växthusgasutsläpp i Sverige år 2020 territoriella utsläpp, produktionsbaserade utsläpp och konsumtionsbaserade utsläpp[31]. För varje metod presenteras både de totala utsläppen i miljoner ton koldioxidekvivalenter och utsläppen

per capita i ton koldioxidekvivalenter. Det är tydligt att de konsumtionsbaserade utsläppen är högre, vilket indikerar att konsumtionen har stor påverkan på mängden utsläpp jämfört med de direkt mätbara utsläppen från territoriella utsläpp.

Den territoriella metoden inkluderar endast utsläpp som sker inom Sveriges gränser. Denna metod bygger på detaljerad datainsamling och kategoriserar utsläpp baserat på vart de sker. Insamlingen av data sker enligt internationella riktlinjer och fokuserar faktiska utsläpp från olika källor, som till exempel utsläpp från personbilar inom transportsektorn[31]. Beräkningarna baseras på aktivitetsdata, ett exempel på aktivitetsdata som används är energianvändning inom olika sektorer. Dessa beräkningar utförs sedan med en bottom-upmetodik, vilket innebär man börjar med detaljerad information på lägsta nivå som sammanställs till en övergripande bild på nationell nivå. I Sverige inkluderas även naturens upptag av koldioxid i de territoriella beräkningar av utsläpp och upptag inom Sveriges gränser[31].

Den andra metoden fokuserar på produktionsbaserade utsläpp som är kopplad till ekonomiska aktiviteter som ger upphov till utsläpp och sammanställas av Statistiska centralbyrån (SCB). Det produktbaserade utsläppen inkluderar utsläpp skapade både inom och utanför Sveriges gränser men endast av svenska ekonomiska aktörer[32]. I dessa beräkningar inkluderas även utsläpp från internationella transporter, vilket resulterar i högre siffror jämfört med de territoriella utsläppen[32].

För att få en mer heltäckande bild av klimatpåverkan inkluderas även utsläpp som orsakas av konsumtion inom och utanför landets territorium. Detta syftar den tredje metoden till att visa. Konsumtionsbaserade utsläpp som mäter utsläpp baserade på konsumtion och innefattar utsläpp av produktionen av varor utanför Sverige, som sedan importeras och konsumeras i Sverige[32]. Konsumtionsbaserade utsläpp inkluderar ekonomisk statistik för inköp och försäljning samt modellberäkningar för att uppskatta utsläppen i produktionsländerna, vilket kan medföra osäkerheter i beräkningarna[31].

Naturvårdsverket rapporterade att de konsumtionsbaserade utsläppen var cirka 8 ton koldioxidekvivalenter per person år 2021[31]. De konsumtionsbaserade utsläppen består till 60 procent av hushållens konsumtion och 40 procent beror av offentliga investeringar och konsumtion[33]. För att uppnå miljömålen bör det globala genomsnittet inte överskrida 1 ton koldioxidekvivalenter per person och år till 2050[31].

2.4.1 Globala Standarder för Utsläppsberäkningar

Det finns flera standarder för att beräkna klimatpåverkan och utsläpp från olika länder, sektorer och verksamheter. Dessa syftar till att skapa en mer enhetlig klimatrapporering. De standarder som undersöks i detta arbete är IPCC, Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) och ISO 14064[14].

GHG Protocol har utvecklats av World Resources Institute (WRI) och World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) och är en standard för företag att mäta och rapportera sina växthusgasutsläpp. GHG Protocol delar in utsläppen i tre kategorier, den första kategorin behandlar direkta utsläpp och tillhör Scope 1. Den andra kategorin behandlar energiindirekta utsläpp och tillhör Scope 2, den tredje kategorin behandlar andra indirekta utsläpp och tillskrivs Scope 3[34]. GHG Protocol har även metoder för rapportering vid implementering av kolsänkor genom att inkludera riktlinjer som bygger på att förbättra och underlätta rapportering av markanvändningsaktiviteter och koldioxidborttagningar[34].

Greenhouse Gas Protocol har utvecklat en standard bättre anpassad för klimatrapporering i städer. Detta gjorde i samarbete med C40-nätverket, World Resources Institute och ICLEI

(Local Governments for Sustainability), tillsammans har de skapat Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC)[35]. GPC syftar till att standardisera mätning och rapportering av växthusgasutsläpp i städer. Detta är särskilt viktigt eftersom många städer ännu inte har genomfört egna utsläppsinventeringar, vilket försvårar en global uppskattning av urbana utsläpp[35]. Genom att implementera GPC kan städer lättare analysera och rapportera sina utsläpp, vilket underlättar jämförelser mellan olika städer och bidrar till ett mer enhetligt tillvägagångssätt för att förstå och hantera utsläpp.

ISO 14064 är en annan internationell standard som omfattar mätning och rapportering av växthusgasutsläpp på organisationsnivå och projektbaserade utsläppsminskningar[36]. På samma sätt som GHG Protocol delas utsläppen in i direkta och indirekta utsläpp[14]. Standarden inkluderar även kolsänkor i form av återbeskogning och anläggningar för koldioxidinfångning och lagring[36]. Denna standard ger riktlinjer för att kvantifiera utsläpp och upptag av växthusgaser och betonar användningen av ett livscykelperspektiv[36]. Livscykelanalys (LCA) är en metod som utvärderar den totala miljöpåverkan av en produkt eller process över hela dess livscykel och kan omfatta växthusgasutsläpp som en del av den totala miljöbelastningen[14].

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) är en FN organisation som fokuserar på att utvärdera och sammanställa vetenskap gällande klimatförändringar orsakade av mänskliga aktiviteter. IPCC delar upp rapporteringen av utsläpp i flera olika huvudsektorer, AFOLU-sektorn (Agriculture, Forestry, and Other Land Use) omfattar jordbruk, skogsbruk och annan markanvändning och är en stor källa till växthusgasutsläpp[37]. IPPU-sektorn (Industrial Processes and Product Use) täcker industriella processer och energisektorn omfattar utsläpp från förbränning av fossila bränslen inom uppvärmning, elproduktion, transport och industri. Avfallssektorn är ansvarig för utsläpp från deponering och förbränning av organiskt avfall[37].

En ytterligare viktig del av IPCC:s arbete är att betona rollen av LULUCF (Land Use, Land-Use Change and Forestry). LULUCF omfattar växthusgasutsläpp och upptag från markanvändning, markanvändningsförändringar och skogsbruk, vilket är avgörande för klimatpolitiken som syftar till att minska utsläppen och hantera klimatförändringar[38]. LULUCF är en delmängd av AFOLU. Allt som ingår i LULUCF inkluderas också i AFOLU, men AFOLU täcker även jordbruksrelaterade utsläpp som inte ingår i LULUCF[39].

2.5 REFLOW

I projektet REFLOW beskrivs de fysiska resursflödena i en kommun, för att kunna föreslå och prioritera åtgärder för att minska miljöbelastning från stadens invånare och verksamheter[6].

REFLOW tillämpar en metod som integrerar materialflödesanalys (MFA) och livscykelanalys (LCA) för att kvantifiera koldioxidutsläpp kopplade till fysiska resursflöden[6]. Denna metod beräknar utsläpp baserat på energi- och materialförbrukning inom urbana ekonomiska sektorer, vilket skapar en direkt koppling till koldioxidcykelmodeller och ger en fördjupad förståelse för urbana kolflöden. Att spåra alla fysiska kolflöden inom städer är avgörande eftersom aktiviteter över ekonomiska sektorer, inklusive konsumtion påverkar koldioxidutsläppen.

Den nuvarande kunskapsluckan kring koldioxidflöden som påverkar naturmiljöer eller inte syns i ekonomisk rapportering markerar ett stort forskningsbehov. Detta examensarbete kan fylla denna lucka genom att bidra med betydande insikter både till projektet och det bredare forskningsfältet. Arbetet kommer att undersöka och analysera koldioxidflöden, inklusive kolsänkors potential att sänka koldioxidhalten i atmosfären, vilket ger en bättre förståelse för deras påverkan på naturmiljöer och ekonomisk rapportering. Detta möjliggör att mer effektiva metoder kan utvecklas för att hantera koldioxidflöden och kolsänkor.

Ett centralt problem för att bedriva ett övergripande miljöarbete i kontexten av en stad är att lokala åtgärder för att minska koldioxidutsläppen i städer ofta begränsas till specifika ekonomiska sektorer, vilket komplicerar möjligheterna till en övergripande minskning av utsläppen. Ett annat centralt problem är urbanisering och en ständigt växande befolkning som leder till utbyggnad av städer[40]. Detta kan leda till markanvändningsförändringar som kan förstärka koldioxidutsläppen och skapar utmaningar när det gäller att minska utsläppen i urbana områden[40].

2.6 Tidigare studier

2.6.1 Nationella kolflöden

I rapporten *"Urban Carbon Flow Stockholm: A study of the carbon cycle in an urban context"* skriven av Sofia Gunnarsson (2022) undersöks Sveriges nationella kolflöden[37]. Denna studie använder ämnesflödesanalys för att identifiera och kvantifiera de antropogena kolflödena mellan sektorer enligt IPCC:s riktlinjer från 2006. Sektorerna som inkluderades var jordbruk, skogsbruk och annan markanvändning (AFOLU), industriella processer och produktanvändning (IPPU), energi och avfall. Studien inkluderar även import, export, utvinning från litosfären och utsläpp till atmosfären. Rapporten analyserar och visualiserar hur kol flödar mellan varje sektor[37].

Rapporten identifierar de största kolflödena inom energisektorn, IPPU-sektorn och AFOLU-sektorn. Inom energisektorn är transporter, elproduktion och uppvärmning de främsta orsakerna till koldioxidutsläpp. Dessa utsläpp är i hög grad kopplade till användningen av fossila bränslen. Skogsbruk inom AFOLU-sektorn fungerar som en viktig kolsänka genom att absorbera betydande mängder kol[37].

2.6.2 Urbana kolflöden

I rapporten av Chen et al. (2020), analyserades kolflöden i åtta städer i världen[41]. Rapporten förtydliga att transportsektorn står för en stor andel av kolflödena i dessa städer. I länder som fortfarande är beroende av fossila bränslen för energiproduktion, bidrar denna sektor med stora mängder utsläpp[41]. Rapporten avslöjar att utsläpp från byggsektorn varierar mellan utvecklade länder och utvecklingsländer. Det framgår att i städer som Beijing och São Paulo, vilka är under utveckling, är byggsektorns andel av stadens totala utsläpp 12%, i kontrast till städer som Los Angeles och London där motsvarande siffra bara är 8%[41].

Studien av Karna Dahal och Jari Niemelä, "Cities' Greenhouse Gas Accounting Methods: A Study of Helsinki, Stockholm, and Copenhagen" undersöker de utsläppsberäkningsmetoder som används av Helsingfors, Stockholm och Köpenhamn. Studien belyser vikten av att minska antropogena utsläpp av växthusgaser i städer, eftersom dessa står för över 70 % av de globala energirelaterade utsläppen[42]. Rapporten beskriver att städerna följer ofta nationella strategier för att minska sina utsläpp, men utvecklar också egna strategier för att hantera de lokala effekterna av klimatförändringar[42]. Städer kan vara särskilt sårbara för havsnivåhöjningar och extrema väderförhållanden.

Studien identifierar tre huvudsakliga beräkningsmetoder som städer kan använda: territorie-, produktions- och konsumtionsbaserade system[42]. De flesta städer, inklusive Helsingfors och Köpenhamn, beräknar territoriella eller produktionsbaserade utsläpp[42]. Konsumtionsbaserade system, som inkluderar utsläpp från konsumtion av varor och tjänster, används inte allmänt trots att de ger en mer omfattande bild[42].

Dahal och Niemelä föreslår att städerna behöver förbättra sina utsläppsberäkningssystem för att inkludera fler sektorer och skapa mer robusta och transparenta metoder[42].

2.7 Stockholm stad

Stockholm stad siktar på att vara en fossilfri och klimatpositiv stad år 2040, detta mål styr stadens utveckling inom nybyggnation, trafikplanering och organisationens utveckling[43]. Miljöbarometern redovisar stadens miljöstatistik och visar vägen mot att bli en fossilfri och klimatpositiv storstad till 2040[43].

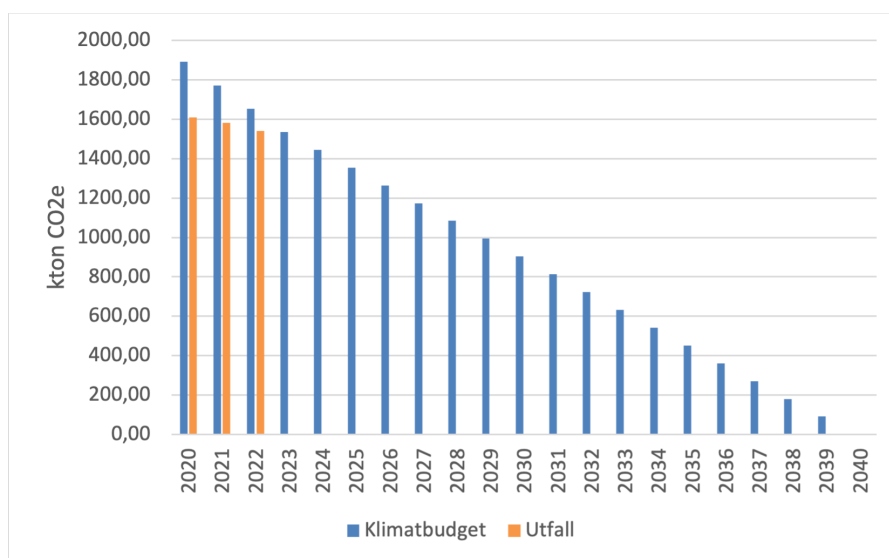
Utöver att bli en fossilfri och klimatpositiv stad fokuserar Stockholm stad också starkt på bostadsbyggande för att mildra bostadsbristen. Stadens mål är att bygga 140 000 nya bostäder mellan 2010 och 2035[44]. I december 2022 uppgav staden att cirka 69 000 bostäder påbörjats, och för 2023 och 2024 är målet att godkänna detaljplaner innehållande 8 000 nya bostäder[44].

Detaljplanen är ett dokument som beskriver hur mark och vatten får användas inom ett område. Om detaljplanen berör bostäder specificerar dokumentet hur mycket och vart man får bygga[44]. Till skillnad från detaljplanen är översiktsplanen en mer övergripande plan som beskriver stadens långsiktiga utveckling av bebyggelse, mark- och vattenanvändning. Översiktsplanen sätter upp ramar och riktlinjer för hur områden ska utvecklas för att uppnå stadens visioner och mål[45].

2.7.1 Kolbudget och utfall

Inom ramarna för Klimathandlingsplanen 2020-2023 har Stockholms stad satt en klimatbudget i enlighet med sitt mål att uppnå fossilfrihet till år 2040. Stadens klimatbudget begränsar utsläppen till en total mängd på 19 miljoner ton koldioxidekvivalenter fram till 2040, med en vision om noll nettoutsläpp vid slutet av perioden[46].

Figur 2 illustrerar Stockholms stads klimatbudget och faktiska utsläpp av koldioxidekvivalenter mellan åren 2020 och 2040. De blå staplarna representerar det årliga utfallet som utgörs av de faktiska utsläppen och de röda staplarna visar den årliga klimatbudgeten för varje år. Utsläppen från 2020 till 2022 ligger under den fastställda klimatbudgeten för respektive år, vilket visar att staden rapporterar att utsläppen är lägre än målsättningarna för dessa år[46].



Figur 2: Stockholm stads kolbudget och utfall mellan åren 2020 och 2040[46]

Enligt figur 2 framgår det att klimatbudgeten för 2030 nästan har halverats jämfört med 2020, vilket visar på att utsläppsminskningar är nödvändig för att uppnå stadens miljömål. Efter 2030 fortsätter klimatbudgeten att minska tills den når noll vid 2040[46].

Enligt klimatbudgeten ska utsläppen minskas till max 1,5 ton koldioxidekvivalenter per person till 2023[47]. Viktigt att tillägga är att i dagsläget beräknar Stockholm stad utsläppen enligt GHC och inkluderar endast utsläpp från scope 1 och scope 2[47]. De konsumtionsbaserade utsläppen representeras i GHC av scope 3 och inkluderas därför inte i klimatbudgeten. Utöver detta inkluderas inte kolsänkor i stadens kolbudget[47].

2.7.2 Kolförråd i Skog och Mark

I ”Befintligt kolförråd och kolsänka i skog och mark inom Stockholms stad”, en rapport från 2021 författad av Anna Lindahl och Mattias Lundblad, fastställs att skog och mark i Stockholms stad är en betydande kolsänka och kollager[48]. Marken är på vissa ställen rika på organiskt kol, som har ackumulerats i många år[48]. Stockholm stads sammanlagda kollager uppskattas till 1729 kiloton, vilket motsvarar cirka 6300 kiloton koldioxidekvivalenter som i sin tur motsvarar fyra års utsläpp från stadens energianvändning[48].

Rapporten lokaliserar ungefär en tredjedel av detta kolförråd inom skyddade naturområden, där majoriteten av kolförrådet återfinns inom trädklädda områden[48].

Stockholms stads skog och mark fungerar som en naturlig kolsänka, med ett årligt koldioxidupptag på ungefär 35 000 ton koldioxidekvivalenter[48]. Det är värt att notera att 40% av stadens mark agerar kolsänka, där den största bidragande faktorn är trädens förmåga att absorbera koldioxid[48]. Studien rapporterar också att cirka 18% av stadens mark fungerar som en kolkälla, huvudsakligen på grund av utsläpp från torvmarker, vilka står för ett sammanlagt årligt nettoutsläpp av 2 000 ton koldioxidekvivalenter[48].

Vidare konstaterar rapporten att ungefär 42 % av marken i Stockholms stad anses befinna sig i balans, vilket innebär att den varken fungerar som en källa eller sänka för koldioxid[48]. Mark som anses vara i balans berör primärt exploaterad mark.

Tabell 3: Visar koldioxidupptag, utsläpp samt lager av skog och mark i Stockholm stad 2022[48].

Skog och mark	Värde [kiloton CO ₂ e]
Nettoupptag	-35
Kolsänka (upptag)	-37
Kolkälla (utsläpp)	2
Kollager	1 729

Tabell 3 visar Stockholms stads årliga upptag och utsläpp av växthusgaser från skog och mark. Det årliga upptaget uppgick till 37 kiloton koldioxidekvivalenter 2022 och utsläppen från kolkällor i skog och mark uppmättes till 2 kiloton koldioxidekvivalenter samma år[48]. Nettoupptag blir således 35 kiloton koldioxidekvivalenter per år och detta innebär att denna sektor tar upp mer kol från atmosfären än vad som släpps ut.

3 Metod

Arbetet började med att genomföra en omfattande litteraturstudie följt av en analys med syfte att undersöka och kartlägga urbana kolflöden med särskilt fokus på Stockholm stads geografiska område. Det huvudsakliga målet med litteraturstudien var att analysera klimatutsläpp, kolinbinding och kollager i urbana miljöer.

3.1 Litteraturstudie

Det första steget innebar inläsning på området för att identifiera relevanta sökord för vidare sökning inom området. Sökord som identifierades var *kolflöden*, *carbon flow*, *koldioxidutsläpp*, *greenhouse gas emission*, *växthusgasutsläpp* och *carbon dioxide emissions*. Vidare begränsades sökningen geografiskt till Stockholm stad med sökord som *Urban Carbon flow*, *Carbon Flow Stockholm* och *MFA (Material Flow Analysis) Stockholm*. Därefter inkluderades även sökord som *kolsänkor*, *carbon sink*, *carbon cycle*, *carbon in soil* och *carbon sequestration*, samt termer relaterade till biologiskt kol som *biogenic carbon*, *biogenic Carbon—capture and sequestration* och *biochar*. Informationen som var av relevans i litteraturstudien behandlade klimatutsläpp, kolinbindning och kollager som förekommer i urbana miljöer. Sökningarna utfördes i vetenskapliga databaser som Google Scholar och ScienceDirect, men även andra relevanta resurser från Stockholm stad och Svenska myndigheter togs med.

För att välja ut relevant litteratur lästes först artikelsammanfattningar för att avgöra om litteraturen var av relevans för arbetet. Därefter valdes litteraturen ut baserat på årtal och geografiskt område, eftersom detta arbete behandlar ett aktuellt ämne där informationen snabbt blir föråldrad. Även den geografiska faktorn och landets energiförsörjning har stor påverkan på resultatet. Under litteraturstudien uppmärksammades att länder med hög andel fossila bränslen i sin energimix inte är representativa för Stockholms stads kolflöden och koldioxidutsläpp, eftersom Sveriges energimix har låg klimatbelastning jämfört med många andra länder. Därför användes främst litteratur från Sverige, Stockholm och andra nordiska länder med liknande energimix.

Genom inläsning på ämnet framkom det att det finns många olika standarder och metoder för klimatredovisning och beräkning av utsläpp. Därför genomfördes studier av klimatredovisningsstandarder och identifiering av dessa. Arbetet undersöker de vanligaste standarderna för klimatredovisning såsom IPCC, GHG Protocol och ISO 14064. Detta avsnitt behandlades i bakgrunden och inkluderade även en analys av skillnaden mellan territoriell, produktbaserad och konsumtionsbaserad redovisning. Detta genomfördes för att förstå vilken metod som används av Stockholms stad och därigenom vilka utsläpp som redovisas och vilka som saknas. Detta gav en fördjupad förståelse av kolflöden inom Stockholms stads geografiska område.

3.1.1 Datainsamling

För att analysera och visualisera urbana kolflöden i Stockholm utfördes datainsamling med fokus på befintlig information från Stockholms stad. Klimatutsläpp och kolflöden i olika sektorer inom stadens gränser analyserades. Nyckeltal och information samlas in från Stockholms stads miljöbarometer, Naturvårdsverket och vetenskapliga artiklar.

Utsläppen från avfallssektorn i Stockholms stad bestämdes till samma procentuella andel baserat på befolkning som för hela Sverige, eftersom staden har flera avfallsstationer inom sina gränser [49]. Trots att Stockholms klimatredovisning inte specifikt rapporterade utsläppen från avfallssektorn, antogs denna sektor ändå bidra med utsläpp. Därför användes Sveriges nationella fördelning av avfallssektorns utsläpp som uppskattning för Stockholms stad.

Den insamlade informationen om kolflöden sammanställdes sedan i en tabell och redovisades i både koldioxidekvivalenter och mängden kol för varje flöde in och ut från varje sektor. Baserat på detta skapades en tabell som sammanställde sektorernas bidrag till klimatutsläpp. De totala utsläppen redovisas i kiloton koldioxidekvivalenter och kiloton koldioxidekvivalenter per person för att kunna jämföras med Sveriges nationella genomsnitt av utsläpp per capita. Vidare omvandlades utsläppen till mängden kol som flödena innehåller för att kunna användas i beskrivningen av stadens kolflöden.

3.1.2 Flödesschema

Resultaten från litteraturstudien sammanställdes i ett flödesschema som illustrerar kolflöden uppdelade på olika sektorerna inom stadens gränser. Det konsumtionsbaserade utsläpp som inte ingår i stadens statistik visualiseras i flödesschemat utanför stadens gräns men redovisas inte i tabellen. Flödesschemat skapades i programvaran "Canva". Flödesschemat kompletterades med inflöden hämtade från Länsstyrelsernas energistatistik[50], där energianvändningen av olika energislag fanns representerade i procent. Detta kunde sedan användas för att bestämma de olika sektorernas användning av kolhaltiga bränslen.

3.1.3 Antaganden

- Inga kollager inom sektorerna förutom mark och skog
- Utsläpp från avfallsektorn förhåller sig procentuellt lika i Sverige som i Stockholm, baserat på stadens befolkningsandel.
- Stadens energianvändning antas spegla länets energianvändning procentuellt

3.2 Potentialberäkningar av kolsänkor

I arbetet utfördes, utöver den ingående litteraturstudien, en kvantitativ analys för att hitta potentiella urbana kolsänkor. Relevanta kolsänkor valdes ut baserat på två kriterium, teknisk mognadsgrad och om implementering var möjlig inom Stockholms stads geografiska område. Den tekniska mognadsgraden avgjordes utifrån om kolsänkan är redo att implementeras eller om den befinner sig i forskningsstadiet. En kolsänka som endast är i forskningsstadiet eller pilotprojekt bedömdes ha en låg teknisk mognadsgrad, medan metoder som är redo att implementeras storskaligt bedömdes ha en hög teknisk mognadsgrad.

En analys genomfördes för att besvara den andra frågeställningen, vilka kolsänkor är mest relevanta för en stad generellt, och mer specifikt Stockholm stad. Detta gjordes genom att sammanställa och beräkna kolsänkorna i kalkylbladsprogrammet MS Excel.

För att utreda kolsänkornas potential beräknades först hur stor yta som potentiellt var tillgänglig för implementering av kolsänkan i Stockholm stad. I beräkningarna antogs ett specifikt område i kvadratmeter för varje åtgärd, vilket representerar den totala ytan där åtgärden kunde genomföras. Antaganden för områden presenteras under 4.4. Områden samt nyckeltal som användes i beräkningar presenteras i tabell 4 nedan.

Nyckeltal i tabell 4 är hämtade från rapporten skriven av miljöförvaltningen *Potentiella kolsänkor i Malmö stad* 2022[23]. De nyckeltal som hämtades var kolinnehåll i organisk struktur, kolinnehåll i marken och årlig kolinlagring. Kolinnehållet i både den organiska strukturen och marken samt årlig kolinlagring anges i kilogram per kvadratmeter. Kolinnehållet representerar mängden kol som finns vid etablering, medan årlig kolinlagring är mängden kol som lagras varje år, vilket ökar det totala kolinnehållet över tid.

Tabell 4: Nyckeltal som användes i beräkningarna av kolsänkor, sammanställda av miljöförvaltningen i Malmö stad[23]. Den visar även det uppskattade området som ansågs vara tillgängligt för implementering av respektive åtgärd i Stockholm stad. Nyckeltalen presenteras som kolinnehåll i biomassa ovan mark, kolinnehåll i marken, årlig kolinlagring samt tidsperioden för hur länge åtgärden förväntas lagra in kol.

Åtgärd	Område [m ²]	Biomassa [kgC/m ²]	Mark [kgC/m ²]	Årlig [kgC/m ² år]	Tid År
Gräs	56000	1,3	6,8	0,25	25
Gräs+biokol	56000	1,3	8,4	0,25	100
Växtbädd	56000	0,04	9,5	0,13	30
Växtbädd+biokol	56000	0,04	11	0,13	30
Buskar	13000	4,2	2,2	12	30
Buskar+biokol	13000	4,2	3,8	12	30
Stadsträd	1500	10 (kg/träd)	120	12	50
Stadsträd+biokol	1500	10	520	12	50
Sedumtak	93000	0,28	0,9	0,09	25
Sedumtak+biokol	93000	0,28	2,7	0,09	5
Prärietak	93000	49	3,1	0,085	5
Flerbostadshus med trästomme	70000	211 (kg/m ³)			100

Angående nyckeltalen som anges i tabell 4 och användes i beräkningarna hämtades från miljöförvaltningens rapport i Malmö stad, miljöförvaltningen ansågs vara en trovärdig källa inom detta område eftersom det är en offentlig myndighet inom miljö- och hållbarhetsfrågor. Nyckeltalen i rapporten baseras på vetenskapliga underlag. Även om nyckeltalen inte var specifikt anpassade för Stockholm stad, gav de en bra uppskattning av storleksordningen på kolsänkorna.

Tidsperioden för varje åtgärd definierades olika för växande biomassa som gräs, buskar och träd och icke levande biomassa som träprodukter. För växande biomassa som fungerade som kolsänkor angavs tidsaspekten som den period under vilken den årliga kolinlagringen ägde rum. Denna motsvarade tillväxtfasen, då växten tillväxte snabbare än den bröts ned. Under denna tillväxtfas skedde en årlig kolinlagring eftersom växten tog upp koldioxid från atmosfären och lagrade det som kol i sin biomassa, både ovan och under marken. Efter det att växten nådde ett jämviktsläge skedde tillväxt och nedbrytning i samma takt. Vid detta läge skedde ingen ytterligare kolinlagring eftersom allt kol redan var ackumulerat i växtens biomassa.

För icke-levande kolsänkor som träbyggnader beskrevs tidsperspektivet hur länge kolet förblev lagrat. Träbyggnader kunde därför beskrivas ha en kolsänka som var konstant under hela byggnadens livslängd, exempelvis 100 år eller mer. Under denna tid sker ingen årlig kolinlagring.

Tabell 5: Parametrar för beräkning av kolinlagring för ett specifikt område

Parameter	Värde
Område	$A \text{ m}^2$
Kolinnehåll i organisk struktur	$C_{\text{organisk}} \text{ kg/m}^2$
Kolinnehåll i mark	$C_{\text{mark}} \text{ kg/m}^2$
Årlig kolinlagring	$L_{\text{år}} \text{ ton CO}_2\text{e/år}$
Tidsperiod	$T \text{ år}$

I tabell 5 presenteras de parametrarna som används för att beräkna det totala kolinnehållet för respektive åtgärd. Utifrån nyckeltalen och området kunde sedan den totala mängden kol (Ton

C) som åtgärden har förmåga att lagra in totalt över hela tidsperioden beräknas. Summan av kolinnehållet i både den organiska strukturen och marken samt årligt bundet kol multiplicerat med området, beräkningen beskrivs av ekvationerna 1 - 3.

Ekvation 1 beskriver vilka parametrar som användes för att beräkna det totala kolinnehållet i vardera åtgärd.

$$\text{Totalt kol (Ton C)} = \frac{(C_{\text{organisk}} \times A) + (C_{\text{mark}} \times A) + (L_{\text{år}} \times A \times T)}{1000} \quad (1)$$

I ekvation 2 visas hur årlig kolinlagring beräknades genom att multiplicera årlig kolinlagring per kvadratmeter med området.

$$\text{Årligt bundet kol (ton C m}^2\text{/år)} = L_{\text{år}} \times A \quad (2)$$

Ekvation 3 visar hur årligt bundet koldioxid beräknades baserat på årligt bundet kol, med hjälp av omvandlingsfaktorn som representerar förhållandet mellan molvikten av koldioxid och kol.

$$\text{Årligt bundet koldioxid (ton CO}_2\text{/år)} = \text{Årligt bundet kol} \times \frac{44}{12} \quad (3)$$

3.2.1 Antagande vid potentialberäkningar

Vid potentialberäkningarna av kolsänkorna uppskattades olika områden som skulle vara tillgängliga för implementering av kolsänkor. Dessa antaganden presenteras i tabell 6.

Tabell 6: Nyckelfaktorer för beräkning av den tillgängliga ytan för implementering av kolsänkor.

Faktor	Beskrivning
Grönytefaktor (GYI)	0,4[51]
Genomsnittlig byggnadsarea	265 m ² [52]
Ekologiskt effektiv yta per byggnad	159 m ²
Nybyggnation av bostäder	7000[44]
Trädstrategi	Öka stadsträd med 1500 nya träd[23]
Takarea	350 * 265 m ²
Buskmark	2 % ökning årligen[23]

I tabell 6 framgår det att grönytefaktor (GYF) är bestämdes till 0,4. Grönytefaktorn (GYF) är ett mått som används för att kvantifiera andelen gröna ytor i ett område[51]. Detta resulterade i en ekologiskt effektiv yta (ekoyta) på 159 m² per byggnad. Stockholm stad har en målsättning att att uppföra 7000 nya bostäder årligen, vilket krävs för att nå målet om 140 000 nya bostäder till år 2035. Om alla nybyggnationer antas vara flerbostadshus med 20 lägenheter i varje byggnad vilket resulterade i 350 nya byggnader årligen. Därmed finns en potential att omvandla områden motsvarande ekoytan för 350 av dessa byggnader till grönområden, bruksgräs och växtbäddar varje år.

Malmö stad har antagit målet att öka antalet stadsträd med cirka 1500 varje år fram till 2030, vilket inte inkluderar återplantering av träd som har dött. Detta mål ligger i linje med Stockholm stads ambition att öka krontäckningsgraden. För befintliga buskarealer, som utgör omkring 40 ha, antogs en årlig ökning på cirka 2 %, vilket motsvarar ca 13 000 m² per år[23][48].

Antagandet för antalet gröna tak baseras på den genomsnittliga takarean för flerbostadshus, som är 265 m²[52]. Om varje ny bostad i de planerade 350 nya byggnaderna förses med gröna

tak, kommer den totala ytan av gröna tak att vara 92 750 m². Vidare anats träd, buskar, gräs växa lika snabbt i Stockholm stad som i Malmö.

3.3 Fallstudie

Utifrån potentialberäkningarna, där de mest relevanta åtgärderna för kolinlagring i Stockholms stad identifierades, kunde en fallstudie för Norra Djurgårdsstaden formuleras. Fallstudien baserades på de kolsänkor som visade sig ha högst potential för kolinlagring efter genomförda beräkningar. Fallstudien baserades på detaljplanen Norra 2, beläget i Norra Djurgårdsstaden. Denna detaljplan ansåg vara representativ eftersom den är nyligen genomförd och att liknande planer håller på att genomföras på andra platser i norra Djurgårdstaden.

I fallstudien genomfördes en mer detaljerad beräkning av kolsänkornas potentiella storlek för ett specifikt fall. Utöver potentialberäkningen analyserades kostnaden för implementeringen av kolinlagringsåtgärder i Stockholms stad. Fallstudien analyserade även om det fanns några andra väsentliga fördelar och nackdelar som kunde påverka den urbana miljön eller försvåra implementeringen av åtgärderna. Målet med fallstudien var att utreda och analysera olika tekniker för kolinlagring i en urban miljö. Analysen utgick från förutsättningar i Norra 2 och inkluderade potentialen för att minska klimatpåverkan samt övriga aspekter som kunde behöva beaktas vid implementeringen av åtgärderna.

Ytorna för tak, grönområden och platser för stadsträd uppskattades genom manuella mätningar från plankartan. Att dessa uppskattningar kan innehålla en viss felmarginal noterades. För varje åtgärd beräknades den maximala potentialen för kolsänkor om metoderna implementerades fullständigt på de tillgängliga ytorna. För varje åtgärd beräknades den ackumulerade kolinlagringen baserat på arealen under den valda tidsperioden.

Tabell 7: Tillgängliga arealer för kolsänkor i bostadsområdet Norra 2.

Åtgärdsområde	Areal	Enhet
Tak	15 643	m ²
Park	7 500	m ²
Stadsträd	168	st
Bostäder	600	st

Tabell 7 visar det befintliga areorna som fanns tillgängliga utifrån uppskattningar från plankartan för Norra 2. Totalt 15 643 m² av takytor är tillgängliga för potentiella kolsänkor. Denna yta kan användas för installation av gröna tak eller andra kolsänkor. Parkområden täcker 7 500 m², vilket ger utrymme för planteringar, växtbäddar och andra åtgärder som kan bidra till kolinlagring. Det finns totalt 168 stadsträd och 600 bostäder i området. Dessa bostäder kan inkludera åtgärder som träbyggnader för att öka kolinlagring samt implemtering av gröna tak.

Genom att placera träd längs områdets vägar som inte redan var försedda med träd, kunde antalet stadsträd maximeras. Mellan varje träd användes samma avstånd som på den befintliga plankartan, vilket innebär 7 träd per 50 meter. Därefter mättes längden på de gatukanter som inte redan var försedda med stadsträd, detta resulterade i ytterligare 126 träd och totalt 294 träd.

I fallstudien maximerades mängden gröna tak med högst kolinlagringsförmågan, priäretak på alla takytor. Vidare maximerades antalet stadsträd längs områdets gator för att skapa alléer. För nybyggnation med trästomme antogs att alla hus i bostadsområdet byggs med trästomme med samma nyckeltal som i potentialberäkningarna i avsnitt 4.2.

Fallstudien beaktade även tidsaspekten genom att utvärdera kolsänkorna över tidsperioderna 2030, 2040 och 2125, med startår 2025. Det innebär att 2030 visade potentialen efter 5 år, 2040 efter 15 år och 2125 efter 100 år. Vid beräkning av kolsänkepotentialen för varje metod användes samma nyckeltal som i de initiala potentialberäkningarna Tabell 5, men med nya uppskattade ytor i Tabell 7 för implementering av kolsänkorna.

För att representera hela det nybyggda bostadsbeståndet i Stockholm stad skalas den representativa detaljplanen för Norra 2 upp. Norra 2 har 600 bostäder, vilket innebär att cirka 12 sådana områden behöver byggas årligen för att nå målet om 7000 nya bostäder per år. För att bestämma potentialen för hela beståndet multiplicerades resultatet för Norra 2 med 12 för de olika tidsperioderna.

Den ackumulerade kolinlagringen för de tre undersökta åtgärderna i uppskattningen av Norra 2 jämfördes sedan med de ackumulerade utsläppen till år 2040 baserat på Stockholms stads klimatbudget. Det befintliga kolsäknan i skog och mark inkluderades även.

3.3.1 Förändrad markanvändning

För att undersöka hur förändrad markanvändning påverkar kolsänkornas potential samlades data in från tidigare litteraturstudier, inklusive areal för Norra 2. Kolinnehåll i mark och vegetation samt areal för mark som fungerar som kolsänka hämtades från rapporten "Kolförråd och kolsänka i skog och mark inom stockholms stadskriven av Lindahl och Lundblad 2021[48]. Data från Lantmäteriets karttjänster användes för att uppskatta Norra 2 area i hektar och omvandlades till kvadratkilometer[53]. Sedan beräknades den förlorade kolsänkan och kollagret om Norra 2 skulle vara byggt på mark som fungerade som kolsänka.

3.3.2 Övriga aspekter

Utöver potentialen som kolsänka undersöktes även kostnader samt andra fördelar och nackdelar med implementering av varje metod. Kostnaden angavs i kr/koldioxidekvivalent och baseras på information från litteraturstudien.

3.4 Biokol och BECCS

Vid produktion av biokol och BECCS uppstår förluster i energiproduktionen till följd av lägre verkningsgrad. Metoden för att beräkna dessa förluster och deras klimatpåverkan beskrivs nedan.

Tidigare studier har visat att både biokolproduktion och BECCS leder till en minskning av den termiska och elektriska verkningsgraden jämfört med ett kraftvärmeverk som enbart producerar el och värme[54][55]. Verkningsgraderna sammanställdes från befintlig data och tre olika scenarier formulerades enligt nedan [54][55] [56].

- **Vanligt kraftvärmeverk**
 - Termisk verkningsgrad: 70%
 - Elektrisk verkningsgrad: 30%
- **Kraftvärmeverk med biokolproduktion**
 - Termisk verkningsgrad: 48%
 - Elektrisk verkningsgrad: 18%
 - Förlorad termisk energi: 31%

- Förlorad elektrisk energi: 40%
- **Kraftvärmeverk med BECCS**
 - Termisk verkningsgrad: 29%
 - Elektrisk verkningsgrad: 22%
 - Förlorad termisk energi: 58%
 - Förlorad elektrisk energi: 27%
- **Kraftvärmeverk med BECCS värmeåtervinning**
 - Termisk verkningsgrad: 68%
 - Elektrisk verkningsgrad: 15%
 - Förlorad termisk energi: 2%
 - Förlorad elektrisk energi: 51%

Den förlorade elektriska energin och den förlorade termiska energin kopplades sedan till mängden utsläpp av koldioxidekvivalenter som produktionen av den förlorade mängden el och värme skulle kunna ge upphov till. Detta gjordes genom att använda utsläppsfaktorer för residualmix 2023 för den förlorade mängden elektrisk energi[57]. För termisk energi användes två olika utsläppsfaktorer, en för naturgas och en för skogsflis[58].

Tabell 8 visar utsläppsvärden som används för att beräkna utsläpp för den förlorade termiska energin i form av utsläppsfaktorer hämtade från Naturvårdsverket [58]. Dessa faktorer inkluderar växthusgasutsläppen vid utvinning, transport, omvandling och förbränning av bränslen [58]. Utsläppen uppstår eftersom den förlorade mängden elektrisk och termisk energi måste produceras någon annanstans för att upprätthålla energileveranserna.

Tabell 8: Utsläppsfaktorer för fjärrvärmeproduktion, data från Naturvårdsverket[58].

Energislag	Utsläppsfaktor (gCO ₂ e/kWh)
Naturgas	248
Skogsflis	21,6

För att beräkna klimatpåverkan av den förlorade mängden elektrisk energi användes utsläppsfaktorn för den svenska residualmixen för år 2023, vilken är 524 g koldioxidekvivalenter per kWh[57].

Klimatnyttan av biokolproduktion beräknades utifrån antagandet att 52,500 ton biokol produceras med ett biokolsutbyte på 21 % [54], vilket resulterar i en inlagring av 2.5 ton koldioxidekvivalenter per ton biokol [59]. BECCS-anläggningens klimatnytta baserades på dess planerade kapacitet att fånga in 800,000 ton koldioxidekvivalenter per år[30]. För att beräkna klimatnyttan för varje scenario subtraherades utsläppen från produktionen av den mängd förlorad energi som behövde ersättas från dess kapacitet för kolinlagring.

Om biokolet istället framställs från råvaror som park- och trädgårdsavfall, vilka inte används för energiproduktion, kan utsläpp istället undvikas. Detta beror på att biokolsproduktionen inte bara skapar biokol utan även genererar el och värme. Denna extra energi kan ersätta annan energiproduktion och därmed undvika utsläpp av koldioxid[60].

För att fastställa den årliga produktionen av biokol i Stockholm stad användes data från rapporten Fjärrvärme med minusutsläpp 2019"[60]. Den totala produktionen av biokol under 2019

var 43,4 ton koldioxidekvivalenter. För att omvandla detta till ton biokol användes antagandet att varje ton biokol motsvarar 2,5 ton koldioxidekvivalenter[59].

För att bestämma mängden biokol som behövs importeras, subtraherades den produktionen av biokol enligt 2019 över 15 år från det totala behovet av biokol 2040 enligt den uppskalade versionen av fallstudien av Norra 2.

3.4.1 Antagande

Antaganden för produktion av biokol baseras på antaganden i Azzi (2019) samt Lövsta verkets planerade produktion om 600 GWh elektrisk energi respektive 2100 GWh termisk energi[54, 61]. För BECCS används Värtaverkets produktion eftersom de har en planerad BECCS-anläggning där. Värtaverket har en produktion om 750 GWh elektrisk energi och 1700 GWh termisk energi [62].

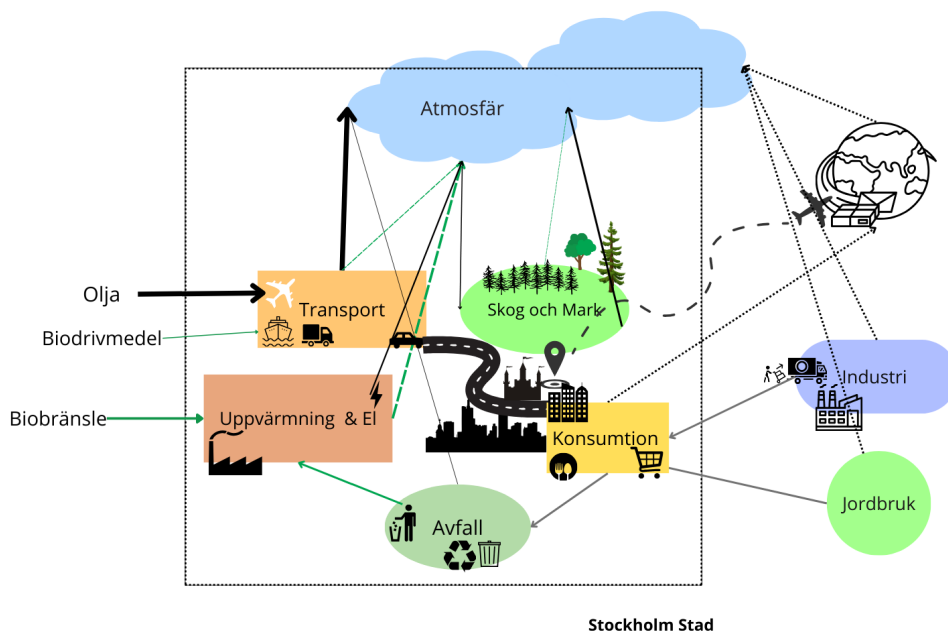
4 Resultat

4.1 Kolflöden och klimatutsläpp i Stockholm stads geografiska område

I detta avsnitt presenteras den sammanställda informationen om Stockholms stads kolflöden som ett resultat av litteraturstudien. Detta inkluderar utflöden i form av utsläpp av koldioxidkvivalenter, inflöden i form av energianvändning av kolhaltiga bränslen, samt kolsänkor och lager i skog och mark. Utsläppen är uppdelat på sektorer.

4.1.1 Flödesschema

I flödesschemat visas resultatet och analysen av litteraturstudien som ledde till en kartläggning av koldioxidflöden och kolsänkor i Stockholm stad under 2022[63]. Den insamlade datan har sammanställts från Naturvårdsverket samt Stockholms stads Miljöbarometer och illustreras i form av flödesschema och tabeller[63][64].



Figur 3: Flödesschemat visar utsläppen inom Stockholms geografiska område från olika sektorer som uppvärmning, elanvändning, hushåll, avfall, transport och skog och mark enligt Stockholms stads Miljöbarometer och Naturvårdsverket[63][64]. Mängden kol som flöden innehåller representeras av storleken på pilarna i flödesschemat. De svarta pilarna representerar fossila flöden och gröna pilar visar biogena kolflöden. De gröna streckade pilarna illustrerar biogena klimatutsläpp och de svarta streckade linjerna representerar klimatutsläpp som sker utanför stadens geografiska gränser.

Storlekarna på pilarna i flödesschemat i figur 3 är anpassade för att spegla mängden kol i olika bränslekällor. Biogena utsläpp, som avses med gröna streckade pilar i flödesschemat, består av koldioxid som frigörs från biologiska källor som skogar och grönområden inom stadens område. Dessa utsläpp utgör en del av den naturliga kolkcykeln och bidrar till den totala koldioxidbalansen i staden, men har traditionellt inte inkluderats i den internationella klimatrapporeringen enligt IPCC.

Utsläppen inom Stockholms geografiska område inkluderar sektorer som uppvärmning, elan-

vändning, transport, samt skog och mark, enligt Stockholm stads klimatrapporering[46]. Den geografiska gränsen representeras av den stora streckade ramen.

Utifrån flödesschemat i figur 3 framgår det även att en del utsläpp har allokerats utanför stadens gränser. Specifikt omfattas inte utsläpp relaterade till stockholmarnas resor utanför kommunens gränser, eller utsläpp från konsumtion av varor och livsmedel[63]. Stockholm stad rapporterar inte heller några utsläpp från industrisektorn eller jordbrukssektorn som befinner sig utanför stadens gränser och inkluderas inte stadens totala territoriella utsläpp.

Tabell 9: Presenterar en sammanställning av koldioxidutsläppen och kolflöden i Stockholms stad under 2022 uppdelat på olika sektorer, samt fördelningen av dessa utsläpp totalt och per person. Data sammanställd från Stockholms stads Miljöbarometer och Naturvårdsverket[63][64].

Enhet	Totalt	Avfall	El	Transport	Uppvärmning	Skog, mark
kilotonCO ₂ e	1570	32	280	880	380	-35
tonCO ₂ e/person	1,6	0,03	0,3	0,9	0,40	-0,04
%	100	2	18	56	24	-2
kton C	429	8,7	76	240	104	-9,5
tonC/person	0,45	0,01	0,08	0,25	0,11	-0,01

Tabell 9 presenterar en sammanställning av koldioxidutsläppen och kolflöden i Stockholms stad uppdelat på olika sektorer, samt fördelningen av dessa utsläpp per person och totalt. De totala utsläppet av koldioxidekvivalenter för staden uppgår till 1570 kiloton, där de enskilda sektorerna bidrar med varierande mängder. Noterbart är att transportsektorn står för den största andelen utsläpp med 880 kiloton koldioxidekvivalenter, medan skog och mark visar en negativ siffra på -35 kiloton koldioxidekvivalenter, vilket indikerar en nettoupptagning av kol i dessa områden. Nettoupptaget i skog och mark har även resulterat i ett lager av kol i skog och mark.

Industrisektorn har exkluderats utanför stadens geografiska gräns eftersom det inte finns några större industriföretag inom stadens område. Därför redovisas dessa inte i stadens territoriella klimatrapporering. De industrier som finns inom stadens gränser är huvudsakligen inriktade på el- och värmeproduktion, och deras utsläpp redovisas under fjärrvärme och el. Jordbrukssektorn hanteras också utanför stadens geografiska gräns. Varor och tjänster från jordbruks- och industrisektorerna måste därför importeras och visas i flödesschemat i figur 3 under konsumtion. Detta inkluderar både hushållens och den offentliga sektorns konsumtion. Detta innebär att stadens låga utsläpp per capita, som redovisas i tabell 9, inte inkluderar konsumtionsbaserade utsläpp, det vill säga utsläpp från import och export av varor och tjänster.

4.1.2 Transportsektor

Transportsektorn visar på stora kolflöden och är en betydande källa till utsläpp av växthusgaser. Den mindre gröna pilen i flödeschemat 3 är avsedd att reflektera användningen av biodrivmedel inom sektorn.

I tabell 10 visas de territoriella utsläppen från transportsektorn per person i Stockholms stads geografiska område under 2022[63]. Det framgår att vägtrafiken den största källan till klimatutsläpp, per invånare och totalt. Vägtrafiken inkluderar alla typer av fordon som kör inom stadens geografiska gränser, såsom personbilar, lastbilar, och bussar[63]. Utsläpp från arbetsmaskiner är näst störst och inkluderar utsläpp från maskiner inom staden[63]. Flygtrafiken står för en mycket liten andel och beror på att endast utsläpp från flygtrafik, upp till 915 meters höjd, från Bromma flygplats inkluderats[63].

Tabell 10: Visar utsläppen från transportsektorn i Stockholms stad 2022 per invånare, enligt data sammanställd från Stockholms stads Miljöbarometer[63]

Transport	Utsläpp [kton CO ₂ e]
Arbetsmaskiner	0,10
Båttrafik	0,05
Flyg	0,008
Vägtrafik	0,73
Totalt	0,89

4.1.3 Fjärrvärme och el

De största biogena utsläppen identifierades inom el och fjärrvärmesektorn, vilket framgår av storleken på det gröna streckade pilen som kommer från denna sektor i figur 3. Mindre biogena utsläpp återfinns även inom skog och mark.

Tabell 11: Utsläppens fördelning inom fjärrvärmesektorn i Sverige 2022, enligt data sammanställd från Stockholms stads Miljöbarometer[63]

Sektor	Andel [%]
Kraftvärme (el och fjärrvärme)	70%
Fjärrvärme från värmeverk	21%
Separat elproduktion	4%
Rökgasrening	0,10%

Tabell 11 visar fördelningen av utsläpp inom uppvärmningssektorn. I Stockholm stad står uppvärmningen för 24% av stadens totala utsläpp av koldioxidekvivalenter. Majoriteten av uppvärmningen i Stockholm stad, cirka 80%, sker via fjärrvärme, medan 15% kommer från el och de resterande 5% från eldningsolja. Som det framgår i Tabell 11, dominerade kraftvärmen med 70% av utsläppen inom fjärrvärmesektorn 2022[63].

Tabell 12: Bränslemixen inom fjärrvärme i Stockholm stad, 2021, enligt data sammanställd från Stockholms stads Miljöbarometer[63]

Energikälla	Andel 2021 [%]
Biobränsle	38%
Värme från sjöar och avlopp	19%
El	12%
Avfall	29%
Fossila bränslen	2%

Tabell 12 visar bränslemixen som användes 2021, där biobränslen utgjorde 38 %, följt av avfall med 29 %, och värme från sjöar och avlopp med 19%. Avfall inkluderar både biogena material, såsom organiskt avfall och trä, och fossila material, såsom plast. Användningen av el var 12%, och den minsta delen var fossila bränslen på endast 2%. Stockholm Exergi är ansvarig för drift av flera fjärrvärmeverk i regionen, och de arbetar för att minska utsläppen från sina verksamheter[30]. Från och med 2022 var Stockholm Exergis mål att fasa ut andelen fossila bränslen i fjärrvärmeproduktionen[63].

4.1.4 Konsumtionsbaserade utsläpp

Konsumtionsbaserade utsläpp representerar de utsläpp som genereras genom produktion av varor konsumerade av Stockholms invånare, men som tillverkas på andra platser. Jordgloben i figur 3 illustrerar det 64% av de konsumtionsbaserade utsläppen sker utomlands[65]. Till Sverige importeras både produkter, som kläder, skor och elektronik, samt råmaterial, energi, och tjänster[14]. År 2021 uppgick Sveriges nationella konsumtionsbaserade klimatutsläpp till totalt 88 miljoner ton koldioxidekvivalenter, vilket motsvarar ett genomsnitt på 8 ton per person per år[65].

Tabell 13: Genomsnittliga koldioxidutsläpp per person både som territoriella och konsumtionsbaserade i Sverige och Stockholm för år 2021, enligt Stockholms stads Miljöbarometer och Naturvårdsverket[63][64].

Kategori	Sveriges genomsnitt	Stockholms genomsnitt
Territoriella [tonCO ₂ e]	4,3[65]	1,6
Konsumtion [tonCO ₂ e]	8,0[65]	-

I tabell 13 blir det tydligt att det råder stora skillnader mellan Sveriges nationella genomsnitt av utsläpp per invånare och Stockholms stads genomsnitt per invånare. Det är också en markant skillnad mellan de territoriella och konsumtionsbaserade utsläppen för det nationella genomsnittet av utsläpp per person. Eftersom Stockholms stad endast beräknar utsläpp från scope 1 och scope 2, finns inget värde för de konsumtionsbaserade utsläppen som redovisas under scope 3[47].

4.2 Potentiella kolsänkor

I detta avsnitt väljs relevanta och potentiella kolsänkor ut baserat på deras tekniska mognadsgrad samt om implementering av kolsänkorna är möjlig inom Stockholms stads geografiska område. I tabell 14 presenteras olika metoder och tekniker som utvärderas utifrån dess tekniska mognadsgrad och om implementering skulle vara möjlig i Stockholm.

Tabellen 14 är uppdelad i flera kategorier baserat på metodernas egenskaper: skogs- och växtbaserade metoder, bygg- och infrastrukturmetoder, bio- och geotekniska metoder samt jord- och jordbruksmetoder.

Skogs- och växtbaserade metoder inkluderar bland annat skogsplantering och en hög teknisk mognadsgrad och är en väletablerad metod för kolinlagring. Dock är implementeringen i Stockholm begränsad på grund av begränsade ytor och skyddade områden[48]. Produktionsskog och energiskog har också hög teknisk mognadsgrad men är svåra att implementera i Stockholm på grund av utrymmesbegränsningar[48]. Stadsträd, buskar och växtbäddar har en hög teknisk mognadsgrad och kan implementeras i Stockholm[23].

Industriellt byggda flerbostadshus i trä kan skapa kolsänkor som potentiellt neutraliserar hela klimatpåverkan från byggprocessen och materialanvändningen[23]. Träbyggnader har hög teknisk mognadsgrad och kan implementeras i Stockholm, eftersom tekniken är välutvecklad och redan används i många projekt. Implementeringen är möjlig eftersom Stockholm stad har många planerade byggprojekt där denna metod kan användas.

Tabell 14: Utvärdering av olika kolsänkors tekniska mognadsgrad samt deras implementeringspotential i Stockholm Stads geografiska område.

Kolsänkmetod	Teknisk mognadsgrad	Implementering i Stockholm möjlig
Skogs- och växtbaserade metoder		
Skogsplantering	Hög	Ja
Produktionsskog	Hög	Nej
Energiskog	Hög	Nej
Stadsträd	Hög	Ja
Buskar	Hög	Ja
Växtbäddar	Hög	Ja
Bygg- och infrastrukturmetoder		
Träbyggnader	Hög	Ja
Karbonatisering av betong	Låg	Ja
Karbonatisering av aska	Låg	Nej
Gröna tak (sedumtyp/prärietyp, med/utan biokol)	Hög	Ja
Bio- och geotekniska metoder		
BECCS	Hög	Ja
Biokol	Hög	Ja
Jord- och jordbruksmetoder		
Jordförbättringsprogram	Hög	Nej
Växtföljd och jordbearbetning	Hög	Nej

Karbonatisering av betong är en kemisk process där betong reagerar med koldioxid för att permanent binda kol[66]. Även om tekniken har potential att bli lovande i framtiden, är den inte helt utvecklad vilket gör implementeringen svår för närvarande. Detsamma gäller för karbonatisering av aska[67].

Gröna tak har hög teknisk mognadsgrad och kan implementeras i Stockholm. Gröna tak bidrar till kolbindning genom växternas biomassa både ovan och under jord. En del av det bundna kolet släpps dock ut när växterna förmultnar[23]. Taken bedöms ha en hög teknisk mognadsgrad och implementering bedöms vara möjlig i samband med nybyggnation. Det finns redan ett par gröna tak i Stockholm stad[68]. Det finns även olika typer av gröna tak, där sedumtak är enklare och kräver mindre underhåll, medan prärieväxtvegetationstak erbjuder en rikare växtlighet men kräver mer skötsel och ett djupare substrat[68].

BECCS (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage) har hög teknisk mognadsgrad och kan implementeras i Stockholm. Denna teknik har potential att binda stora mängder koldioxid [30]. Biokol har hög teknisk mognadsgrad och kan implementering är möjlig i Stockholm [23].

Jord- och jordbruksmetoder inkluderar jordförbättringsprogram och växtföljd och jordbearbetning, båda metoderna har hög teknisk mognadsgrad men är svåra att implementera i Stockholm på grund av brist på jordbruksmark[23].

4.3 Potentialberäkning

I detta avsnitt redovisas beräkningar av de kolsänkor som bedöms ha en hög teknisk mognadsgrad samt att implementering är möjlig i Stockholm stad. Utöver BECCS (bioenergi med

koldioxidavskiljning och lagring) som Stockholm Exergi planerar att utveckla vid sina verksamheter, identifieras ytterligare potentiella kolsänkor kopplade till nybyggnation av bostadsområdet. Dessa inkluderar bruksgräs, växtbäddar, buskar, stadsträd, gröna tak samt nybyggnation av flerbostadshus med trästomme.

Tabell 15: Åtgärder och deras totala upptag av koldioxid över den angivna tidsperioden

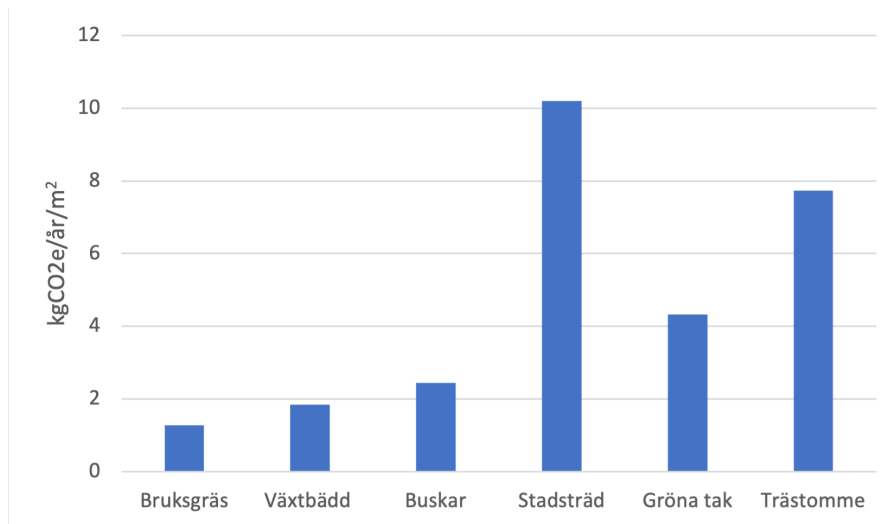
ÅTGÄRD	Tid (år)	Potential (ton CO ₂ e)
Bruksgräs	25	117
Bruksgräs + biokol	100	71
Växtbädd	30	91
Växtbädd + biokol	30	102
Buskar	30	27
Buskar + biokol	30	29
Stadsträd	50	59
Stadsträd + biokol	50	92
Gröna tak - sedum	5	109
Gröna tak - sedum + biokol	5	231
Gröna tak - prärie	5	572
Flerbostadshus trästomme	100	542

I tabell 15 framgår det att två åtgärder visar särskilt hög potential som kolsänkor, nybyggnation av flerbostadshus med trästomme samt gröna tak av prärie typ. Tabell 15 visar också att det är stor skillnad i potential mellan olika typer av gröna tak. Gröna tak av prärie typ har en betydligt högre potential jämfört med sedumtak, särskilt när biokol tillsätts. Skillnaden mellan dessa tak är att sedum taken har ett tunnare jordlager och lättskött växtlighet[52]. Gröna tak som har prärietyper har en mer intensiv växtlighet och tjockare jordlager. Växtligheten kan liknas med parkmiljöer och kräver mer skötsel i form av vattning och skötsel. Intensiva gröna tak ställer även högre krav på husets hållfasthet och tätskikt[52].

Det framgår även av Tabell 15 att tillsätta biokol i samband med implementering av kolsänkor ökar kolinlagringen. Potentialen för att tillsätta biokol visar endast den ökade kolinlagringen i marken och tar inte hänsyn till biokolen ur ett livscykelperspektiv.

Utöver total potential för inlagring av koldioxid visar Tabell 15 de olika tidsperioderna för hur länge varje metod förväntas lagra kol årligen. Växande biomassa har en årlig inlagring av kol under tidsperioden som anges i tabellen. Den kortaste tidsperioden har gröna tak, med en period på 5 år. Gröna tak erbjuder därför en kortvarig årlig kolinlagring jämfört med andra åtgärder. Den sista åtgärden skiljer sig från de övriga, det är nybyggnation av flerbostadshus med trästomme som inte har någon levande växande biomassa. Detta gör att kolinlagringen är konstant över hela husets livslängd och det sker således ingen årlig ökning av kolsänkan, tidsperioden återspeglar åtgärdens livslängd. Det är även denna åtgärd som har den längsta tidsperioden och förväntas lagra kol i 100 år eller under hela husets livslängd.

Hur stort område som är tillgängligt för implementeringen får betydelse för vilken potential kolsänkan har. För att få ett jämförbart resultat undersöks även kolsänkorna utifrån mängden kolinlagring per år och kvadratmeter.



Figur 4: Kolinlagringspotential per år och kvadratmeter denna figur är oberoende av tidsperspektiv och området som är tillgängligt för implementering.

Åtgärdernas potential som kolsänka representeras av stapeldiagrammet i figur 4 i kilo koldioxidkvivalenter per år och kvadratmeter, där det blir tydligt att två åtgärder har betydligt högre potential än övriga. De två åtgärderna med högst potential är ökad plantering av stadsträd samt nybyggnation av flerbostadshus med trästomme. Vidare ses att gröna tak av prärietyp har lägre potential i jämförelse med att bygga flerbostadshus av trä och ökad plantering av stadsträd i detta sammanhang men högre potential än de övriga åtgärderna.

4.4 Fallstudie

I denna fallstudie används bostadsområdet Norra 2 som är beläget i Norra Djurgårdstaden i Stockholm stad. Utifrån resultatet från potentialberäkningarna samt förutsättningarna i bostadsområdet Norra 2 väljs tre åtgärder ut för vidare analys. De som väljs ut är de tre kolsänkorna som visade högst potential i figur 4, alltså flerbostadshus som byggs med trästomme, ökad plantering av stadsträd och gröna tak. De tre olika åtgärderna presenteras nedan och kan kombineras för att maximera kolinlagringen.

- Åtgärd 1: Ökad plantering av stadsträd med biokol längs alla gator i bostadsområdet.
- Åtgärd 2: Gröna tak på all tillgänglig takarea i bostadsområdet.
- Åtgärd 3: Flerbostadshus som byggs med trästomme istället för betongstomme.

För att maximera mängden kolinlagring kan alla tre åtgärder kunna kombineras eftersom de inte konkurrerar om samma ytor. Den totala potentialen om de tre utvalda kolsänkorna maximeras och kombineras i bostadsområdet norra 2 visas i följande tabell 16 och figur 4.

Tabell 16: Den ackumulerade kolinlagringspotentialen för alla tre åtgärder summerade för att få en total effekt för fallstudien av Norra 2.

Åtgärdsområde	2030 (ton CO2e)	2040 (ton CO2e)	2125 (ton CO2e)
Stadsträd + biokol	580	605	690
Gröna tak	480	480	480
Nybyggnation av flerbostadshus	1266	1266	1266
Totalt [ton CO2e]	2326	2351	2436

Tabell 16 visar den ackumulerade kolinlagringen i ton koldioxidekvivalenter för vardera kolsänka samt den totala potentialen för åren 2030, 2040 och 2125. Den totala ackumulerade kolinlagringen för varje tidsperiod är markerad i fetstil för att betona den sammanlagda effekten. Tabellen 16 inkluderar alla tre åtgärder för kolinlagring samt den totala effekten av alla tre åtgärder sammanlagt, vilket belyser den ackumulerade potentialen om alla tre åtgärder kombineras.

4.4.1 Åtgärd 1: Stadsträd med biokol

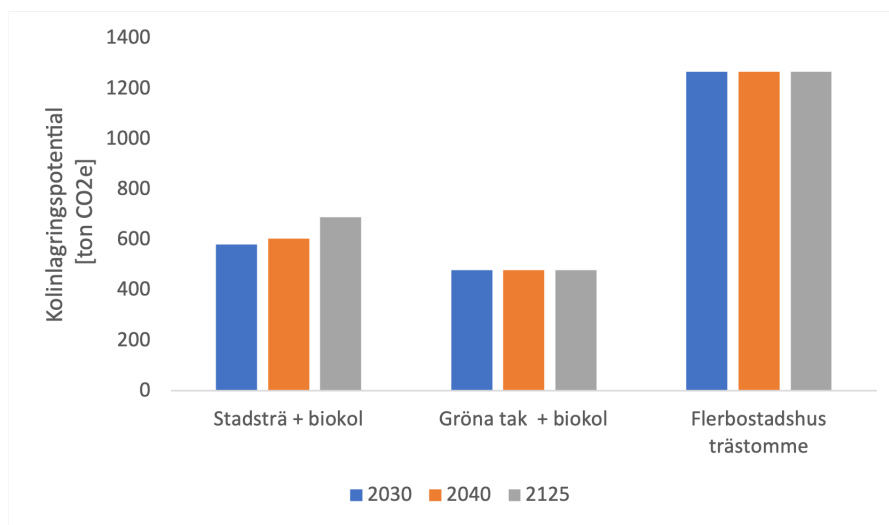
Åtgärd 1 beskriver en metod där antalet stadsträd längs bostadsområdets vägar har maximerats för att skapa alléer. Om antalet stadsträd maximeras finns potential att plantera 294 stadsträd, där trädgroparna förses med 500 kg biokol per träd. Stadsträdens tillväxt resulterar i att den totala kolinlagringspotentialen beräknas vara uppnådd efter 50 år, varefter trädens kolinlagring befinner sig i balans. Totalt ger denna åtgärd upphov till en kolinlagring på 690 ton koldioxidekvivalenter under en period på 50 år. Efter år 2075 sker ingen ytterligare ökning i kolinlagring. Ökningen mellan 2040 och 2125 förklaras av den fortsatta ökningen fram till år 2075.

4.4.2 Åtgärd 2: Gröna tak

Åtgärd 2 beskriver den ackumulerade kolinlagringspotentialen om alla bostäder i bostadsområdet förses med gröna tak. Norra 2 har en total takarea på cirka 15 600 kvadratmeter. Växtligheten på taken är av prärietyper för att maximera kolinlagringen. Implementeringen av gröna tak resulterar i en total kolinlagring på 480 ton koldioxidekvivalenter, vilket uppnås efter 5 år. Därefter är kolinlagringen konstant, där tillväxten av biomassa sker i samma takt som nedbrytningen.

4.4.3 Åtgärd 3: Flerbostadshus med trästomme

Åtgärd 3 undersöker potentialen för kolinlagring om alla bostäder i bostadsområdet byggs med trästomme istället för betongstomme. Detta innebär att byggnaden förses med 10 kubikmeter trä per 70 kvadratmeter bostadsyta. Eftersom mängden trä inte ökar om inte fler bostäder byggs, är kolinlagringspotentialen densamma över alla tidsperioder. Detta resulterar i en total och konstant kolinlagring på 1266 ton koldioxidekvivalenter under en period på 100 år, eller under byggnadens livslängd.



Figur 5: En jämförelse av de olika åtgärdernas kolinlagringspotential över tidsperioderna 2030, 2040 och 2125.

Figur 5 visar en jämförelse av samtliga åtgärder, nybyggnation av flerbostadshus med trästomme är den enskilda åtgärden som visar högst ackumulerade potential, följt av stadsträd. Lägst ackumulerade potential uppvisar gröna tak, som beräknas uppnå sitt max år 2030, efter detta sker ingen ytterligare ökning. Stadsträden har en längre tidsperiod vilket gör att deras potential ökar mellan tidsperioderna. Mängden trä ökas inte om inte fler bostäder byggs därför är potentialen densamma över alla tidsperioder för nybyggnation av flerbostadshus med trästomme.

Om fallstudien skalas upp och appliceras på alla bostäder som planeras byggas fram till 2035, fås en total ackumulerad potential för hela det planerade nybyggda bostadsbeståndet i Stockholm stad. Med antagandet att alla bostadsområden byggs med samma förutsättningar som Norra 2 och investerar i samma kolsänkor, skulle utfallet kunna representeras av en uppskalad version av denna fallstudie. Resultatet och potentialen för Norra 2 antas representera standarden för de nybyggnationer som sker fram till 2035 presenteras i tabell 17 nedan.

Tabell 17: Ackumulerad potential vid uppskalning av fallstudien av Norra 2 för att representera hela bostadsbeståndet som planeras byggas fram till 2035 i Stockholm stad över tidsperioderna år 2030, 2040 och 2125.

Åtgärd	2030 (5 år)	2040 (15 år)	2125 (100 år)
Stadsträd	34	68	68
Gröna tak	28	56	56
Nybyggnation med trästomme	74	221	221
Totalt [kton CO₂e]	136	345	345

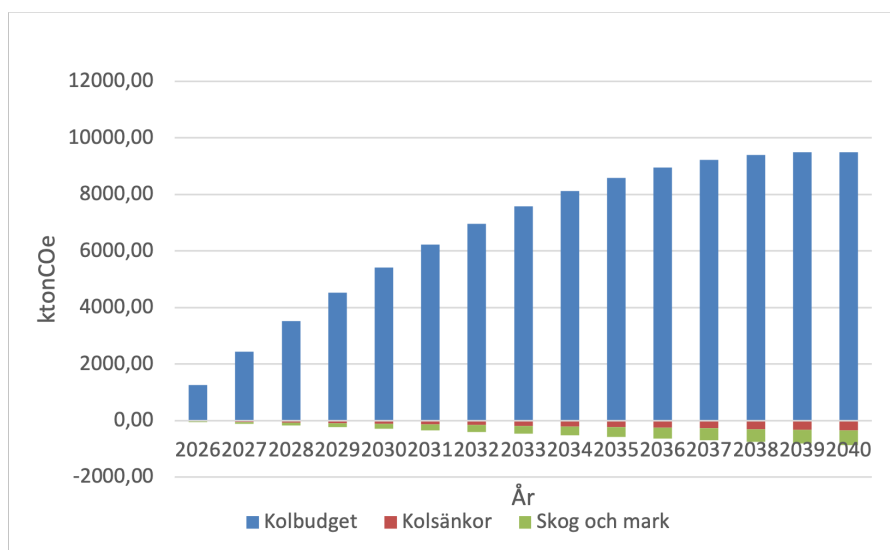
Tabell 17 visar den ackumulerade kolinlagringen för uppskalningen av åtgärder under åren 2030, 2040 och 2125. År 2030 beräknas en ackumulerad total potential till 136 kiloton koldioxidekvivalenter. År 2040 beräknas den total ackumulerade potentialen ha ökat till 345 kiloton koldioxidekvivalenter, vilket motsvarar en ökning på 218 kiloton koldioxidekvivalenter från 2030. År 2125 förblir totalen densamma som 2040, då inga nya bostäder antas byggas efter 2035.

Jämfört med Stockholm Exergis Bio-CCS-projekt som utlovas 800 kiloton koldioxidekvivalenter årligen[30], visar de identifierade kolsänkorna i denna studie på en mindre potential. De olika åtgärderna, om de implementeras maximalt, kan tillsammans minska utsläppen med totalt cirka 345 kiloton koldioxidekvivalenter fram till 2040. Utslaget över 15 år, vilket motsvarar tidsperioden mellan 2025 och 2040, ger det cirka 23 kiloton koldioxidekvivalenter per år. Denna mängd motsvarar dock endast en del av de totala nödvändiga minskningarna för att nå klimatmålen.

Det uppsatta miljömålen ska nås genom att uppfylla Stockholm stads klimatbudget och utfall som presenterades i bakgrunden 2.8.1. I figur 6 visas en jämförelse mellan de totala utsläppen som förväntas ske fram till 2040 i jämförelse med kolsänkornas totala potential till 2040. I figuren har även upptaget från skog och mark i Stockholm stad inkluderats enligt tabell 9.

Figur 6 sätter kolsänkornas potential i relation till de förväntade utsläppen fram till 2040. Figuren visar den totala ackumulerade potentialen för kolinlagring från kolsänkor och upptag från skog och mark i Stockholm stad, i relation till de förväntade totala ackumulerade utsläppen fram till 2040, uttryckt i kiloton koldioxidekvivalenter. Kolsänkorna beskriver samma tre åtgärder som visades i tabell 17. Figur 6 inkluderar även upptaget för skog och mark från tabell 9.

Kolsänkornas potential motsvarar en minskning med cirka 4 % av de totala utsläppen. Kolsänkan i skog och mark motsvarar cirka 6 % av den utsläppsminskning som krävs till 2040. Det framgår i figur 6 att kolsänkorna kan bidra till att minska utsläppen med cirka 10 %.



Figur 6: En jämförelse av de tre undersökta kolsänkornas totala ackumulerade potential och den ackumulerade utsläppen fram till 2040 enligt Stockholm stads kolbudget[47].

4.4.4 Ekonomisk aspekt

I denna del av fallstudien undersöks en del av den ekonomiska aspekten kopplat till potentialen för kolinlagring. Kolsänkor kan vara en kostnadseffektiv klimatåtgärd och ett komplement till andra tekniska lösningar för att minska utsläppen[69]. Men för att uppmuntra dessa investeringar krävs en analys av priset för åtgärderna.

Tabell 18: Kostnad per koldioxidekvivalent (kr/ton CO₂ekv) för olika åtgärdsområden

Åtgärdsområde	Kostnad per (kr/ton CO ₂ ekv)
Ökad stadsträdplantering + biokol	19[23]
Gröna tak	102[23]
Flerbostadshus trästomme	-

I tabell 18 visar att priset per koldioxidekvivalent är betydligt högre för gröna tak jämfört med ökad plantering av stadsträd. För flerbostadshus med trästomme istället för betongstomme redovisas inget pris per koldioxidekvivalent. Vad som kan konstateras angående kostnadsaspekten är att investeringskostnaden initialt är lägre för betongstomme än för trästomme. Om man däremot beaktar klimatavtrycket i koldioxidekvivalenter har betongstomme högre utsläpp[70]. Detta resulterar i att betong är billigare initialt, men om framtida klimatkostnader för utsläpp och incitament för inlagring av koldioxidekvivalenter införs, kan trästomme bli mer kostnadseffektiv. Detta beror på träets förmåga att lagra koldioxid under byggnadens livslängd. Förutsatt att dessa klimatkostnader och incitament inkluderas i kalkylen, kan trästomme utgöra ett mer ekonomiskt hållbart alternativ över tid [70].

4.5 Fördelar och nackdelar

I denna del av fallstudien presenteras övriga aspekter bortsett från ekonomi och potential som kolsänka. De övriga aspekterna presenteras i form av fördelar och nackdelar med aspekten som behövs övervägas vid implementering av åtgärden.

Tabell 19: Fördelar och Nackdelar med olika åtgärder

Åtgärd	Fördelar och Nackdelar
Stadsträd + biokol	Fördelar: • Förbättrar luftkvaliteten[23]. • Ökar trivsel och sänker temperaturen[23]. • Minskar dagvattenflöden[23]. Nackdelar: • Kostnader[23]. • Begränsat utrymme[23].
Gröna tak	Fördelar: • Ökar biodiversitet[23]. • Minskar avrinning och föroreningar[51]. • Sänker temperaturer[51]. • Bättre luftkvalité[51]. Nackdelar: • Höga installationskostnader[23]. • Underhållskostnader[71].
Nybyggnation med trästomme	Fördelar: • Förnybar resurs[68]. • Långvarig kolsänka[23] Nackdelar: • Ökad avverkning, minskar kolsänkor[71]. • Brandrisk[72].

Tabell 19 visar några av fördelarna och nackdelarna som bör övervägas vid implementering av dessa åtgärder. Stadsträd kan sänka temperaturen under sommarhalvåret genom att ge skugga och skapa boplatser samt föda åt flertalet arter[23]. Trädens rotsystem och växtbäddar absorberar vatten och minskar därmed dagvattenflöden[23]. En potentiell nackdel är att plantering och underhåll kan medföra höga kostnader, dessutom finns risk att rötter tränger upp i vägbeläggningen om trädgropens utformning inte är optimal[23]. Det finns således en risk att ökad plantering av stadsträd längs bostadsområdets vägar kan leda till att trädens rotsystem skadar vägbeläggningarna.

Gröna tak kan öka biodiversiteten genom att fungera som pollen- och nektarkällor för insekter. Taken kan även hjälpa till att minska avrinningen från taken och därigenom minska föroreningar i dagvattnet[68]. Förutom att minska mängden förorenat dagvatten bidrar vegetationsklädda tak till en förbättrad luftkvalitet[68]. Utöver detta kan gröna tak isolera mot värme, kyla och minska buller[68]. Installation av gröna tak kan dock innebära höga kostnader. Den typ av gröna tak som används i denna fallstudie har tjockare jordlager och mer växtlighet, vilket kräver mer skötsel än tak med tunnare jordlager som sedumtaken.

Trästommar binder kol i byggnaden och trä är en förnybar resurs som minskar miljöpåverkan jämfört med andra byggmaterial, om det skördas hållbart[71]. Det är viktigt att beakta tidsperspektivet för att binda in kolet under lång tid. Om trämaterialiet används som bränsle efter byggnadens livstid återgår kolet till atmosfären. För att öka kolsänkans livslängd krävs där-

för effektiv återanvändning av trämaterial[23]. Byggnader med trästomme har dock en högre brandrisk, vilket kräver noggranna brandskyddsåtgärder[72]. Ökad efterfrågan på trä kan även leda till högre avverkningsgrad än tillväxt, vilket minskar kolsänkan i skogen[71][56].

4.5.1 Förändrad markanvändning

Det är också viktigt att överväga vilken typ av mark som tas i anspråk vid byggprojekt och hur förändrad markanvändning påverkar kolsänkor över tid. Markanvändningen spelar en avgörande roll för kolsänkornas nettoeffekt. När en mark som redan fungerar som kolsänka tas i bruk för byggnation, påverkas nettoeffekten av kolinlagringen negativt. Även om nya kolsänkor implementeras, frigörs en betydande mängd kol vid omvandlingen av marken. För att belysa detta antas att bostadsområdet Norra 2 byggs på mark som fungerar som en kolsänka, såsom en skog, annan tätbevuxen vegetation eller torvrik mark, och besitter ett kollager.

Tabell 20: Förlorad kolsänka och kolinlagring vid förändrad markanvändning för Norra 2. Data för arealen har mätts upp med hjälp av Lantmäteriets kartverktyg, medan förlusten av den årliga kolsänkan och kollagret har uppskattats baserat på uppgifter från artikeln "Kolförråd och kolsänka i skog och mark inom Stockholms stad"[48].

Parameter	Värde	Enhet
Areal	0,057	km ²
Förlust av kolsänka årligen	25	ton CO ₂ e
Förlust av lager	1 150	ton C

Tabell 20 illustrerar hur mycket av stadens kolsänka och kollager i marken som går förlorad vid förändrad markanvändning för byggnation av bostadsområde, såsom Norra 2. Detta visar på ett extremfall om ett helt bostadsområde anläggs på oexploaterad mark som fungerar som en kolsänka och har ett stort kollager i marken.

Tabell 20 belyser vikten av att undersöka vilken mark som tas i anspråk vid nya byggprojekt, eftersom förändrad markanvändning kan innebära en förlorad kolsänka samt att kollagret i marken frigörs. Detta visar också att den totala potentialen för implementering av kolsänkorna i verkligheten inte alltid blir lika stor som beräknat, eftersom nettoökningen blir mindre om området läggs på oexploaterad mark. Om bostadsområdet istället läggs på exploaterad mark, blir nettoökningen lik beräkningarna av kolsänkorna.

4.6 Biokolproduktion och BECCS

I detta avsnitt undersöks hur produktion av biokol och implementering av BECCS i samband med Stockholms stads fjärrvärmeproduktion påverkar energileveranserna och utsläppen av växthusgaser. Vid implementering av biokolproduktion eller BECCS i kraftvärmeverk uppstår förluster i systemets verkningsgrad, vilket leder till energiförluster[54][55].

Tabell 21: Förlorad energiproduktion i GWh vid installation av biokolproduktion eller BECCS med och utan värmeåtervinning.

Scenario	Förlorad termisk energi	Förlorad elektrisk energi
Biokol	651	270
BECCS	993	200
BECCS med värmeåtervinning	34	382

Tabell 21 visar att biokolproduktion ger en minskad produktion av termisk energi på 651 GWh och elektrisk energi på ca 270 GWh. För ett kraftvärmeverk med en BECCS visar Tabell 21 att värmeproduktionen minskar med ca 993 GWh och elproduktionen minskar med ca 200 GWh. Om BECCS-systemet förses med värmeåtervinning minskar värmeförlusterna till 34 GWh, men den förlorade mängden elektrisk energi är 382 GWh och högre än i fallet utan värmeåtervinning.

4.6.1 Klimatnytta

För att upprätthålla energileveranserna måste energiförlusterna kompenseras. Detta kan innebära att mer energi måste produceras någon annanstans, vilket kan leda till ökade utsläpp av växthusgaser beroende på vilken energikälla som används. I detta avsnitt undersöks mängden utsläpp av växthusgaser som kan uppstå till följd av den minskade energiproduktionen samt klimatnyttan med varje scenario.

Tabell 22: Utsläpp i kiloton koldioxidekvivalenter för de tre olika scenariernas förlorade mängd energi, BECCS med värmeåtervinning, BECCS och produktion av biokol. För varje scenario presenteras utsläppen som genereras vid användningen av naturgas eller skogsflis för att producera den förlorade mängden termisk energi. I samtliga scenarier är mängden utsläpp genererad från den förlorade mängden elektrisk energi även inkluderad, baserat på svensk residualmix.

Scenario	Bränsle	kton CO ₂ eq
Biokol	Naturgas	302
	Skogsflis	155
BECCS	Naturgas	352
	Skogsflis	127
BECCS med värmeåtervinning	Naturgas	207
	Skogsflis	200

Tabell 22 visar utsläppen i kiloton koldioxidekvivalenter för olika scenarier med BECCS och biokolproduktion med två typer av bränsle, naturgas eller skogsflis. I dessa scenarier är även utsläppen från produktion av el med svensk residualmix inräknade. Tabell 22 visar även att det är skillnad i mängden utsläpp beroende på vilket typ av bränsle som används för att kompensera för energiförlusterna. Produktion av värme med skogsflis genererar minst utsläpp jämfört med naturgas. BECCS med värmeåtervinning resulterar i lägre utsläpp när naturgas används jämfört med de andra scenarierna, på grund av dess låga värmeenergiförluster. Att scenariot med skogsflis uppvisar nästan lika stora utsläpp beror på att majoriteten av utsläppen kommer från den förlorade elektriska energin. BECCS utan värmeåtervinning och produktion av biokol uppvisar liknande utsläppsnivåer. Dock har BECCS utan värmeåtervinning högre utsläpp vid användning av naturgas jämfört med biokol, medan biokolproduktion har högre utsläpp vid användning av skogsflis.

Tabell 23: Klimatnyttan i kiloton koldioxidekvivalenter för de tre olika scenarierna BECCS med värmeåtervinning, BECCS utan värmeåtervinning och produktion av biokol beräknats genom att beakta kolinlagringen minus de utsläpp som anges i tabell 22. Detta innebär att den positiva effekten av att binda koldioxid i dessa processer har justerats med de utsläpp som genereras i samband med tillverkning av el och värme med residualmix och naturgas.

Scenario	Bränsle	Klimatnytta (kton CO ₂ eq)
Biokol	Naturgas	-171
	Skogsflis	-24
BECCS	Naturgas	448
	Skogsflis	673
BECCS med värmeåtervinning	Naturgas	592
	Skogsflis	599

Tabell 23 visar klimatnyttan i kiloton koldioxidekvivalenter för de tre olika scenarierna BECCS med värmeåtervinning, BECCS utan värmeåtervinning och produktion av biokol. Biokol har lägst klimatnytta på grund av de höga utsläppen som genereras vid produktion av el och värme när residualmix och naturgas används, i förhållande till dess kapacitet för kolinlagring. BECCS uppvisar hög klimatnytta både med och utan värmeåtervinning, vilket beror på dess höga kapacitet för kolinlagring på 800 kiloton koldioxidekvivalenter.

4.6.2 Biokolproduktion i Stockholm stad

Enligt rapporten "Fjärrvärme med minusutsläpp 2019" producerades totalt 43,4 ton koldioxidekvivalenter i form av biokol under 2019[60]. Detta ger cirka 17 ton biokol om varje ton biokol motsvarar 2,5 ton koldioxidekvivalenter [59].

I fallstudien av Norra 2 användes biokol i samband med plantering av stadsträd. För att analysera hur mycket biokol som kan behövas för att möta det framtida behovet av biokol används mängden träd i den uppskalade versionen av fallstudien.

Tabell 24: Framtida behov av biokol i Stockholm stad i den uppskalade versionen av fallstudien av Norra 2.

År	Antal träd	ton biokol
2030	17 150	8 575
2040	51 450	25 725
2125	51 450	25 725

Om 17 ton biokol produceras årligen ger detta omkring 255 ton biokol till år 2040 med startår 2025. Tabell 24 visar hur mycket biokol som behövs för att förse alla stadsträd i den uppskalade fallstudien av Norra 2. Enligt Tabell 24 krävs totalt 25 725 ton biokol. Detta resulterar i ett importbehov på cirka 25 470 ton biokol. Potentialen för att producera biokol kan vara så stor som 52 500-92 000 ton biokol årligen[54]. Detta visar att det finns en potential för Stockholm att bli självförsörjande med biokol, baserat på den högre produktionskapaciteten.

För biokolsproduktion som sker med park- och trädgårdsavfall som i nuläget inte används till energiproduktion sker ingen förlust av energi på grund av den lägre verkningsgraden som i tidigare exempel. Istället fås termisk och elektrisk energi som en bonus vid tillverkningen av biokol från trädgårds- och parkavfall, vilket kan räknas som en ytterligare klimatnytta från systemet[60]. Hur stor klimatnyttan blir beror på biokolsutbytet. Högre biokolsutbyte ger minskad elektrisk och termisk verkningsgrad och således mindre energi som kan räknas som minskade utsläpp.

Tabell 25: Minskade utsläpp från biokolproduktion i kiloton koldioxidekvivalenter, när park- och trädgårdsavfall som inte används till energiproduktion används i produktionen.

Biokol	(kton CO ₂ eq)
Naturgas	-302
Skogsflis	-155

Tabell 25 visar den mängd utsläpp som kan undvikas genom att producera biokol från park- och trädgårdsavfall som inte är avsett för energiproduktion. Biokolproduktion ger energi och värme som inte behöver produceras någon annanstans, vilket kan leda till en betydande minskning av utsläpp i kiloton koldioxidekvivalenter. De undvikna utsläppen varierar beroende på vilket bränsle som ersätts i energiproduktionen. De största minskningarna av utsläpp uppstår när biokolproduktionen ersätter naturgas, medan något mindre minskningar uppstår när den ersätter värme producerad från skogsflis. Minskade utsläpp anges som negativa värden för att representera den mängd utsläpp som kan undvikas. Klimatnyttan blir ännu större när man också tar hänsyn till kolinlagringen som den producerade biokolen erbjuder. Den producerade mängden av 52 500 ton biokol i detta scenario beräknas ha en kolinlagringspotential på 131 kiloton koldioxidekvivalenter. Detta innebär att biokolet kan binda 131 kiloton koldioxidekvivalenter. Totalt leder detta, tillsammans med minskade utsläpp, till en total klimatnytta på 286-433 kiloton koldioxidekvivalenter.

5 Diskussion

5.1 Hur ser resursflödet för kol ut i Stockholm stads geografiska område uppdelat på aktörer, aktiviteter och naturmiljöer?

Vid studierna av stadens kolflöden kartlades även utsläppen från de olika sektorerna samt totala utsläppen per person. Det konstaterades i tabell 13 att utsläppen per capita är betydligt lägre än genomsnittet i Sverige för det territoriella utsläpp. Detta kan förklaras av bristen på tung industri och jordbruk inom Stockholms stad. Industri- och jordbrukssektorerna står för 34 % respektive 14 % av Sveriges totala utsläpp. Denna frånvaro av stora utsläppskällor bidrar till att Stockholms territorielle utsläpp är drygt hälften så stora som Sveriges genomsnitt.

Vidare ses att 1,6 ton koldioxidekvivalenter per person ligger i linje med stadens mål att uppnå max 1,5 ton koldioxidekvivalenter per person 2023[24]. Men dessa siffror tar inte hänsyn till det konsumtionsbaserade utsläppen, skulle dessa inkluderas skulle utfallet istället bli närmare 8 ton koldioxidekvivalenter per person.

5.1.1 Konsumtionsbaserade utsläppen

Att enbart fokusera på territoriella utsläpp, kan leda till att utsläpp förskjuts utanför det geografiska området[31]. Det kan hända när varor importeras från utlandet där produktionen och transport leder till betydande utsläpp, men dessa räknas inte till i Sveriges territoriella utsläpp[31]. Om man inte inkluderar konsumtionsbaserade utsläpp utan enbart ser på de territoriella utsläppen får man inte en komplett bild av utsläppen.

Om de konsumtionsbaserade utsläppen för Stockholms stads antas vara lika stora som för hela Sverige, blir de totala utsläppen cirka 8 ton koldioxidekvivalenter per person och år. Detta kan ge en betydande skillnad för stadens klimatbudget.

Antagandet att det konsumtionsbaserade utsläppen är lika stora för hela Sverige som för Stockholm stad kan ge upphov till viss dubbelräkning eftersom vissa av Stockholms stads klimatredovisning räknar med indirekta utsläpp vilket konstaterades i litteraturstudien under kapitel 2.6.2[42]. Stockholm stad inkluderar indirekta utsläpp, som elförbrukning och fjärrvärme, men exkluderar andra indirekta utsläpp utanför stadens geografiska område. En kombination av konsumtions- och territoriella metoder används för olika sektorer, där elförbrukning räknas på konsumtionsbasis medan andra sektorer räknas territoriellt.

5.2 Vilka kolsänkor är mest relevanta för en stad generellt, och mer specifikt Stockholm stad?

I urbana miljöer kan ytan för att implementera åtgärder som ökad plantering av stadsträd och större grönytor vara begränsad. Detta talar för metoder som inte tar extra markyta i anspråk vid implementering. Åtgärder som att bygga hus i trä samt gröna tak kräver ingen extra mark. Samtidigt innebär gröna tak ofta höga installationskostnader och högre kostnad per inlagrad koldioxidekvivalent[23], vilket visar att det finns många aspekter att överväga vid implementering av kolsänkor. Både gröna tak, trädplantering och grönytor kräver underhåll och har underhållskostnader, till skillnad från flerbostadshus som byggs med trästomme.

Även åtgärder riktade mot grönytor, som att tillsätta biokol i växtbäddar, bruksgräs samt plantering av buskar, visade sig vara relevanta kolsänkor. Dessa har en hög teknisk mognadsgrad och implementering anses vara möjlig, dock visade sig potentialen inte vara lika hög som för de tidigare nämnda kolsänkorna. I tabell 4 visas att kolinlagringen är lägre per kvadratmeter för

dessa åtgärder, vilket gör att de inte är lika effektiva att implementera i områden där ytor är begränsade om man vill uppnå maximal kolinlagring. Vidare sker implementering av grönytor redan vid nybyggnation enligt grönytefaktorn. Dessa ytors kolinlagring kan maximeras genom att tillsätta biokol, men nettoeffekten av kolsänkan blir dock inte lika stor eftersom man anlägger en kolsänka på en yta där en grönyta redan är planerad. En gemensam nämnare som framgår av tabell 4 är att kolsänkans potential ökar avsevärt när biokol tillsätts i växtbäddar eller vid plantering av stadsträd.

Det är dock viktigt att notera att biokol är ett organiskt material som bryts ner långsamt[23]. Det innebär att biokol inte är en permanent lösning för kolinlagring, till skillnad från metoder som använder geologisk lagring. Under den tidsperiod som studien undersöker kommer inte all biokol hinna brytas ner. En viktig aspekt är att biokol bör tillverkas av restprodukter, såsom toppar och grenar, som annars snabbt skulle förmultna i skogen[23]. Användning av stamved kan leda till ökad avverkning av skog, vilket minskar skogens egen kolsänka. Dessutom krävs energi för att starta pyrolysisprocessen vid framställning av biokol. Även om energi frigörs under själva biokolproduktionen, är det viktigt att denna initiala energi kommer från fossilfria källor för att maximera biokolets effektivitet som kolsänka. Om denna process inte drivs med fossilfri energi, kan det minska biokolets effektivitet som kolsänka[25]. Användning av fossilfri energi för biokolproduktion kan öka konkurrensen om denna energi och indirekt leda till ökad användning av fossila bränslen. Detsamma gäller även BECCS som använder energi från biomassa och avfall. Eftersom processen är energikrävande och även om energin kommer från biomassa, kan det öka konkurrensen om fossilfri energi och leda till indirekta utsläpp i andra sektorer.

5.2.1 Tidsperspektivet

När det gäller tidsperspektivet är det viktigt att observera IPCC:s rapporter som belyser att miljöproblemen är akuta. För att mildra klimatförändringarna krävs åtgärder som har förmåga att minska koncentrationen av koldioxid i atmosfären. Även om permanenta kolsänkor är att föredra, är dessa åtgärder ofta komplicerade och energikrävande. Därför behövs både långsiktiga och kortsiktiga kolsänkor. Förhoppningsvis erbjuder framtiden nya tekniker och utsläppsminskningar som förbättrar metoder för kolinlagring samt utsläppsminskningar. Genom att binda kol både långsiktigt och kortsiktigt, kan återföringen av kol till atmosfären ske långsammare, vilket ger kolcykeln möjlighet att binda mängden kol till ny biomassa och återgå till balans.

5.3 Vilken potential har de mest relevanta kolsänkorna att minska Stockholms stads klimatpåverkan, och hur mycket skulle implementeringen kosta?

Resultaten visar att de analyserade åtgärderna har en betydande potential att binda kol inom de planerade byggprojekten i Stockholm. Speciellt nybyggnation av flerbostadshus i trä visar på en hög potential för kolinlagring. Genom att kombinera olika åtgärder som stadsträd med biokol och gröna tak kan staden uppnå betydande kolinlagringseffekter, vilket bidrar till att minska stadens totala klimatpåverkan och bidra till att uppnå stadens klimatbudget. Även åtgärder som påverkar grönytor visade på relativt hög potential, särskilt om biokol tillsätts. Eftersom dessa åtgärder inte konkurrerar med grönyteområden, finns det utrymme för att implementera dem på dessa ytor vilket skulle ge ytterligare kolinlagring.

Analysen av fallstudien visar en betydande potential om tre åtgärder kombineras. Detta representerar dock ett extremfall och antagandet om att skala upp Norra 2 plankarta för att representera hela nybyggnationsbeståndet är en förenkling och inte representativt för framtida utveckling av kolsänkor. Trots detta ger det en förståelse för kolsänkornas potential i relation

till andra åtgärder för utsläppsminskningar.

Vidare antas att inga nya bostäder byggs efter 2035, vilket inte är realistiskt. Byggnationer kommer sannolikt att fortsätta efter detta år, vilket innebär att potentialen för kolsänkor kopplade till nybyggnation också kommer att öka.

Sammanfattningsvis visade potentialberäkningarna i fallstudien att nybyggnation av flerbostadshus med trästomme, ökad plantering av stadsträd och installation av gröna tak är relevanta kolsänkor i en stad och har potential för kolinlagring.

Även om analysen av fallstudien representerar ett extremfall, ger den en inblick i kolsänkornas potential jämfört med andra utsläppsminskningar. Byggnationer kommer sannolikt att fortsätta efter 2035, vilket ökar potentialen för kolsänkor kopplade till nybyggnation. Därför är det viktigt att implementera och utöka dessa åtgärder för att maximera deras klimatfördelar. I samband med nybyggnationer sker även utsläpp, fler byggprojekt leder således till större mängd utsläpp av växthusgaser. Därför blir det extra viktigt att implementera kolsänkor i samband med nybyggnation för att minska klimatpåverkan från byggprocessen.

5.3.1 Ekonomiska aspekter

Implementeringen av kolsänkor leder ofta till ökade kostnader, vilket gör det osannolikt att alla nybyggnationer kommer att maximera alla ytor för kolsänkor som i fallstudien av Norra 2. Samtidigt som det är viktigt att maximera kolsänkorna för att mildra klimatförändringarna, är det också avgörande att satsa på utsläppsminskningar. Både kolsänkor och utsläppsminskningar krävs för att uppnå klimatmålen.

För att sätta kolsänkorna i ett samhällsplaneringsperspektiv har Stockholms stad en vision för bostadsbygge som bland annat inkluderar att bygga bostäder med överkomliga hyror[44]. Att maximera alla kolsänkor skulle leda till höga kostnader, vilket påverkar hyror och bostadspriser. Därför är det viktigt att överväga var resurserna läggs och att undersöka varje projekt för sig utifrån planbeskrivningar och översiktsplanen för att skapa en helhet och ett hållbart stadsbygge. Det innebär bland annat att man bör undvika att ta mark med högt kolinnehåll i bruk för att bygga bostäder för att maximera kolsänkornas effektivitet och kolinlagring per krona.

Den ekonomiska aspekten gör att bostadsområden som investerar i kolsänkor ofta blir dyrare att producera. Detta leder till risker för social ojämlikhet om vissa områden prioriteras för implementering av kolsänkor över andra. Eftersom pengar ofta är en större drivkraft för den privata sektorn än att minska utsläppen av koldioxid krävs politiska åtgärder och incitament för att stödja kolsänkor. En annan möjlighet för att öka implementering kolsänkor skulle vara att göra det dyrare att släppa ut koldioxid. Detta skulle skapa ett incitament att minska sitt klimatavtryck genom utsläppsminskningar samt kompletterande åtgärder som kolsänkor. Vidare skulle även koldioxid kunna kopplas till pengar genom att företag eller privatpersoner med lågt klimatavtryck för billigare lån.

Det finns idag ingen enhetlig prissättning för utsläpp och inlagring av koldioxidekvivalenter. Men med ökad global medvetenhet om klimatförändringar och implementeringen av Parisavtalet, finns det en möjlighet att prissättning på koldioxidutsläpp kan förändras i framtiden. Om kostnader för utsläpp och incitament för kolinlagring blir en del av den ekonomiska kalkylen, kan det leda till att byggnader med trästomme, som fungerar som kolsänkor, blir mer ekonomiskt fördelaktiga än betongkonstruktioner.

5.4 Finns det några andra fördelar eller nackdelar som bör beaktas vid övervägandet av dessa åtgärder

5.4.1 Förändrad Markanvändning

Tabell 20 visar att markanvändning spelar en avgörande roll för kolsänkornas nettoeffekt. Om en mark som redan fungerar som kolsänka tas i bruk, påverkar detta nettoeffekten av kolinlagringen. Även om kolsänkan fortfarande lagrar in kol, släpps det ut en betydande mängd kol vid omvandlingen av marken, vilket minskar den totala kolinlagringen. Detta påverkar också kostnadseffektiviteten och den faktiska miljönyttan.

Analysen av förändrad markanvändning visar på ett extremfall där ett helt bostadsområde beläggs på mark som fungerar som kolsänka. Men om man istället tar lite ny mark i anspråk varje år vid byggprojekt blir utfallet till slut stort. Vanligtvis byggs inte hela projektet på oexploaterad mark, men om många projekt tar lite mark som fungerar som en kolsänka i bruk leder det ändå till en stor förlorad kolsänka över tid.

Å andra sidan genom att ersätta befintlig mark med områden som fungerar som kolsänkor med nya mer effektiva kolsänkor, kan den förlorade kolsänkan kompenseras. Därmed får nettoeffekten av den förändrade markanvändningen inte lika stor negativ klimatpåverkan.

5.4.2 Kolbudget och kolsänkor

Stockholms stads klimatbudget innebär att halvera utsläppen till 2030 och nå netto nollutsläpp senast 2040. För att uppnå detta krävs både betydande utsläppsminskningar och kompletterande åtgärder som kolsänkor. Kolbudgeten visar att minskningen till 2030 motsvarar hela transportsektorns utsläpp år 2022[47]. Detta skulle kunna uppnås genom kolinlagring, som det planerade BECCS projektet från Stockholm Exergi avser att bidra med[30].

Jämfört med Stockholm Exergis BECCS-projekt, som kan lagra 800 kiloton koldioxidekvivalenter årligen, visar de identifierade kolsänkorna i denna studie på en mindre potential. Figur 6 belyser att kolsänkornas potential endast motsvarar cirka 10 % av de totala nödvändiga minskningarna för att nå klimatmålen.

Men eftersom Stockholm Exergis BECCS anläggning ännu inte har tagits i bruk i full skala, är det fortfarande viktigt att fortsätta satsa på implementering av kolsänkor i samband med byggnation av nya bostadsområden och bostäder. Målet är att ha netto nollutsläpp till 2040, vilket kräver ytterligare åtgärder. BECCS anses vara en energikrävande och dyr metod för kolinlagring som dessutom kräver geologisk lagring[55]. Detta innebär ett beroende av lagringslösningar som inte finns i Stockholm, vilket ytterligare motiverar behovet av alternativa kolsänkor inom stadsplaneringen.

5.5 Rekommendationer till Reflow och Stockholm stad

Reflow bör prioritera transportsektorn som uppvisar det största utsläppen samt att inkludera och spåra det konsumtionsbaserade utsläppen för att få en mer realistisk bild av det faktiska utsläppen som Stockholm stad ger upphov till. Genom att strukturera de konsumtionsbaserade utsläppen kan strategier formuleras av Stockholm stad för att minska dessa. Det bör dock tilläggas att Stockholm stad inte har någon rådighet att bestämma över hushållens konsumtion. Men genom att få en fullständig bild av alla utsläpp blir det lättare att genomföra ett proaktivt miljöarbete samt prioritera utsläppsminskningar där det gör störst effekt samt implementera kolsänkor för att kompensera för de återstående utsläppen. Om man inte har en fullständig bild av utsläppen finns risk att reduktion av utsläpp samt att implementering av kolsänkor

inte prioriteras tillräckligt för att faktiskt nå koldioxidneutralitet. Kolsänkor prioriteras bör i samband med nybyggnation av bostadsområden.

Stockholm stad bör fokusera på transportsektorn för att minska stadens utsläpp. De största utsläppen inom transportsektorn spårades till vägtrafik därför kan staden arbeta för att främja övergången till elfordon för både privata och offentliga transporter samt investera i och uppmuntra användning av kollektivtrafik, cykelvägar och gångvägar för att minska beroendet av personbilar.

Stockholm stad har begränsad rådighet över konsumtionsbaserade utsläpp som sker utanför stadens geografiska område. Detta innebär att staden inte direkt kan påverka utsläpp från produktion och transporter av varor och tjänster som konsumeras av stadens invånare men producerats någon annanstans. För att minska det konsumtionsbaserade utsläppen bör de uppmuntra medborgarna att göra hållbara val genom utbildning och information.

5.6 Påverkan på energisystemet

Kolinlagring och beslut angående införandet av kolsänkor kan påverka energisystemet på flera olika sätt.

BECCS använder bioenergi för att skapa negativa utsläpp genom att avskilja och lagra koldioxid som annars skulle ha återgått till atmosfären[30]. Detta kan ha en direkt påverkan på energisystemet eftersom det kräver biomassa som råmaterial och fossilfri energi. Hur effektiv metoden är beror på systemets verkningsgrad en kraftvärmeanläggning med BECCS utan värmeåtervinning uppvisar betydligt lägre verkningsgrad.

I scenariot med BECCS med värmeåtervinning identifierades betydligt lägre energiförluster och högre klimatnytta jämfört med andra scenarierna och betydligt högre potential än de undersökta metoderna i fallstudien. Enligt beräkningar har detta system potential att nästan kompensera för hela transportsektorns utsläpp i Stockholm stad för år 2022. Detta innebär att om BECCS med värmeåtervinning implementeras i stor skala, kan det spela en avgörande roll i stadens strategi för att nå sina klimatmål.

Att bygga hus i trä innebär inte bara en långsiktig kolinlagring i själva byggmaterialet, utan det påverkar även energisystemet genom att potentiellt minska behovet av energiintensiva byggmaterial som betong och stål[23]. Träbyggnader kan utnyttja samma biomassa som används för bioenergi, vilket skapar en konkurrens om resurserna. Beslut om att öka användningen av trä i byggsektorn måste balanseras mot behovet av bioenergi och andra produkter som använder biomassa. Det är dessutom viktigt att dessa råvaror kommer från ett hållbart skogsbruk. Forskning visar att en övergång till ökad användning av trä i byggsektorn skulle kunna medföra en liten ökning av avverkningsarna i svenska skogar, vilket kan påverka den biologiska mångfalden och kolsänkan i skogen. Därför måste det säkerställas att skogsbruket är hållbart för att minimera negativa effekter på skogsekosystemet och bevara den biologiska mångfalden[56].

Transportsektorn visade sig vara den största källan till utsläpp i Stockholm stad, se tabell 9. För att uppnå klimatbudgeten krävs utsläppsminskningar inom denna sektor, och för att uppnå detta står transportsektorn inför ett teknikval. Att minska utsläppen genom elektrifiering eller användning av biodrivmedel som också utnyttjar biomassa. Elektrifiering av transportsektorn kräver en stabil och hållbar elproduktion, medan användning av biodrivmedel kan leda till konkurrens om biomassa och påverka kolsänkan i skogen. Att låta grot som annars används till energiproduktion, vara kvar i skogen kan gynna biologisk mångfald och skogstillväxt vilket i sin tur skapar kolsänkor i skogen[48].

Resultaten visar att biokolproduktion från park- och trädgårdsavfall kan bidra avsevärt till att

minska utsläppen av växthusgaser. De största fördelarna uppnås när biokolproduktionen ersätter naturgas, men även ersättning av skogsflis ger betydande klimatnytta. Dessutom konkurrerar inte biokol som tillverkas av park- och trädgårdsavfall om samma resurser som bioenergi. Eftersom dessa material sällan används för energiproduktion, vilket gör biokolproduktion till en metod för att skapa kolinlagring utan att påverka tillgången på biomassa[60]. Dessutom kan tillverkningen av biokol även skapa värme och el som kan avlasta andra delar av energisystemet. Resultatet uppvisar kolinlagring och minskade utsläpp på 286-433 kiloton koldioxidekvivalenter, vilket motsvarar ungefär 28 % av Stockholm stads territoriella utsläpp 2022 . För att kunna producera den mängd biokol och energi som beräkningarna antyder, måste det finnas tillräckligt med park- och trädgårdsavfall tillgängligt. De siffror som beräknats är dock betydligt högre än den faktiska mängd biokol som producerades i Stockholm stad under 2019 av Stockholm Exergi, vilket uppgick till 43 ton koldioxidekvivalenter [60]. Detta påpekar en potentiell skillnad mellan beräknade kapaciteter och verkliga produktionsnivåer, vilket kan indikera begränsningar i tillgången på råmaterial eller effektiviteten i produktionsprocessen. Men den anläggning som fanns 2019 var en mycket liten demonstrationsanläggning och inte ämnad för storskalig produktion.

5.7 Framtida studier

Vid beräkningen av dessa kolsänkor användes nyckeltal sammanställda av Miljöförvaltningen för att utvärdera kolsänkor i Malmö stad[23]. Att dessa nyckeltal inte var fullt anpassade efter Stockholms förutsättningar och klimat kan påverka resultatet. Miljöförvaltningen har sammanställt nyckeltal och information om metoder för kolinlagring från flera olika vetenskapliga källor. Dessa nyckeltal och uppgifter anses vara trovärdiga och används som referens i detta arbete. Men för att få ett mer tillförlitligt resultat skulle nyckeltal för kolsänkornas potential i Stockholm stad behöva användas. Detsamma gäller för de uppskattade ytorna där kolsänkorna implementerades. Området där kolsänkorna kan implementeras bedöms ge ett större utslag på resultatet än nyckeltalen som används.

Det bör även tilläggas att dessa kolsänkor behöver analyseras ur ett livscykelperspektiv för att, utöver kolsänkornas potential, beräkna dess totala klimatavtryck. Eftersom vissa kolsänkor, såsom biokol, kräver energi under tillverkningsfasen, är det viktigt att framtida studier inkluderar detaljerade livscykelanalyser. Dessa bör beakta var energin och råmaterialen kommer ifrån för att få en bättre bild av den totala klimatnyttan. Det är också nödvändigt att undersöka effekterna av olika energikällor och transportmetoder för råmaterial, samt att kvantifiera de långsiktiga kolinlagringseffekterna i stadsmiljöer som Stockholm.

Utöver detta behövs fortsatt forskning för att uppskatta klimatnyttan av implementering av kolsänkor samt utveckling av nya effektiva tekniker för kolinlagring. För att öka implementering av kolsänkor krävs incitament eller andra metoder utformas för att öka investeringar i kolsänkor. Detta skapar ett utrymme för fortsatt forskning kring hur subventioner eller andra metoder bör riktas för att öka incitamentet för ökad implementering av kolsänkor.

För att få en komplett bild av stadens kolflöden och utsläpp behövs standardiserade metoder utvecklas för hur konsumtionsbaserade utsläpp ska redovisas och hanteras i stadens klimatarbete.

6 Slutsatser

I Stockholms stads geografiska område sker de största fossila kolflödena och utsläppen inom transportsektorn medan de största biogena koldioxidutsläppen sker från el och uppvärmning.

Stadens skog och mark fungerar som kolsänkor och besitter ett kollager.

De mest relevanta kolsänkorna för Stockholm stad är plantering av stadsträd som bidrar till långsiktig kolinlagring, gröna tak som binder kol under en kortare tidsperiod, samt nybyggnation av flerbostadshus med trästomme som binder kol under hela byggnadens livstid.

Nybyggnation av flerbostadshus med trästomme är kostnadseffektivt, men kräver hållbart skogsbruk. Även ökad plantering av stadsträd med biokol förbättrar stadsmiljön och ger långsiktig kolinlagring, men kräver utrymme och underhåll. Gröna tak binder effektivt kol under en kort tidsperiod och förbättrar biodiversiteten, men initiala kostnader kan vara höga.

Implementeringen av identifierade kolsänkor kan bidra till att minska Stockholms utsläpp med cirka 4 % och 10 % om även bidraget från skog och mark inkluderas, men de är inte tillräckliga för att uppnå de minskningar som krävs för att uppfylla målet om koldioxidneutralitet till 2040. För att nå klimatmålen krävs en kombination av utsläppsminskningar och kolsänkor.

Beräkningar av energiförluster vid produktion av biokol och implementering av BECCS i kraftvärmeanläggningar visar betydande energiförluster. Om istället park- och trädgårdsavfall används till biokolproduktion, genereras termisk och elektrisk energi som en bonus, vilket kan resultera i minskade utsläpp och kolinlagring i storleksordningen 286-433 kiloton koldioxidekvivalenter. Detta kan motsvara upp till 28 % av Stockholms stads utsläpp år 2022. BECCS med värmeåtervinning uppvisade en klimatnytta på cirka 600 kiloton koldioxidekvivalenter och kan nästan kompensera för hela 40% av Stockholms stads utsläpp år 2022.

Referenser

- [1] A. Mayer, “Fossil fuel dependence and energy insecurity,” *Energ Sustain Soc* 12, 2022.
- [2] J. Dong, “Impact of the paris agreement on agriculture, energy, and economy,” *BCP business and management*, vol. 34, pp. 1370–1379, 2022.
- [3] Naturvårdsverket, “FN:s klimatpanel (IPCC): Det är bråttom med klimatåtgärder.” <https://www.naturvardsverket.se/om-oss/aktuellt/nyheter-och-pressmeddelanden/2023/mars/fns-klimatpanel-ipcc-det-ar-brattom-med-klimatavgardar/>, 2023. Besökt 2024-05-22.
- [4] Sveriges Miljömål, “Utsläpp av växthusgaser till år 2045.” <https://www.sverigesmiljomal.se/etappmalen/utslapp-av-vaxthusgaser-till-ar-2045/>, 2023. Besökt 2024-06-04.
- [5] Regeringen, “Regeringens klimathandlingsplan: Hela vägen till nettonoll.” <https://www.regeringen.se/contentassets/990c26a040184c46acc66f89af34437f/regeringens-klimathandlingsplan--hela-vagen-till-nettonoll-skr-20232459.pdf>, 2023. Besökt 2024-03-28.
- [6] Smart Built Environment, “Reflow project.” <https://www.smartbuilt.se/projekt/informationsinfrastruktur/reflow/>. Besökt 2024-06-04.
- [7] National Geographic Society, “Carbon sources and sinks.” <https://education.nationalgeographic.org/resource/carbon-sources-and-sinks/>, 2024. Besökt 2024-04-17.
- [8] Z. M. Harris, S. Milner, and G. Taylor, *Chapter 5 - Biogenic Carbon—Capture and Sequestration*. Zoe M. Harris and Suzanne Milner and Gail Taylor, 2018.
- [9] Z. U. R. Farooqi, M. M. Hussain, and M. A. A. Abdul Qadeer, *Chapter 2 - Role of carbon cycle in soil productivity and carbon fluxes under changing climate*. Academic Press, 2021.
- [10] M. Holzer and T. DeVries, “Source-labeled anthropogenic carbon reveals a large shift of preindustrial carbon from the ocean to the atmosphere,” *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 36, 2022.
- [11] M. Liu, Q. Zhou, Y. Yin, D. Peng, H. Zhao, X. Jiang, and Z. Xu, “Analysis and visualization of carbon flow in iron and steel production processes,” in *2022 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEEECT)*, pp. 985–989, IEEE, 2022.
- [12] Naturvårdsverket, “Fossila bränslen.” <https://www.naturvardsverket.se/annesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimatet-och-energin/fossila-branslen/>, 2024. Besökt 2024-06-24.
- [13] K. Skrabbe, G. Chabot, and C. French, “World atmospheric co₂, its 14c specific activity, non-fossil component, anthropogenic fossil component, and emissions (1750–2018),” *Health Physics*, vol. 122, no. 2, pp. 291–305, 2022.
- [14] Naturvårdsverket, “Beräkna klimatpåverkan.” <https://www.naturvardsverket.se/vagledning-och-stod/luft-och-klimat/berakna-klimatpaverkan/>, 2023. Besökt 2024-04-17.
- [15] Naturvårdsverket, “Växthuseffekten förstärks.” <https://www.naturvardsverket.se/>

- [se/amnesomraden/klimatforandringar/darfor-blir-det-varmare/vaxthuseffekten-forstarks/](#), 2023. Besökt den 2024-03-15.
- [16] NASA, “Peak CO₂: Heat-trapping emissions.” <https://www.climatecentral.org/climate-matters/peak-co2-heat-trapping-emissions>, 2022. Besökt 2024-02-24.
- [17] NASA, “Global Surface Temperature | NASA Global Climate Change — climate.nasa.gov.” <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>, u.å. Besökt 2024-02-19.
- [18] Världsnaturfonden WWF, “Klimatförändringarnas konsekvenser.” <https://www.wwf.se/klimat/konsekvenser/#15-graders-uppvarmning>, u.å. Besökt 2024-19-02.
- [19] NASA, “Extreme Weather and Climate Change.” <https://climate.nasa.gov/extreme-weather/>, u.å. Besökt 2024-20-02.
- [20] S. Neuer, M. H. Iversen, and G. Fischer, “The ocean’s biological carbon pump as part of the global carbon cycle,” *Wiley-Blackwell*, vol. 4, no. 4, pp. 1–51, 2014.
- [21] Europeiska kommissionen, “Klimatförändringarnas konsekvenser.” https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_sv, u.å. Besökt 2024-21-02.
- [22] United Nations Economic Commission for Europe, “Carbon sinks and sequestration.” <https://unece.org/forests/carbon-sinks-and-sequestration>, u.å. Besökt 2024-02-21.
- [23] T. Råberg, K. Lorentzon, M. Västerdal, A. Pettersson Skog, C. Cristescu, K. Davidsson, B. S, and P. Tchoffor, “Potentiella kolsänkor i malmö stad,” Rapport RISE-2022-59992, RISE Research Institutes of Sweden, Sverige, 2022.
- [24] Klimatkommunerna, “En översikt över olika sätt att skapa kolsänkor.” <https://klimatkommunerna.se/kunskapsbank/sank-kolet/en-oversikt-over-olika-satt-att-skapa-kolsankor/>, 2023. Besökt 2024-05-21.
- [25] Klimatkommunerna, “Klimatpåverkan och kolsänkan: Exemplet biokol.” <https://klimatkommunerna.se/kunskapsbank/sank-kolet/rakna-ut-kolsankan/klimatpaverkan-och-kolsankan-exemplet-biokol/>, u.å. Besökt 2024-06-04.
- [26] Naturvårdsverket, “Klimatet och skogen.” <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/omraden/klimatet-och-skogen/>, 2024. Besökt 2024-04-17.
- [27] Naturvårdsverket, “Våtmarker och klimat.” <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/vatmark/vatmarker-och-klimat/>, 2024. Besökt 25-04-2024.
- [28] W. Dong, M. Wang, Z. Wu, Z. Zhao, W. Gan, and S. Zhou, “Achieving stringent climate targets requires a carbon-negative urban sector,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 3, p. 2420, 2023.
- [29] IPCC, “Climate change 2022: Mitigation of climate change,” tech. rep., Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.
- [30] Stockholm Exergi, “Bio-CCS - Stockholm Exergi.” <https://www.stockholmexergi.se/en/bio-ccs/>, u.å. Besökt 2024-04-26.
- [31] Naturvårdsverket, “Tre sätt att beräkna klimatpåverkande utsläpp.” <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomstallningen/>

- [sveriges-klimatarbete/tre-satt-att-berakna-klimatpaverkande-utslapp/](#), 2024. Besökt 2024-04-17.
- [32] Statistiska centralbyrån (SCB), “Svenska utsläpp från konsumtion ökade 2021.” <https://www.scb.se/pressmeddelande/svenska-utslapp-fran-konsumtion-okade-2021/>, 2021. Besökt 2024-04-18.
- [33] Naturvårdsverket, “Vad ingår i de konsumtionsbaserade utsläppen?.” <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatomställningen/omraden/klimatet-och-konsumtionen/vad-ingar-i-de-konsumtionsbaserade-utslappen/>, 2023. Besökt 2024-06-01.
- [34] M. Ramlow, “Update: Greenhouse gas protocol carbon removals and land sector initiative.” <https://ghgprotocol.org/blog/update-greenhouse-gas-protocol-carbon-removals-and-land-sector-initiative>, 2022. Besökt 2024-04-18.
- [35] GHG Protocol, “GHG protocol for cities.” <https://ghgprotocol.org/ghg-protocol-cities>, 2024. Besökt 2024-04-18.
- [36] International Organization for Standardization, “Environment climate change mitigation.” <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/store/en/PUB100271.pdf>, 2006. Besökt 2024-04-18.
- [37] S. Gunnarsson, “Carbon flows in sweden,” Master’s thesis, Royal Institute of Technology, KTH, 2022.
- [38] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), “Land use, land-use change and forestry (lulucf).” <https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/land-use--land-use-change-and-forestry-lulucf>, 2024. Besökt 2024-04-17.
- [39] Naturvårdsverket, “Nettoutsläpp och nettoupptag av växthusgaser från markanvändning (LULUCF).” <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-nettoutslapp-och-nettoupptag-fran-markanvandning/>, 2024. Besökt 2024-05-22.
- [40] N. B. Grimm, S. H. Faeth, N. E. Golubiewski, C. L. Redman, J. Wu, X. Bai, and J. M. Briggs, “Global change and the ecology of cities,” *Science*, vol. 319, no. 5864, pp. 756–760, 2008.
- [41] S. Chen, H. Long, B. D. Fath, and B. Chen, “Global urban carbon networks: Linking inventory to modeling,” *Environmental Science and Technology*, vol. 54, no. 9, pp. 5790–5801, 2020.
- [42] K. Dahal and J. Niemelä, “Cities’ greenhouse gas accounting methods: A study of helsinki, stockholm, and copenhagen,” *Climate*, vol. 5, no. 2, p. 31, 2017.
- [43] Stockholms stad, “Klimat och miljö - stockholms stad.” <https://vaxer.stockholm/tema/klimat-och-miljo/>, 2023. Besökt 2023-05-02.
- [44] Stockholms stad, “Bostäder - stockholms stad.” <https://vaxer.stockholm/tema/bostader/>, 2023. Besökt 2024-05-02.
- [45] Stockholms stad, “Översiktsplan för stockholm.” <https://vaxer.stockholm/tema/oversiktsplan-for-stockholm/>, 2023. Besökt 2023-06-02.

- [46] Stockholms stad, “Klimatbudget och utfall.” <https://miljobarometern.stockholm.se/klimat/utslapp-av-vaxthusgaser/klimatbudget-och-utfall/table/>, 2020. Besökt 25-04-2024.
- [47] Klimatkomunerna, “Stockholms klimatbudget.” <https://klimatkommunerna.se/kunskapsbank/planer-och-strategier/klimatbudgetar/stockholms-klimatbudget/>, 2023. Besökt 2024-06-03.
- [48] A. Lindahl and M. Lundblad, “Kolförråd och kolsänka i skog och mark inom stockholms stad,” rapport, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Stockholm, 2021.
- [49] Stockholm Vatten och Avfall, “Återvinningscentraler i stockholm.” <https://www.stockholmvattenochavfall.se/avc>, 2024. Besökt 2024-05-29.
- [50] Länsstyrelsernas energi- och klimatsamordning (LEKS), “Energistatistik.” <https://www.leks.se/energistatistik/>, 2024. Besökt 2024-05-22.
- [51] Naturvårdsverket, “Grönytefaktorn: Infomaterial att arbeta med grönytefaktorn.” <https://www.naturvardsverket.se/4ac5de/globalassets/amnen/samhallsplanering/stod-och-rad/gronytefaktorn-infomaterial-att-arbeta-med-gronytefaktorn.pdf>, 2018. Besökt 2024-05-22.
- [52] M. Erlandsson, E. Mattsson, and J. Nilsson, “Negativa klimatutsläpp genom användning av biogena kolsänkor,” tech. rep., LFM30, 2022.
- [53] Lantmäteriet, “Detaljplaner.” <https://detaljplaner.lantmateriet.se>, 2024. Besökt 2024-05-22.
- [54] E. S. Azzi, E. Karlton, and C. Sundberg, “Prospective life cycle assessment of large-scale biochar production and use for negative emissions in stockholm,” *Environmental Science Technology*, pp. 8466–8476, 2019.
- [55] S. Bergström, “Koldioxidavskiljning på ett biobränsleeldat kraftvärmeverk: Simulering av två avskiljningstekniker vid karlstad energis kraftvärmeverk, heden 3,” Master’s thesis, Karlstad University, June 2020.
- [56] M. Schulte, R. Jonsson, J. Eggers, T. Hammar, J. Stendahl, and P.-A. Hansson, “Demand-driven climate change mitigation and trade-offs from wood product substitution: The case of swedish multi-family housing construction,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 421, p. 138487, 2023.
- [57] Energimarknadsinspektionen, “Residualmix 2023.” <https://ei.se/bransch/ursprungsmarkning-av-el/residualmix>, 2023. Besökt 2023-06-02.
- [58] Naturvårdsverket, “Vägledning för att beräkna utsläppsminskningar.” <https://www.naturvardsverket.se/4a6ac7/globalassets/amnen/klimat/klimatklivet/vagledning-berakna-utslappsminskning-230915.pdf>, 2023. Besökt 2023-06-02.
- [59] L. Persson, “Biokol: Produktion och användning,” examensarbete, KTH Royal Institute of Technology, 2021.
- [60] H. Söderqvist and G. Erselius, “Fjärrvärme med minusutsläpp,” tech. rep., Stockholm Exergi, 2020.
- [61] Bergab, “Värmverk i värtahamnen.” <https://www.bergab.se/varmverk-i-varstahamnen>, 2023. Besökt 2023-06-25.

- [62] Stockholm Exergi, “Svar remiss planerande på granskning om detaljplan för lövstaverket del av fastigheten hässelby villastad.” <https://edokmeetings.stockholm.se/welcome-sv/namnder-styrelser/hasselby-vallingby-stadsdelsnamnd/mote-2022-10-27/agenda/svar-remiss-planerande-pa-granskning-om-detaljplan-for-lovstaverket-del-av-fastigheten/downloadMode=open>, 2022. Besökt 2023-06-25.
- [63] Miljöbarometern Stockholm, “Utsläpp av växthusgaser.” <https://miljobarometern.stockholm.se/klimat/utslapp-av-vaxthusgaser/utslapp-av-vaxthusgaser/>, 2024. Besökt 25-04-2024.
- [64] Naturvårdsverket, “Sveriges utsläpp och upptag av växthusgaser.” <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/sveriges-utslapp-och-upptag-av-vaxthusgaser/>, 2024.
- [65] Naturvårdsverket, “Klimatet och konsumtionen.” <https://www.naturvardsverket.se/annesomraden/klimatomställningen/omraden/klimatet-och-konsumtionen/>, 2024. Besökt 2024-05-22.
- [66] T. Kekkonen, J. Mattila, K. Raunio, and T. Oey, “Carbon absorption and carbon absorption enhancement of recycled concrete aggregate masses,” in *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient*, Springer, 2023.
- [67] H.-J. Ho, A. Iizuka, E. Shibata, and T. Ojumu, “Circular indirect carbonation of coal fly ash for carbon dioxide capture and utilization,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 10, no. 5, 2022.
- [68] Miljöbarometern, Stockholm, “Vegetationsklädda tak.” <https://miljobarometern.stockholm.se/vatten/atgarder/vegetationskladda-tak/>, 2024. Besökt 2024-05-22.
- [69] P. Gong, A. Knutsson, and K. Elofsson, “Styrmedel för att öka kolsänkor i skogssektorn,” Tech. Rep. 978-91-620-7037-3, Naturvårdsverket, 2024.
- [70] F. Sandberg and E. Becirovic, “Life cycle assessment of carbon capture and storage in the cement industry,” master’s thesis, Lund University, 2021.
- [71] Naturvårdsverket, “Skog, tillväxt och avverkningar.” <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/skog/skog-tillvaxt-och-avverkningar/>, 2023. Besökt 2023-06-02.
- [72] Brandskyddsföreningen, “Både risker och vinster med att bygga i trä.” <https://www.brandskyddsforeningen.se/tidningen-brandsakert/artiklar/bade-risker-och-vinster-med-att-bygga-i-tra/>, 2023. Besökt 2023-06-02.

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Även om du inte publicerar fulltexten kommer den arkiveras digitalt. Om fler än en person har skrivit arbetet gäller krysset för samtliga författare. Läs om SLU:s publiceringsavtal här:

- <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

☒ JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

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