Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för energi och teknik

Bio-CCS från biogasanläggningar
Modellering av distributionssystem för CO2

- *Bio-CCS from biogas plants*
  Modeling of CO2 distribution systems

Karin Berg

Civilingenjörsprogrammet i energisystem

Examensarbete 2021:04
ISSN 1654-9392
Uppsala 2021

Bio-CCS från biogasanläggningar
Modellering av distributionssystem för CO2

Bio-CCS from biogas plants
Modeling of CO2 distribution systems

Karin Berg

Handledare: Johan Andersson, RISE
Ämnesgranskare: David Ljungberg, institutionen för energi och teknik, SLU
Examinator: Åke Nordberg, institutionen för energi och teknik, SLU

Omfattning: 30 hp
Nivå, fördjupning och ämne: Avancerad nivå, A2E, teknik
Kurstitel: Examensarbete i energisystem
Kurskod: EX0724
Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp
Kurskoordinerande institution: Institutionen för energi och teknik

Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2021
Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
Delnummer i serien: 2021:04
ISSN: 1654-9392
Elektronisk publicering: http://stud.epsilon.slu.se

Nyckelord: Logistik, Transport, Koldioxid, Distributionskostnad, Energianvändning, Vägtransport, Rörledning, Lagring

Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

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. Fulltexten kommer dock i samband med att dokumentet laddas upp arkiveras digitalt.

Om ni är fler än en person som skrivit arbetet så gäller krysset för alla författare, ni behöver alltså vara överens. 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.

Abstract

Negative emissions of greenhouse gases will be essential for reaching the goal of net-zero emissions by 2045. Carbon Capture and Storage (CCS) is a technique that collects CO_2 with the purpose to permanently store it outside of the atmosphere. When CCS is applied to streams of CO_2 with biogenic origin, negative emissions are achieved and this is called bio-CCS.

Biogas production with upgrading has great potential for applying bio-CCS since CO_2 is already separated during the upgrading process. As the separation process is a costly step for all other industries with CO_2 emissions, bio-CCS from biogas plants can become the most cost-efficient implement of this technique.

This thesis work aims to study the distribution chain of CO_2 between biogas plants and a terminal in a bio-CCS system. The studied biogas plants have an annual CO_2 production of 1 500-15 000 ton/year and the distances to the terminal can range up to 200 km. The study combines literature studies, communication with actors in industry and simulation of different alternative distribution systems in *Matlab* to determine which is the most efficient distribution system. The results of this study can be used for planning a strategic implementation of a distribution system for CO_2 from biogas plants.

The most cost efficient, and one of the most energy efficient solutions, was distribution with stationary storage tanks at the biogas plants and transportation by trucks optimized for maximum load capacity. Upon implementation of this solution for distribution of CO_2, the average cost may amount to 230-245 SEK/ton and the energy usage for the transportation may amount to 26-27 kWh/ton. The logistics of the system may be performed by 1-2 vehicles. The most energy efficient distribution system was transportation by pipeline, but this system was only profitable for transportation distances up to one kilometre.

Populärvetenskaplig sammanfattning

För att klara målet om netto-noll utsläpp av CO_2 år 2045 behövs negativa utsläpp som kan kompensera för de ofrånkomliga utsläppen från industrier som exempelvis jordbruket. Sådana åtgärder kallas kompletterande åtgärder, och bio-CCS är ett exempel på en kompletterande åtgärd. CCS står för Carbon Capture and Storage, och tekniken går ut på att fånga in CO_2 för att sedan lagra den permanent. Bio-CCS indikerar att CO_2 har sitt ursprung ur biogena kolkällor, och det är när man tillämpar CCS-tekniken på biogen CO_2 som negativa utsläpp kan åstadkommas.

Biogasanläggningar med uppgradering för fordonsgas är inte samhällets största punktutsläppare av CO_2 med biogent ursprung, men dessa anläggningar har en unik egenskap som gör dem särskilt intressanta ur ett CCS-perspektiv. Vid uppgradering separeras CO_2 från metangas vilket innebär att ren CO_2 finns mycket lättillgänglig. Den lättillgängliga strömmen av CO_2 är grunden till hypotesen att bio-CCS från biogasanläggningar kan komma att vara ett av de kostnadseffektivaste koncepten för bio-CCS. Genom projektet ”Bio-CCS från biogasanläggningar” studerar RISE hela värdekedjan, och det här examensarbetet har utgjort ett delprojekt. Examensarbetet har gått ut på att studera distributionskedjan mellan biogasanläggningar och en central uppsamlingsplats. De undersökta biogasanläggningarna har en årlig CO_2-produktion om 1 500-15 000 ton/år och transportavstånd upp till 200 km från uppsamlingsplatsen.

De frågeställningar som besvarats genom arbetet är: Vilka alternativa systemlösningar finns för distribution av CO_2? Vilket av dessa alternativ är lämpligast? Vilken genomsnittlig distributionskostnad och energianvändning kan väntas vid utbyggnad av denna distributionslösning? Arbetet ämnar utgöra ett underlag för strategisk planering av en framtida implementering av bio-CCS från biogasanläggningar. Målet var att skapa en beräkningsmodell för att simulera olika distributionslösningars kostnad och energianvändning. Syftet med arbetet är att finna den lämpligaste distributionslösningen för bio-CCS vid biogasanläggningar.

Genom litteraturstudier, samtal med olika industriaktörer och simulering av distributionsalternativen i Matlab har examensarbetet resulterat i följande resultat och slutsatser. Den lämpligaste distributionslösningen bedöms vara korttidslagring av CO_2 på biogasanläggningarna genom stationära lagringstankar, och CO_2-transport med lastbil där lastbäraren specialdesignats för maximal lastkapacitet utifrån svenska transportregler. Denna lösning bedömdes som lämpligast eftersom det är den kostnadseffektivaste lösningen för alla transportavstånd större än 1 km, och det är också en av de energieffektivaste distributionslösningarna. Med denna lösning kan den genomsnittliga distributionskostnaden komma att bli 230–245 SEK/ton vid en framtida

implementering. Simuleringarna har dock visat att biogasanläggningarnas storlek och geografiska läge har stor inverkan på kostnaden. För att klara tömningslogistiken med denna distributionslösning beräknas 1–2 lastbilar behövas, och deras energianvändning per transporterad produkt beräknas vara 26-27 kWh/ton CO_2.

Slutligen konstaterades att CO_2-distribution genom rörledning är den energieffektivaste distributionslösningen, men ekonomisk potential finns endast för mycket korta transportavstånd, upp till en dryg kilometer.

Exekutiv sammanfattning

Bio-CCS från biogasanläggningar med uppgradering har stor potential att bli ett av de kostnadseffektivaste koncepten för bio-CCS genom den lättillgängliga strömmen av CO_2. Som ett steg i att undersöka hela värdekedjan för bio-CCS från biogas har det här examensarbetet gått ut på att studera distributionskedjan mellan biogasanläggningar och en central uppsamlingsplats. De studerade biogasanläggningarna har en CO_2-produktion om 1 500-15 000 ton/år och ett transportavstånd upp till 200 km från uppsamlingsplatsen. Genom litteraturstudie, samtal med industriaktörer och simulering erhölls följande resultat.

Transport med tåg förkastas som möjligt distributionsalternativ på transportavstånd $<$ 200 km. För transportavstånden 1-200 km är distribution med lastbil kostnadseffektivast, och för transportavstånd upp till 1 km är distribution med rörledning kostnadseffektivast.

För lastbilsdistribution undersöktes tre olika lastbärare och två olika lagringslösningar, mobila och stationära lager. Simuleringar visade att lösningen med stationära lager och lastbärare med maximal lastkapacitet är den kostnadseffektivaste och en av de energieffektivaste lösningarna. En framtida implementering av bio-CCS från biogasanläggningar med total infångning om 20 000-60 000 ton CO_2 beräknas få en genomsnittliga distributionskostnad om 230-245 SEK/ton och en energianvändning om 26-27 kWh/ton CO_2. För tömningslogistiken väntas 1-2 lastbilar behövas. Den energieffektivaste distributionslösningen är distribution genom rörledning.

Innehåll

1 Introduktion **1**
1.1 Potential och tidsram för permanent lagring av CO_2 i Sverige och Norden 2
1.2 RISE-projektet Bio-CCS från biogasanläggningar 3
1.3 CO_2-transport i Sverige och tidigare studier på ämnet 4
1.4 Frågeställning 4
1.5 Syfte och mål 4
1.6 Metod 5
1.7 Avgränsning 5

2 Bakgrund **6**
2.1 Northern Lights konceptet 6
2.2 Termodynamik och fasövergång för rena ämnen 8
2.2.1 Förvätskning av CO_2 11
2.3 Distribution av CO_2 12
2.3.1 Säkerhetsrisker vid hantering av CO_2 12
2.3.2 Transport av farligt gods 12
2.3.3 Fordonsbegrepp 13
2.3.4 Krav om mått, vikt och axeltryck vid lastbilstransport 14
2.3.5 Kör- och vilotider 16
2.3.6 Regler vid anläggning av gasledning 17

3 Beskrivning av möjliga distributionslösningar **17**
3.1 Distributionssystem med lastbilstransport 17
3.1.1 Systembeskrivning av distribution med mobila lager 17
3.1.2 Systembeskrivning av distribution med stationära lager 20
3.1.3 Beskrivning av lastbärare 23
3.1.4 Distributionsscenarion 27
3.2 Distributionssystem med tågtransport och lastbilstransport för delsträckor utan spår 32
3.3 Distributionssystem med rörledningstransport 32

4 Modellbeskrivning **34**
4.1 Kostnadsmodell för system av biogasanläggningar 36
4.2 Kostnadsmodell för enskild biogasanläggning 38

5 Resultat och diskussion **39**
5.1 Vägburen transport 39

5.1.1 Optimering av antal stationära lager och pumpkapacitet på biogasanläggningarna vid scenarion med stationära lager . . . 39
5.1.2 Behov av lastbärare i lilla systemet av biogasanläggningar . . 40
5.1.3 Distributionskostnad för lilla systemet 40
5.1.4 Energianvändning för lilla systemet 41
5.1.5 Behov av lastbärare i stora systemet 42
5.1.6 Genomsnittlig distributionskostnad för stora systemet 43
5.1.7 Energianvändning för stora systemet 44
5.1.8 Tömningsbehov för lilla systemet 44
5.1.9 Överkapacitet i lager 46
5.1.10 Distributionskostnad för en enskild biogasanläggning 47
5.2 Distribution med rörledning 49
5.3 Känslighetsanalys 50
5.4 Sammanfattande diskussion 53

6 Slutsats **58**

7 Vidare arbete **59**

8 Appendix **63**
8.1 Hastighetsprofil 63
8.2 Bränsleförbrukning 63
8.3 Optimering av scenario med stationära lager 64
8.4 Distributionskostnad för en enskild biogasanläggning vid distributionslösning med stationära lager och specialbyggd semitrailer som lastbärare 67
8.5 Fönster av CO_2-produktionsstorlekar och transportavstånd för biogasanläggningar där distribution genom rörledning är kostnadseffektivare än distribution med lastbil 68

1 Introduktion

Sveriges riksdag har genom det klimatpolitiska ramverket infört ett mål om netto-noll utsläpp av växthusgaser år 2045, följt av ett negativt utsläpp under efterkommande år (Miljödepartementet 2017). Den primära strategin är att fasa ut fossila bränslen, men det finns industrier där utsläpp av växthusgaser är ofrånkomliga förutsatt att de ej avvecklas (Klimatpolitiska vägvalsutredningen 2020). Exempel på sådana industrier är cementtillverkning där koldioxid (CO_2) bundet i kalksten avges under tillverkningsprocessen (Cementa - Heidelberg Cement Group 2009) och jordbruk där diffusa växthusgasutsläpp förekommer bland annat genom markanvändning (Klimatpolitiska vägvalsutredningen 2020). Därför räcker det inte att enbart fasa ut fossila bränslen för att nå målen. För att klara klimatmålet om netto-noll utsläpp år 2045 behövs fler åtgärder, såsom Carbon Capture and Storage (CCS) (ibid.).

CCS innebär att CO_2 fångas in och lagras permanent, exempelvis geologiskt. CCS av CO_2 från fossila källor klassas av *Klimatpolitiska vägvalsutredningen* (2020) som en utsläppsminskande åtgärd. CCS är en åtgärd som exempelvis cementindustrin kan tillämpa för att minska sitt CO_2-utsläpp. Bio-CCS innebär att CO_2 av biogent ursprung fångas och lagras permanent. Eftersom nyttjande av biobränslen redan anses ge ett netto-noll utsläpp av CO_2 över en omloppstid (förutsatt hållbar återplantering) (Naturvårdsverket 2020) skulle tillämpning av CCS på biogen CO_2 innebära ett negativt utsläpp (Klimatpolitiska vägvalsutredningen 2020). Bio-CCS klassas därför av *Klimatpolitiska vägvalsutredningen* (2020) som en kompletterande åtgärd. Bio-CCS kan således kompensera för de okontrollerbara och svårinfångade växthusgasutsläppen från exempelvis jordbruket. Följaktligen är både utsläppsminskande- och kompletterande åtgärder genom CCS och bio-CCS en förutsättning för att Sverige ska kunna uppnå klimatmålet om netto-noll utsläpp 2045 samtidigt som dagens industri lever vidare.

I Sverige finns goda förutsättningar för bio-CCS tack vare ett stort antal punktutsläppskällor av CO_2 från biogena källor, främst från kraftvärmeverk och massa- och pappersindustri. CO_2-avskiljning är mycket kostsamt och därför krävs det ofta stora punktutsläpp för att det ska vara ekonomiskt försvarbart att implementera CCS, men det finns undantag. Inom spektrumet för biogas är uppgraderingsanläggningar storskaliga anläggningar, men i termer av nationella punktutsläppskällor är anläggningarna småskaliga (Bauer m. fl. 2013; Energigas Sverige 2019). Bio-CCS från biogas kan ändå vara kostnadseffektivt (Li m. fl. 2017). Uppgradering av biogas består i att separera CO_2 från metangas, och flertalet separationsmetoder ger CO_2 i ren form som restprodukt (Energiforsk 2016). Idag tillvaratas CO_2 inte, utan släpps ut i atmosfären (RISE 2020a).

Vid en framtida implementering av bio-CCS vid biogasuppgradering är CO_2-avskiljningen

redan utförd. Istället kommer förvätskning, lagring och transport av CO_2 att utgöra en stor del av kostnaden. För att minimera kostnaden för hela bio-CCS-kedjan måste en framtida infrastrukturutbyggnad göras väl avvägd, och investeringar måste göras i ett effektivt distributionssystem. Research Institutes of Sweden (RISE) genomför nu ett projekt där kostnadseffektiviteten på hela värdekedjan för bio-CCS från biogas undersöks (RISE 2020a). Värdekedjan består i förvätskning och distribution av CO_2 från biogasanläggningar till ett mellanlager vid en terminal, och distribution av CO_2 från terminalen till ett slutförvar. Det här examensarbetet utgör ett delprojekt och går ut på att föreslå ett lämpligt distributionssystem för CO_2-transport mellan biogasanläggningar och en terminal i Sverige.

1.1 Potential och tidsram för permanent lagring av CO_2 i Sverige och Norden

Sverige har generellt dåliga förutsättningar för permanent geologisk lagring av CO_2 eftersom kristallint urberg, som är en dålig akvifer för CO_2, dominerar svenska berggrunden. Några möjliga platser har dock identifierats i södra Östersjön. Ett nordiskt forskningssamarbete kallat NordiCCS utvärderade under åren 2011-2015 olika nordiska platser, och dessa betygsattes från 0 till -78 där 0 är bäst. Genom numreringen kan platserna rangordnas utifrån bästa fysikaliska förutsättningar för slutlagring av CO_2. De tre bästa platserna i Sverige är Faludden, Arnagergrönsand och Höganäs-Rya och de erhöll betygen -60, -64 och -76. I Danmark finns jämförelsevis flera platser med poäng mellan -47 till -62 och i Norge finns platser med poäng mellan -17 till -28 (Klimatpolitiska vägvalsutredningen 2020). I utredningen SOU 2020:4, *Vägen till en klimatpositiv framtid*, bedöms också att det finns bättre lagringskapacitet i Danmark och framförallt i Norge.

Utöver att de fysikaliska förutsättningarna är bättre i Norge, är också tidsramen till implementering avsevärt kortare. Ett norskt CCS-projekt kallat Northern Lights är redan långt gånget i processen och har en beräknad uppstart år 2024. I Sverige skulle en uppstart av slutlagring för CO_2 kunna äga rum om först 18-30 år enligt en bedömning av Sveriges Geologiska Undersökning (SGU). Detta beror delvis på att det i Sverige skulle krävas en mer avancerad anläggning på en platå i havet, vilket i sig tar längre tid att bygga än den man planerar att bygga på en ö i Norge (Klimatpolitiska vägvalsutredningen 2020; Equinor 2019), men främst beror det på att Sverige står på ruta ett i processen. Uppsala universitet har planer för ett pilotprojekt på Gotland, men det saknas både finansiering och nödvändiga tillstånd (Klimatpolitiska vägvalsutredningen 2020). En exakt tidsuppskattning är svår att göra eftersom det finns många osäkerheter: handläggningstiderna för prövning av tillstånd, huruvida det är nödvändigt att genomföra en testanläggning på land eller inte och om vissa moment

kan överlappa varandra. SGU bedömer att svensk slutlagring skulle kunna tas i drift först i slutet av 2030-talet eller början av 2040-talet förutsatt att processen sätts igång nu. Oavsett om det dröjer 18 eller 30 år är ledtiderna för ett svenskt slutlager för långa. Slutförvar av svensk CO_2 utomlands är därför en förutsättning för att bio-CCS från svensk CO_2 ska kunna implementeras i närtid (Klimatpolitiska vägvalsutredningen 2020) och följaktligen utgöra en nyckelroll i arbetet för att uppnå klimatmålet om netto-noll utsläpp av växthusgaser år 2045 (Miljödepartementet 2017).

1.2 RISE-projektet Bio-CCS från biogasanläggningar

RISE driver i samarbete med *Malmberg Water, Wärtsilä Puregas Solutions, Nordic gas solutions, Växjö kommun* och *Gasum* projekt *Bio-CCS från biogasanläggningar*. Projektet går ut på att studera värdekedjan för bio-CCS från biogasanläggningar till slutlagring. Projektet innefattar storskaliga biogasanläggningar med uppgradering och produktion av fordonsgas. Biogasanläggningarna har en årlig produktion om 12-120 GWh biogas, och genom uppgradering avskiljs ungefär 1 500-15 000 ton CO_2 per år. Hypotesen är att CO_2-strömmen från uppgraderingsanläggningar kan vara en av de lättillgängligaste källorna av CO_2 med biogent ursprung, och således att bio-CCS från biogasuppgradering kan komma att bli ett av de kostnadseffektivaste koncepten för bio-CCS (RISE 2020a).

Den studerade värdekedjan är uppdelad i tre huvudsakliga block:

1. Frånskiljning och rening av CO_2.
2. Småskalig förvätskning.
3. Distribution av CO_2, från biogasanläggningar till slutförvar.

Målet med projektet är att studera ovanstående värdekedja samt beräkna värdekedjans energianvändning och kostnad per avskilt ton CO_2. Det tillkommer även att undersöka vilka förutsättningar som finns för att finna avsättning för CO_2. Målet är att identifiera hur avsättningen kan påverka totalekonomin för olika aktörer (RISE 2020b).

RISE delar Klimatpolitiska vägvalsutredningens uppfattning om att slutlagring utomlands är en förutsättning för en närtida implementering, och projektet ämnar undersöka vilka olika alternativ som finns. Det här examensarbetet, som utgör ett delprojekt i arbetsblock 3, utgår alltjämt från slutlagring enligt Northern-Lights-konceptet som kommer sammanfattas i ett senare avsnitt (se avsnitt 2.1).

1.3 CO_2-transport i Sverige och tidigare studier på ämnet

Bulktransport av flytande CO_2 (LCO_2) förekommer i Sverige i begränsad omfattning, exempelvis inom livsmedelsindustrin (Nippon Gases 2020). I dagsläget finns det ingen kommersiell CCS-anläggning (Klimatpolitiska vägvalsutredningen 2020) men det förekommer ett begränsat antal studier på distributionskostnaden vid CCS. En studie har påträffats där distributionskostnaden för den landbaserade transportsträckan mellan utsläppskällan och en terminal har beräknats (Vattenfall AB 2020). I denna studie har punktutsläppskällan en årlig CO_2-frånskiljning om 125 000 ton/år.

Den tidigare studien och denna är bara delvis jämförbara eftersom förutsättningarna för CO_2-transport skiljer sig åt. Dels är det en stor skalskillnad då CO_2-frånskiljningen i den tidigare studien är markant större. Dessutom består distributionssystemet i den tidigare studien av en CCS-anläggning medan det här arbetet utgår från ett system av CCS-anläggningar.

Om ett system för bio-CCS ska byggas ut i framtiden är CO_2 från biogasuppgradering en av de lättillgänligaste strömmarna. Det finns inte några kända studier som utvärderar distributionskosntaden för ett system med de förutsättningar som är aktuella vid bio-CCS från biogasanläggningar. Då det saknas etablerade lösningar för hur distributionen skulle kunna fungera i ett sådant system behöver ett förslag till teknisk lösning utvecklas för att kunna göra en rimlig kostnadsbedömning.

1.4 Frågeställning

De frågor som denna studie ämnar besvara är:

1. Vilka alternativa systemlösningar finns för distribution av CO_2 mellan biogasanläggningar och en terminal?
2. Vilket av dessa alternativ är lämpligast?
3. Vilken genomsnittlig distributionskostnad och energianvändning kan väntas vid utbyggnad av det lämpligaste distributionsalternativet?

1.5 Syfte och mål

Syftet med detta arbete är att ta fram förslag på en systemlösning för distribution av CO_2 mellan biogasanläggningar och ett mellanlager för CO_2 i en svensk hamn. Syftet är att arbetet ska kunna utgöra ett underlag för strategisk planering av en framtida utbyggnad av bio-CCS från biogasanläggningar. Distributionssystemet ska bestå av transport och korttidslagring, och det ska hantera CO_2-flöden mellan 1 500 och 15 000 ton/år. Systemlösningen ska vara både tekniskt- och ekonomiskt genomförbar och

systemet ska vara så effektivt som möjligt. Arbetet ämnar beskriva hela distributionskedjan och beröra alla tänkbara aspekter av CO_2-distribution.

Målet är att skapa en beräkningsmodell för olika distributionslösningar, och att genom simulering erhålla:

- Kostnad per ton avskild CO_2 för vardera undersökt distributionslösning.
- Energiåtgång per ton avskild CO_2 för vardera undersökt distributionslösning.

1.6 Metod

Genom litteraturstudie och intervju med olika industriaktörer har förutsättningar för olika distributionsalternativ kartlagts. Faktainsamlingen låg till grund för framtagande av en systembeskrivning för flera alternativa distributionskedjor och resonemang kring de alternativa distributionskedjornas för- och nackdelar samt deras tekniska genomförbarhet.

Genom litteraturstudie och intervju med industriaktörer kunde nödvändiga nyckeltal till beräkningarna samlas in. En statisk beräkningsmodell som beräknar distributionskostnad och energianvändning för respektive distributionsalternativ skapades i programmet *Matlab*. Simuleringarnas resultat är underlag för slutsatsen om vilket distributionsalternativ som är effektivast.

I slutet av arbetet genomfördes känslighetsanalyser för att undersöka hur resultatet står sig vid förändrad indata i modellen, men även för att kunna identifiera viktiga parametrar att vidare optimera i fortsatta studier.

Efter en övergripande analys av distributionsalternativens för- och nackdelar, tekniska genomförbarhet och deras effektivitet kunde en bedömning göras om vilken distributionslösning som är den lämpligaste för CO_2-transport vid bio-CCS från biogasanläggningar.

1.7 Avgränsning

Förutsättningarna för distribution av CO_2 bestäms utifrån ett specifikt koncept för slutlagring, nämligen Nortern Lights konceptet (se avsnitt 2.1).

Beräkningsmodellen utgår från att den årliga CO_2-produktionen är jämt fördelad över hela året och tar alltså inte hänsyn till några eventuella årsvariation.

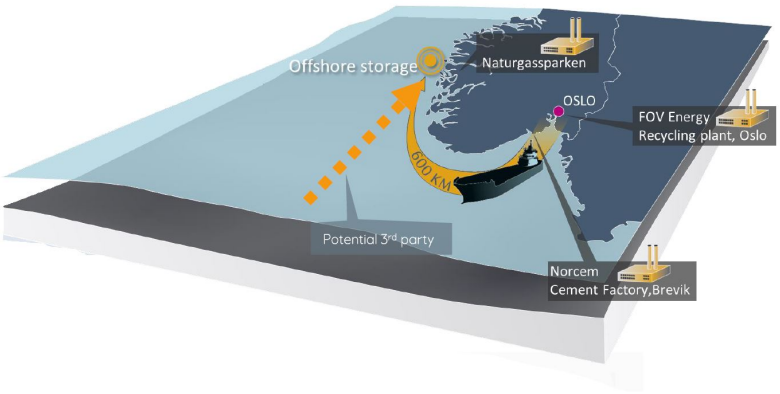
Energiberäkningarna avser bara tömningslogistiken, energiåtgången för transport av infrastruktur till Sverige har inte tagits med. I kostnadsberäkningarna ingår dock

kostnad för transport av infrastruktur till Sverige och installation. Energiberäkningarna inkluderar endast bränsleförbrukning och inte elanvändning från pumpar och övrig utrustning, och likaså är elkostnaden inte med i kostnadsberäkningarna.

2 Bakgrund

2.1 Northern Lights konceptet

Northern Lights projektet utgör en del i ett norskt demonstrationsprojekt för CCS. Det norska CCS-projektet går ut på att konceptualisera CO_2-infångning på industrianläggningar i Oslofjordregionen, båttransport och geologisk slutlagring under havsbotten i det norska havet utanför Bergen, se figur 1 (Equinor 2019).



Figur 1: Norskt demonstrationsprojekt för CCS (Lambton 2020)

Northen Lightsprojektet syftar till att konceptualisera den sista fasen i CCS-kedjan, nämligen båttransporten och slutlagringen (ibid.).

Enligt Northern Lights konceptrapport kommer fartygsdesignen vara en standarddesign för LPG-transportfartyg, utrustade med tankar byggda för medeltrycksatt CO_2. Fartygen har längden 130 m och kapacitet att frakta 7,500 m^3 LCO_2 som ska vara trycksatt mellan 13-15 bar(g). Fasen är en ren västskefas där ingen förångning får förekomma (ibid.).

En landbaserad mottagningsplats för fartygen ska byggas i ett område kallat Naturgasparken på ön Blomøyna som ligger längs norska kusten en bit norr om Bergen. Figur 2 visar en modell av anläggningen (ibid.).

Figur 2: Modell av landbaserad anläggning för mottagande av fartygstransporterad CO_2 (Lambton 2020)

På mottagningsplatsen förflyttas LCO_2 från fartyget till stationära lagringstankar genom en intern båt-pump med kapacitet att pumpa 800 ton/timme. En returledning mellan de stationära lagringstankarna och båttanken återställer tryck-jämnvikten utan utsläpp. I toppen av lagringstankarna förväntas CO_2 hålla 13-18 bar(g) och korrelerade jämviktstemperatur (Equinor 2019).

Lagringstankarna är designade för 22 bar(g) och en volym som ger en överkapacitet om 22% utifrån lastfartygens lastkapacitet. Denna volym behöver utökas om skepp med större lastkapacitet skulle introduceras i kedjan. De norska företagen beräknas totalt infånga 0,8 Mton CO_2 per år, och slutlagret har kapacitet för 1,5 Mt/år. Det ger en möjlighet för "third party busyness" att leverera 0,7 Mton CO_2 per år (ibid.).

Platsen för slutlagringen finns ungefär 75 km västerut från mottagningsplattformen på Naturkasparken, området kallas Aurora och den geologiska formationen kallas Johansen formationen. Till Aurora kommer CO_2 transporteras med rörledning från den landbaserade anläggningen (ibid.).

Vid slutet av rörledningen, vid injektionsplatsen, finns en anslutande undervattensanläggning där injektion av CO_2 till berggrunden utförs. Undervattensanläggningens reglersystem förses med ström från en närliggande oljeplattform (ibid.).

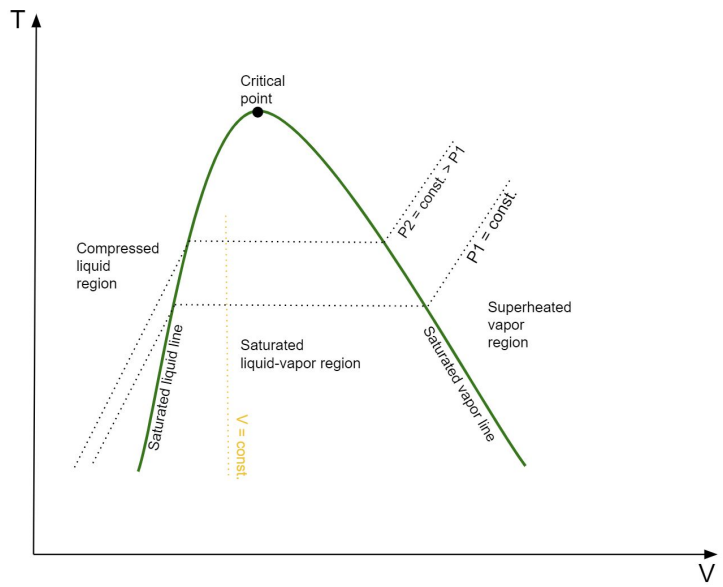
Med antagande om slutlagring av svensk CO_2 enligt Northern-Lights-konceptet fordras

att värdekedjan för bio-CCS från biogasanläggningar utformas för att kunna leverera CO_2 av rätt kvalitet, tryck och tillstånd samt att sluttransporten sker genom ett fartyg av rätt design.

2.2 Termodynamik och fasövergång för rena ämnen

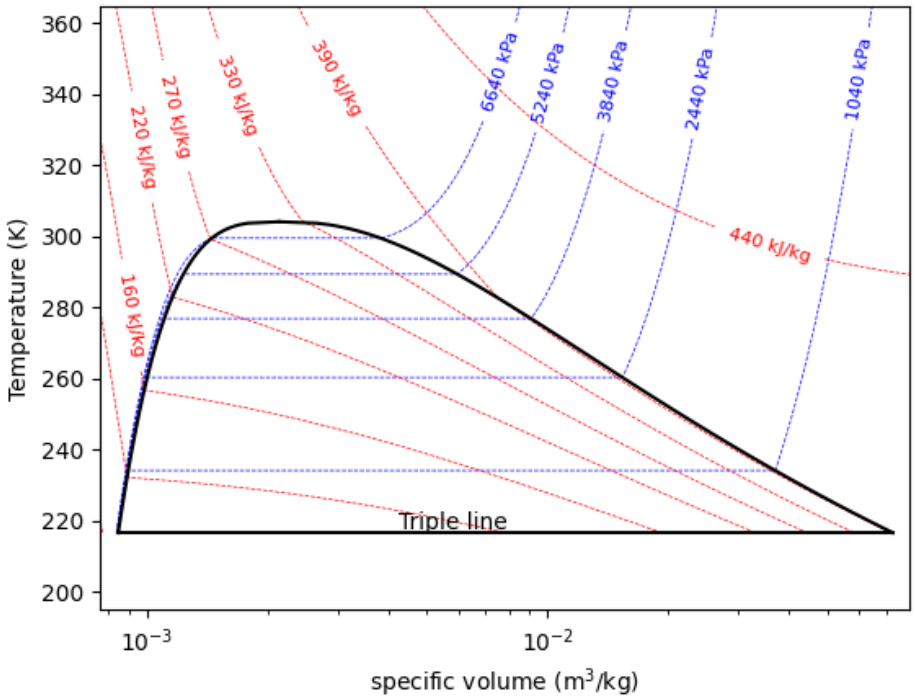
Ett ämne som har en homogen kemisk sammansättning kallas rent ämne. CO_2, kvävgas och vatten är några välkända exempel av rena ämnen (Cengel och Boles 2015). För rena ämnen förekommer 3 grundläggande aggregationsformer; fast, flytande och gasfas. När ett ämne går från en aggregationsform till en annan sker en fasövergång, och fasövergångar är både tryck- och temperaturberoende (Nationalencyklopedin n.d.[a]).

Ett rent ämne som strikt befinner sig i ren vätskefas kallas trycksatt vätska, eller "compressed liquid" som i figur 3. När vätskans temperatur höjs till kokpunkten (för rådande tryck) är det fortfarande en ren vätska, men som vid minsta ytterligare värmetillförsel kommer att delvis förångas. I denna fas kallas vätskan för mättad vätska, eller "saturated liquid", och denna fas uppnås i punkten där den streckade linjen skär "saturated liquid line" i figur 3. Under kokning förångas vätskan. Under denna fasövergång är temperaturen i systemet konstant medan volymen ökar. Först när all vätska har förångats överskrider temperaturen kokpunkstemperaturen. Under förångningsfasen förekommer ämnet både i vätske- och gasfas, därför kallas ämnet under denna fas för mättad blandning. Denna fas illustreras i figur 3 som "saturated liquid-vapor region". Gas som befinner sig precis vid kokpunkten kallas för mättad ånga, eller "saturated vapor", eftersom den kommer kondensera till en vätska vid minsta värmebortfall. Detta tillstånd finns vid punkten där den streckade linjen korsar "saturated vapor line" i figur 3. Vid fortsatt värmetillförsel efter fasen mättad ånga överskrids koktemperaturen och en ny ren ångfas uppstår som kallas överhettad ånga, eller "superheated vapor" (Cengel och Boles 2015).



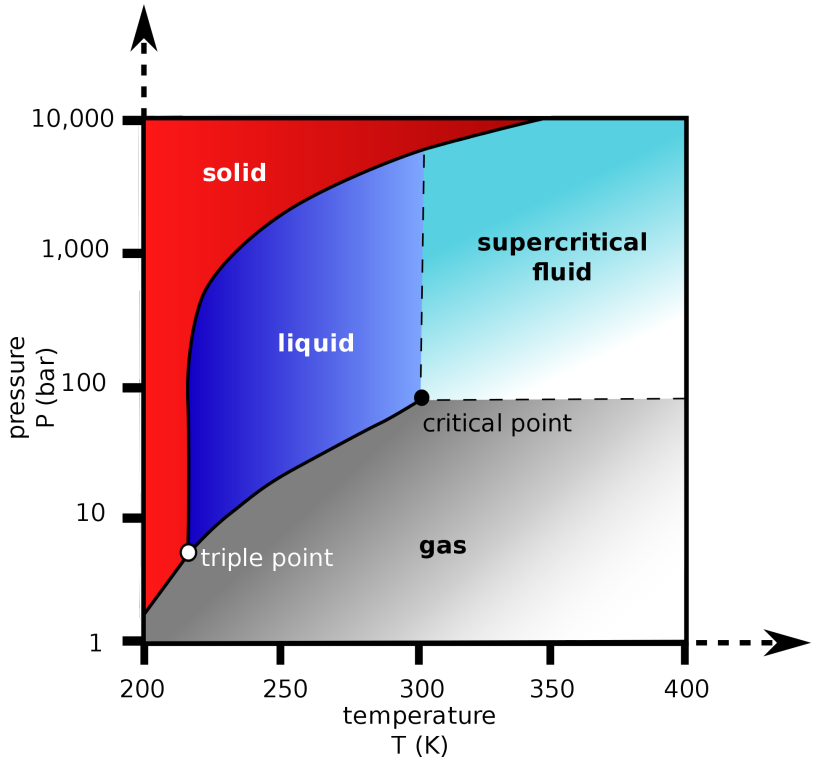
Figur 3: T-v-diagram för rena ämnen där T står för temperatur och V för specifik volym (egen bearbetning baserad på Cengel och Boles 2015)

I fasförändringsdiagrammet i figur 3 illustrerar de svartstreckade linjerna en isobar process eftersom trycket är konstant medan temperatur och volym är variabler. Om det svarta strecket följs åt höger illustreras hur temperatur och volym förändras då en vätska tillförs värme, och om strecket istället följs åt vänster illustreras hur temperatur och volym förändras då en gas kyls. Figuren har skapats utifrån boken ”Thermodynamics - An engineering approach” (Cengel och Boles 2015). Om den specifika volymen istället hålls konstant kommer både temperatur och tryck vara variabler och processen kallas då isokor (ibid.). Denna process har märkts ut i gult i figur 3. Energibalansen för ett slutet system som genomgår en isokor process ($Q = \Delta U$ där Q är tillförd värme och U är systemets inre energi) visar att tillförd värme leder till ökad inre energi (ibid.). En ökad inre energi ger upphov till temperatur- och tryckökning, detta ses i figur 4 som är ett T-v-diagram för CO_2 där både isobarer och konstanta inre energinivåer illustreras. Figur 4 visar att om den inre energin U ökar under konstant volym kommer både temperatur och tryck hos CO_2 att öka.



Figur 4: T-v-diagram för CO_2 (CoolProp 2021)

Om ett rent ämne är i ett tillstånd där två (eller tre) faser förekommer samtidigt och där andelarna av varje fas är konstanta befinner sig ämnet i en fasjämvikt (Cengel och Boles 2015). När *Northern Lights* anger att deras LCO_2 har korresponderande jämviktstemperatur för ett visst tryck avses alltså kokpunktstemperaturen. Figur 5 illustrerar kokpunktstemperaturen för ren CO_2 och olika tryck. Genom att studera diagrammet och avläsa tabellerade värden för CO_2 ses att vid ungefär 15 bar(g) (som är maxtrycket för fartygstransporten till Naturgasparken (Equinor 2019)) är temperaturen ungefär 243 K, eller -30 °C (Wikipedia 2021).



Figur 5: Fasdiagram för CO_2 (Wikipedia 2021)

2.2.1 Förvätskning av CO_2

Figur 5 illustrerar kokpunkten för CO_2 i ren form, men i den verkliga produkten efter förvätskning och rening kommer små mängder föroreningar att förekomma. Dessa föroreningar kommer påverka jämviktstemperaturen. De olika uppgraderingsteknikerna ger olika föroreningshaltig CO_2-produkt, vilket leder till att det är svårt att ange en exakt och generell CO_2-temperatur efter förvätskning. Ett beslut måste också tas om vilket tryck LCO_2 ska komprimeras till. Under fartygstransporten till Naturgasparken i Norge behöver CO_2 hålla 15 bar(g), men marginal behöver tas för värmeinläckage under transporten. Lastbärare för LCO_2 fungerar som en stor termos vars syfte är att bevara produktens tryck och temperatur genom att hindra värme från att läcka in. Om värme läcker in i lastbäraren sker en isokor process eftersom lastbärarens tank håller CO_2-volymen konstant, figur 3 och 4 visar att CO_2-trycket då ökar till följd. Eftersom värmeinläckage under transport leder till tryckökning behöver CO_2-produkten hålla ett lägre tryck från början av distributionskedjan för att inte överskrida 15 bar(g) vid fartygsleveransen.

I projektet ”Bio-CCS från biogasanläggningar” beräknas att CO_2 efter uppgradering

kommer komprimeras till 13 bar(g), och CO_2 kommer då erhålla en temperatur mellan -30 °C och -40 °C beroende på uppgraderingsteknik (Tamm 2021).

2.3 Distribution av CO_2

2.3.1 Säkerhetsrisker vid hantering av CO_2

CO_2 är en färg- och luktlös gas och därför är det svårt att upptäcka en eventuell läcka. CO_2 är tyngre än luft och det innebär att det kan var svårt att vädra ut om det är för höga halter inomhus. Bra cirkulation är därför mycket viktigt för CO_2 lagring inomhus (Air Liquide n.d.).

CO_2 klassas inte som giftigt, men kan ändå vara hälsoskadlig i för höga halter. CO_2 (g) har likt kvävgas egenskapen att det förskjuter syre och har en kvävande effekt (Equinor 2019). I atmosfären förekommer cirka 0,04 volymprocent av CO_2. Den högst tillåtna koncentrationen vid kontinuerligt arbete är 0,5 volymprocent. Om koncentrationen överstiger 2 volymprocent kan andningsbesvär, huvudvärk och yrsel vara symptom som indikerar att det finns en CO_2-läcka. Redan vid koncentrationer som 4-6 volymprocent kan en person förlora medvetandet, och vid koncentrationer större än 10 volymprocent kan koma och död vara utgången (Air Liquide n.d.).

Det finns också köldskaderisker kopplade till hantering av LCO_2. Om LCO_2 läcker ut till omgivningen sjunker trycket till atmosfärstryck och temperaturen sjunker till -78 grader, och CO_2-is bildas (detta ses i figur 5). När CO_2-isen sedan förångas bildas ett mycket kallt ”moln” som kan köldskada både människor och utrustning som kommer i kontakt med molnet (Equinor 2019).

Eftersom all distribution av CO_2 (inom ramarna för det här arbetet) sker utomhus föreslås inga särskilda vidtaganden med hänseende av säkerhet, dock fordras att all person inom transportkedjan har adekvat utbildning.

2.3.2 Transport av farligt gods

LCO_2 klassas som farligt gods och därför finns särskilda bestämmelser för hur paketering och transport med samtliga fordon får utföras (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap n.d.[b]).

ADR-föreskrifterna är en europeisk överenskommelse om transport av farligt gods på väg, ADR-S betecknar att det gäller den svenska upplagan och föreskrifterna gäller såväl nationell trafik som internationell (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap n.d.[c]). Alla personer som på något sätt är delaktiga i transport av farligt

gods måste ha genomgått en ADR-utbildning (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap n.d.[a]), och alla förpackningar som omsluter farligt gods måste vara rätt uppmärkta och hålla rätt standard (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap n.d.[c]). Lastbärare för vägburen transport av LCO_2 måste vara ADR-klassad och uppmärkt med korrekt UN-nummer och övriga nödvändiga skyltar enligt föreskrifterna.

2.3.3 Fordonsbegrepp

I det här avsnittet förklaras några återkommande fordonsbegrepp.

En dragbil är ett motorfordon som är bygd för att kunna dra många olika typer av släpvagnar (trailers). En semitrailer är en typ av släpvagn som saknar hjulaxlar framtill, och därför måste semitrailers stödjas på ett par stödben om de inte är kopplad till en dragbil. En hjulaxel är den axel som förbinder hjulen på vardera sida om fordonet. Figur 6 är ett exempel på en semitrailer med tre hjulaxlar, därför kallas fordonet för en trippelaxlad semitrailer.

Ordet ”lastbärare” är ett samlingsnamn för olika enheter som på något sätt bär gods, men i det här arbetet är alla lastbärare släpfordon och semitrailers men med olika utformning. Den ena lastbärartypen är en specialbyggd semitrailer och denna illustreras i figur 6. En dragbil med en specialbyggd semitrailer är ett ekipage som ofta kallas för tankbil.

Figur 6: Illustration av en specialbyggd semitrailer (Yilmaz 2020)

Den andra lastbärartypen är en mobil container, en container monterad på ett semitrailer-containerchassi, se figur 7. Ett semitrailer-containerchassi är en släpvagn med hjulaxelkonfiguration av en semitrailer som är avsedd för att frakta containrar.

Figur 7: Illustration av en kryogen container monterad på ett semitrailer-containerchassi (Yilmaz 2020)

I den här studien undersöks bland annat ett distributionssystem där ovan nämnda lastbärare kommer användas som mobila lager. För att differentiera mellan när fordonet används som ett lager och när det används som en transportör kommer olika ord att användas. Vidare i den här rapporten kommer ordet lastbärare att syfta till alla typer av lastfordon som genomför ett transportarbete. Vid de fall då fordonet används som ett lager kommer begreppet mobila lager att användas.

Containrar förekommer ofta i ISO-standardiserade storlekar. Två vanliga standardstorlekar är 20- och 40-fot.

Betydelsen av ordet kryogen är enligt *Nationalencyklopedin* ”som alstrar mycket låga temperaturer” (Nationalencyklopedin n.d.[b]). En kryogen container är alltså en container byggd för att frakta medium av mycket låga temperaturer.

2.3.4 Krav om mått, vikt och axeltryck vid lastbilstransport

Enligt Transportstyrelsen får lastbilar maximalt ha en bredd om 2,6 m och längd om 24 m (eller 25.25 m, beroende på konfiguration) (Transportstyrelsen 2018).

Hur stor totalvikt ett visst ekipage får ha bestäms av förutsättningar på de vägar ekipaget ska framföras på, det bestäms av hur mycket belastning de specifika vägarna tål. Svenska vägnätet är indelat i 4 olika bärighetsklasser; BK1-4. Den maximala vikt som en väg av respektive bärighetsklass tål presenteras i tabell 1 (ibid.).

Tabell 1: Bärighetsklasser för det svenska vägnätet

Bärighetsklass	**Maximal tillåten bruttovikt**
BK1	64 ton eller lägre
BK2	51.4 ton eller lägre
BK3	37.5 ton eller lägre
BK4	74 ton eller lägre

Trafikverkets kartverktyg ”NVDB” visar att BK4-vägar inte finns utbrett över hela landet. Däremot verkar BK1-klassade vägar vara standard för landsvägar över hela Sverige. Bärighetsklasserna med lägre maxvikter, BK2-3, utgör endast vissa vägsträckor inom tätortsområden och bedöms inte vara begränsande eftersom alternativa BK1-vägar generellt finns (Trafikverket n.d.). Eftersom det här arbetet görs i generella termer (arbetet utgår inte från en specifik plats) sattes BK1 som begränsning för transportsimuleringarna.

Den maximala belastning som en väg tål beror av vägens förutsättningar. Den belastning som ett fordon påverkar vägen med beror av fordonets utformning genom fordonets axelavstånd (från första till sista axel på hela fordontåget) och dess axeltryck. Axeltrycket beror av axeltyp (singel, boggie, trippel) och på hur lasten är placerad. Genom att studera kommersiella transportlösningar för transport av LCO_2 från olika företag (*Karbonsan, ASCO, Cryolor*), och olika containerchassin för containrar konstateras att trippelaxlade semitrailers med ca 2,6 m mellan första och tredje axel är en standardlösning. Genom att studera vanligt förekommande dragbilar (exempelvis Volvo FM 64T LA2) konstaterades att en trippelaxlad dragbil kan ha avståndet 4,7 m eller större mellan första och tredje axel (Volvo Lastvagnar n.d.). En trippelaxlad dragbil med avståndet 4,7 m eller större mellan första och tredje axel får maximalt väga 26 ton. En trippelaxlad semitrailer med 2,6 m mellan första och tredje axel får maximalt väga 24 ton (Transportstyrelsen 2018).

Utifrån Transportstyrelsens axeltryckstabeller och antagandet om ovanstående axelkonfigurationer hos dragbil och lastbärare konstateras följande. En lastad dragbil får som mest väga 26 ton och semitrailerns trippelaxel får som mest väga 24 ton och detta ger en maximalt tillåten totalvikt om 50 ton. Således är slutsatsen att en standardlösning för LCO_2-transport på BK1-vägar endast fungerar för en total ekipagevikt upp till 50 ton. För ekipage med totalvikt mellan 51-64 ton behövs en lastbärare med fler än 3 axlar och för detta krävs en specialdesignad lösning då inga kommersiella 4-axlade lastbärare för LCO_2 har anträffats efter sökande.

Som tidigare nämnt finns även regler kring maximal total bruttovikt baserat på avståndet mellan första och sista hjulaxel för hela fordonståget. Transportstyrelsen

tillhandahåller bruttoviktstabeller för samtliga möjliga avstånd, och genom tabellerna går det att utläsa vilket minsta avstånd som skulle krävas för olika bruttovikter. Tabell 2 presenterar det minsta avstånd som krävs för några utvalda bruttovikter på BK1-vägar.

Tabell 2: Minsta tillåtna avstånd mellan första och sista hjulaxel för ett helt fordonståg och BK1 (Transportstyrelsen 2018)

Bruttovikt [ton]	**Avstånd [m]**
44	11.0
49	12.5
63	19.6

För att få framföra ett fordonståg måste både axeltryck och axelavstånd mellan första och sista axel vara godkända så väl som att totalvikten inte får överskrida den maximalt tillåtna bruttovikten för rådande bärighetsklass.

2.3.5 Kör- och vilotider

Inom EU gäller gemensamma regler för kör- och vilotider för lastbilar tyngre än 3,5 ton. Genom en förordning fastställs den längsta dagliga körtiden, körtid per vecka, tvåveckorskörtid och minsta period för dygns- och veckovila (Transportstyrelsen n.d.[b]). Eftersom det inte ingår i studien att ta fram hur många lastbilsförare som involveras är bestämmelser om dygns-och veckovila inte relevant för simuleringarna. Däremot är bestämmelser om längsta körtid per dag relevant eftersom det bestämmer hur långa arbetsskiften blir.

Maximal körtid under en dag är 9 timmar, och med körtid avses arbetstid vilket involverar ställtid då föraren arbetar utan att köra. Den dagliga körtiden får överskridas till 10 timmar två gånger per kalendervecka. Den högsta sammanhängande körperioden utan rast får vara 4,5 timmar, därefter måste en rast tas på minst 45 minuter. Vid de fall där en förare ska arbeta i 10 h erfordras således ytterligare en rast om minst 45 minuter (Transportstyrelsen n.d.[a]).

I simuleringarna för det här arbetet görs ett antagande att alla förare har möjlighet att ta rast efter 4,5 körtimmar så att de kan arbeta i 9 timmar per dag med endast en rast. Det innebär att ett dubbelskift i upptar 19,5 timmar av dygnet men motsvarar 18 arbetstimmar.

2.3.6 Regler vid anläggning av gasledning

För att anlägga en rörledning för transport av CO_2 krävs koncession, tillståndsansökan görs hos Energimarknadsinspektionen. Koncession är dock inte nödvändigt om ledningen är mindre än 20km eller om ledningen uteslutande ska nyttjas på hamn- eller industriområde (Energimarknadsinspektionen n.d.). Om koncession inte är nödvändigt är det miljöprövningsdelegationen eller mark- och miljödomstolen som prövar ärendet. Även den berörda kommunen måste kontaktas för detaljplaner och lantmäteriet för att pröva ledningsrätten (Johnsson och Kjärstad 2019; Lantmäteriet n.d.).

För explosiva och brandfarliga gaser finns särskilda föreskrifter gällande avstånd och grävdjup som begränsar var en sådan ledning kan byggas. Det är Sprängämnesinspektionens föreskrifter (SÄIFS) som reglerar hur exempelvis energigasledningar kan utformas. Då CO_2 vare sig är brandfarligt eller explosivt omfattas gasen inte av SÄFIS, och inga andra föreskrifter gällande exempelvis grävdjup har funnits. Följaktligen borde det vara mindre komplicerat att anlägga en CO_2-gasledning än en energigasledning, men framöver borde det utredas vidare om det finns några legala hinder och hur lång tid det skulle ta från första ansökan till byggstart.

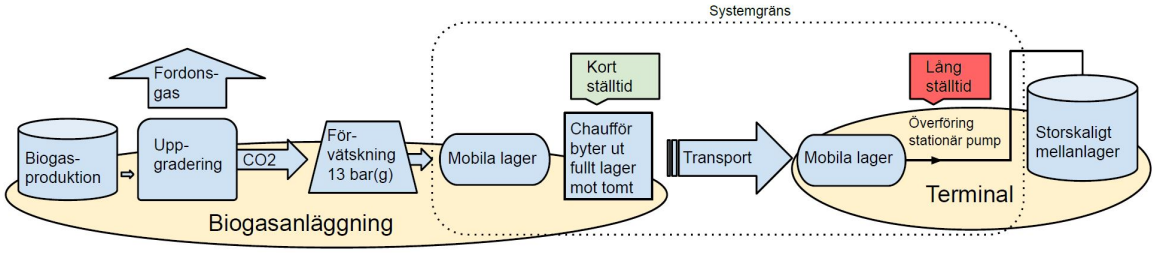
3 Beskrivning av möjliga distributionslösningar

De transportsätt som undersöks är spår-, väg- och rörledningstransport. För lastbilstransport undersöks tre olika lastbärare samt två olika alternativ för korttidslagring; mobila- och stationära lager.

3.1 Distributionssystem med lastbilstransport

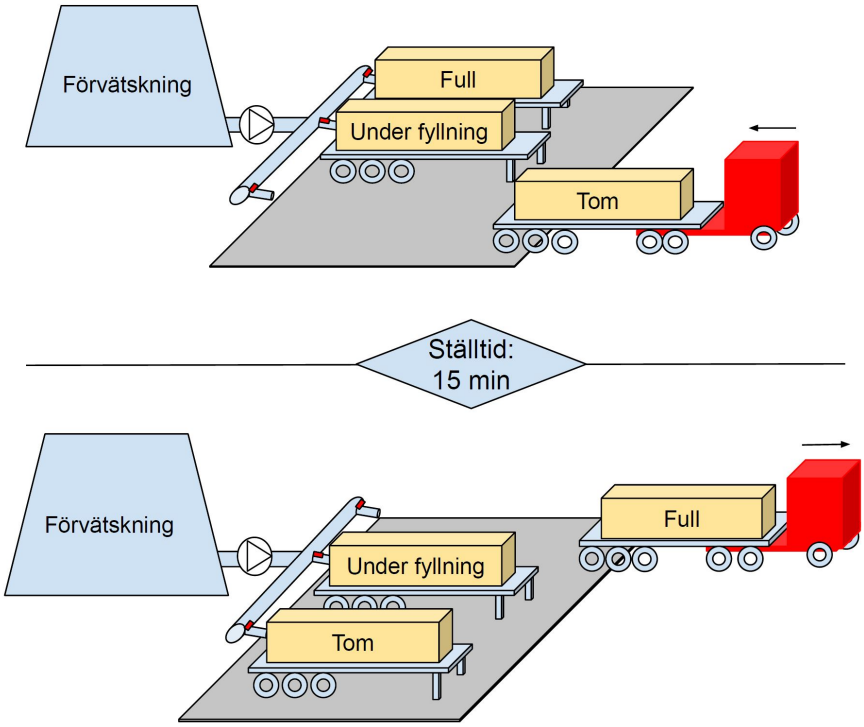
3.1.1 Systembeskrivning av distribution med mobila lager

Figur 8 är ett blockschema för ett system med mobila lager. Efter uppgraderingen följer en förvätskningsprocess genom komprimering och kylning. Den förvätskade produkten kommer transporteras till de mobila lagren genom pumpning (Tamm 2021).



Figur 8: Blockschema för distributionssystem med mobila lager

Fyllningen av de mobila lagren sker genom en röranslutning med kapacitet att ansluta tre lager samtidigt. Vid alla tillfällen kommer det finnas två mobila lager inkopplade, ett som fylls och ett som är ”stand-by” till dess att det första lagret är fullt. När ett mobilt lager fyllts är det dags att byta ut lagret mot ett tomt. En dragbil bär med sig ett tom mobilt lager som kopplas på den tredje röranslutningsplatsen och möjliggör att dragbilen då kan koppla på det fulla lagret och köra mot terminalen. Tidsåtgången för lagerutbytet uppskattas till 15 minuter. Systemet för fyllning av mobila lager bör utrustas med automatiskt reglerande ventiler så att byte av container för fyllning självregleras och hela fyllnadsgraden av containern kan utnyttjas. Containerbytesprocessen illustreras i figur 9.



Figur 9: Illustration av containerbytesprocess

De mobila lagren kan stå utomhus på ett plant och robust underlag och i det här arbetet utgås från en gjuten betongplatta som uppställningsplats på biogasanläggningarna. Röranslutningen mellan förvätskningsprocessen och de mobila lagren samt betongplattan är de enda fasta installationerna (kopplat till distributionen) som skulle krävas på biogasanläggningarna.

Efter lagerutbytet transporteras det fulla lagret till en terminal för mellanlagring, och olika system för tömning på terminalen har övervägts. Det ena alternativet är att chauffören själv tömmer lagret med pump vilket skulle leda till en längre ställtid, och det andra alternativet är att chauffören lämnar det fulla lagret och kopplar på ett tomt mobilt lager och kör vidare. Detta skulle korta chaufförens ställtid men skulle istället kräva arbetstid av annan personal på terminalen. Det är ännu inte känt om terminalen alltid kommer vara bemannad och om personalen alltid kommer ha tid och möjlighet att tömma de mobila lagren utefter som de inkommer. Dessutom skulle detta system kräva fler mobila lager i omlopp vilket ökar investeringskostnaderna. Således landade resonemanget i att beräkningarna bör baseras på att chauffören själv tömmer det mobila lagret på terminalen för att sedan arbeta vidare med samma mobila

lager. Detta innebär en längre ställtid på terminalen än på biogasanläggningarna. Tiden för att koppla i och ur lagren för tömning vid terminalen antas fortsatt vara 15 minuter, och den totala ställtiden ges av tillägget i pumptid. Pumptiden bestäms av pumpkapaciteten och det mobila lagrets storlek. I simuleringarna ingår olika pumpkapaciteter som en parameter, och olika storlekar på mobila lager har undersökts genom olika scenarion.

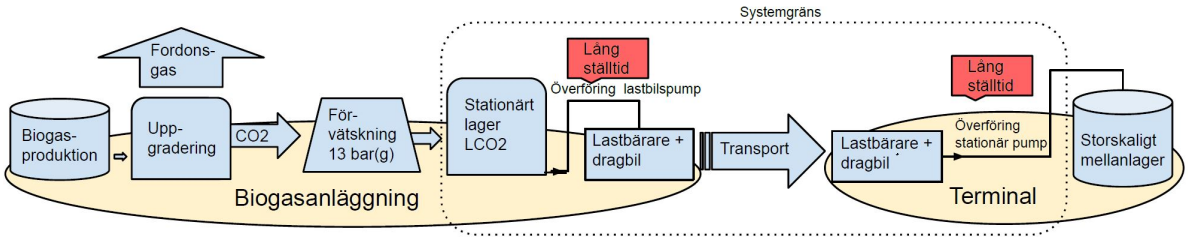
Det totala behovet av mobila lager är två per biogasanläggning plus ett per arbetande dragbil. Behovet av antal parallellt arbetande dragbilar beror av tidsåtgången för containerbyteslogistiken för hela systemet av biogasanläggningar. Tidsåtgången beror i sin tur på antalet anläggningar i systemet, dess avstånd från terminalen och tömningsfrekvensen. Tömningsfrekvensen beror av biogasanläggningens produktionsstorlek genom dess årliga CO_2-produktion. En chaufför får arbeta i nio timmar per dag vilket medför att en uppsättning dragbil och lastbärare kan användas i 18 timmar per dag vid 2-skift. Om tömningsarbetet tar mer än 18 timmar per dag behövs två parallellt arbetande dragbilar och således två extra uppsättningar mobila lager, och så vidare.

Två varianter av mobila lager har undersökts: kryogena tank-containrar monterade på ett semitrailer-containerchassi (se figur 7) och specialbyggd semitrailer (se figur 6).

Container-lastbäraren är ingen färdig mobil lösning utan containern och semitrailer-containerchassit köps separat, och montering av container på containerchassit är ett arbete som måste utföras i Sverige eller i landet för containerleverantören. Tre olika storlekar på containrar har undersökts, 20-fot, 30-fot och 40-fot. Som figur 6 visar är den specialbyggda semitrailern en färdig mobil lösning. Endast en storlek av specialbyggd semitrailer har undersökts.

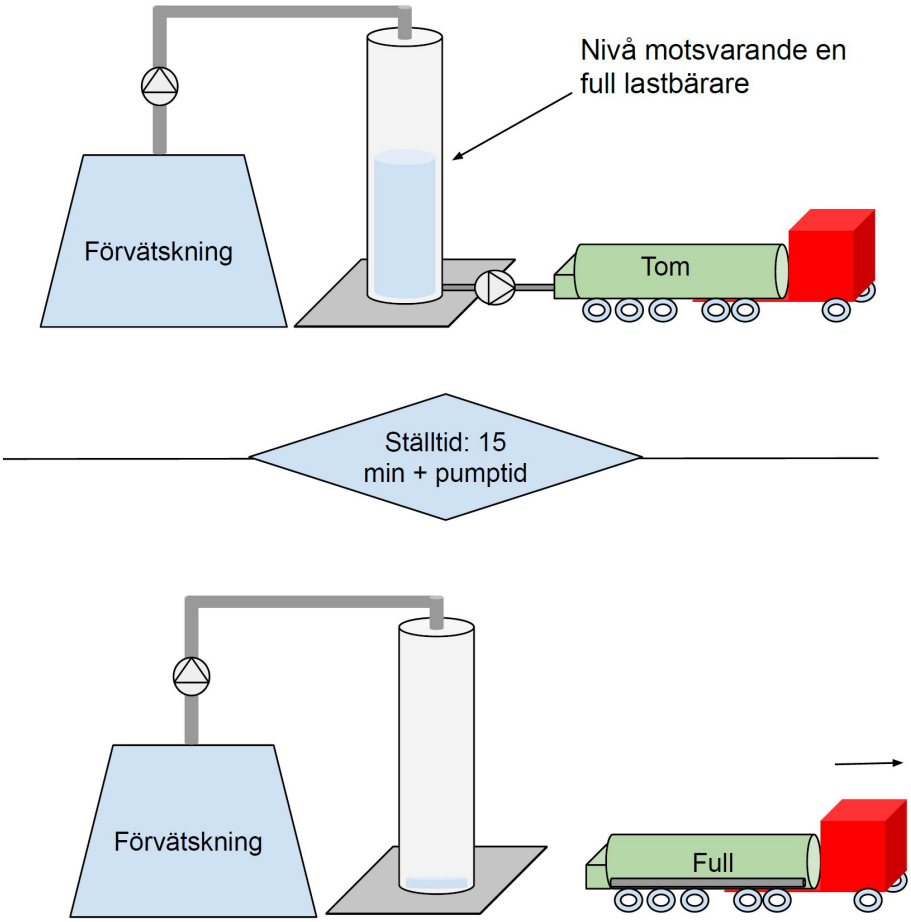
3.1.2 Systembeskrivning av distribution med stationära lager

Figur 10 är ett blockschema som illustrerar distributionslösningen med lastbilstransport och stationära lager. Efter förvätskningsprocessen leds LCO_2 genom rörledning till ett stationärt lager, en stående kryogen lagringstank. Det stationära lagret kan också utgöras av flera parallellkopplade lagringstankar. Lagringstanken kan stå utomhus på en gjuten platta. De fasta installationerna som krävs på biogasanläggningen är således en betongplatta samt uppställning och installation av det stationära lagret. En pump krävs för att fylla det stationära lagret, men den har förlagts utanför systemgränsen för denna studie.



Figur 10: Blockschema för distributionslösning med lastbilstransport och stationära lager

När lagringstanken är fylld till den grad att en lastbärare kan fyllas är det lämpligt att tömma den stationära tanken. LCO_2 överförs från det stationära lagret till lastbäraren via slang och pump och simuleringarna ämnar undersöka om denna pump ska vara stationär på biogasanläggningarna eller mobilt installerad på lastbäraren. Att chauffören behöver vänta medan lastbäraren fylls genererar en lång ställtid på biogasanläggningen jämfört mot scenariot med mobila lager. Ställtiden beror av pumpkapaciteten och simuleringarna ämnar undersöka vilken pumpkapacitet som är mest fördelaktig. När lastbäraren fyllts transporteras CO_2 till terminalen där chauffören behöver tömma lastbäraren med en stationär pump. Tömningsprocessen av stationära lager på biogasanläggningen illustreras i figur 11.



Figur 11: Illustration av tömningsprocess av stationära lager

Behovet av lastbärare är en per arbetande dragbil, och behovet av arbetande dragbilar följer samma resonemang som i avsnitt 3.1.1. Däremot kan behovet av stationära lager per biogasanläggning variera. Vid installation av stationära lager finns möjlighet att installera två eller fler parallella lager för att öka överkapaciteten. Om överkapaciteten i lager är större minskar behovet av tömning ”just-in-time”. I ett system av biogasanläggningar med olika storlek kommer anläggningarnas varierande CO_2-produktion medföra att de har olika stort behov av tömning. Medan vissa anläggningar behöver tömmas dagligen kan andra tömmas med flera dagars mellanrum. Det innebär att tömningsbehovet av hela systemet varierar på daglig basis. Det finns en risk att den dagliga tömningsvariationen gör att behovet av parallellt arbetande dragbilar är större under enskilda dagar. En större överkapacitet skapar en större flexibilitet i tömningslogistiken, och det är möjligt att detta skulle kunna medföra att vissa tömningar kan

senareläggas. Detta skulle, i bio-CCS-system med ett stort varierande tömningsbehov på daglig basis, kunna leda till ett mindre behov av antal parallellt arbetande dragbilar. I ett transportsystem för flytande biogas (LBG) med en årsproduktion av cirka 7300 ton LBG/år (liknande skala som det här arbetet) har Tekniska Verken i Linköping installerat stationär lagring med en överkapacitet som motsvarar 2-3 dagar (Nordell 2020). Därför sattes 2 dagars överkapacitet som en utgångspunkt vid dimensionering av lagringskapacitet, men simuleringarna ämnar att vidare undersöka en lämplig lagringskapacitet för respektive produktionsstorlek hos biogasanläggningarna.

Två olika lastbärare har undersökts i distributionssystemet med stationära lager: den specialbyggda semitrailern (figur 6) och den mobila 30-fots containern som i detta fall endast agerar lastbärare eftersom stationär lagring används (figur 7). Vid simuleringarna av den sistnämnda lastbäraren baseras nyckeltalen på data för 30-fots container monterad på semitrailer-containerchassi, men scenariot kan ses som en specialdesignad lösning för att maximera lastkapaciteten och skulle alltså lika gärna kunna vara en specialdesignad specialbyggd semitrailer med samma lastkapacitet.

3.1.3 Beskrivning av lastbärare

I det här avsnittet presenteras de undersökta lastbärarnas dimensioner och en analys görs om de klarar begränsningarna för BK1 eller om de kan klara begränsningarna efter modifikationer.

Tabell 3 anger dimensioner och vikter 20-fots container som lastbärare.

Tabell 3: Dimensioner och vikter för 20-fots container som lastbärare

	Nyckeltal	**Källa**
20-fots container		
Lastvolym	21 m^3	(Yilmaz 2020)
Lastkapacitet (95% fyllnadsgrad och densitet 1.1 ton/m^3)	22 ton	
Chassivikt (tomvikt)	8.7 ton	(Yilmaz 2020)
Semitrailer-containerchassi		
Tjänstevikt	5.2 ton	(Biluppgifter n.d.)
Längd	12.5 m	(Biluppgifter n.d.)
Dragbil		
Tjänstevikt	8.7 ton	(Volvo Lastvagnar n.d.)
Hela ekipaget		
Totalvikt	45 ton	
Total tomvikt	23 ton	
Avstånd mellan första och sista axel	>12.5 m	

Vid fullast adderas vikterna till en total ekipagevikt om 45 ton. Detta är en godkänd vikt för BK1 förutsatt att avståndet mellan första och sista axel är större än 11 m (enligt tabell 1 och 2) och förutsatt att containern placeras på semitrailern på ett sådant sätt att maximalt axeltryck inte överskrids på någon axel. Detta antas möjligt vid totalvikt mindre än 50 ton enligt resonemang i avsnitt 2.3.4. Ett exakt avstånd mellan första och sista axel på hela ekipaget är svårt att utläsa då utförliga mått på den studerade semitrailern saknas. Eftersom semitrailerns totala längd är 12.5 m inses att avståndet mellan första och sista axel är större än 12.5 m vilket är ett godkänt avstånd enligt tabell 2.

Om en 40-fots container skulle användas som lastbärare uppnås den maximala ekipagevikten om 64 ton, och då måste avståndet mellan första och sista axel vara större än 19,6 m (se tabell 2). Med det studerade containerchassit om 12,5 m fås insikten att det behöver förlängas. Det studerade containerchassit har samma axelkonfiguration som beskrivs i avsnitt 2.3.4, och därför kan inte heller ett godkänt axeltryck på båda axlarna uppfyllas. Slutsatsen är att semitrailer-containerchassit för ett ekipage om 64 ton behöver ytterligare en hjulaxel och förlängning. Ett specialbyggt semitrailer-containerchassi med fyra axlar och förlängning kommer att väga mer och därför gjordes en viktuppskattning där drygt två ton lades på orginalvikten för det standardiserade containerchassit, se tabell 4

Tabell 4: Dimensioner och vikter för 40-fots container som lastbärare

	Nyckeltal	**Källa**
40-fots container		
Lastvolym	44 m^3	(Yilmaz 2020)
Lastkapacitet (95% fyllnadsgrad och densitet 1.1 ton/m^3)	46 ton	
Chassivikt (tomvikt)	17 ton	(Yilmaz 2020)
Semitrailer-containerchassi		
Tjänstevikt	7.5 ton	
Dragbil		
Tjänstevikt	8.7 ton	(Volvo Lastvagnar n.d.)
Hela ekipaget		
Totalvikt	79 ton	
Total tomvikt	33 ton	

Karbonsans 40-fots container är egentligen avsedd för LNG som har en lägre densitet än LCO_2, men en kontaktperson från Karbonsan (Yilmaz 2020) menar att den lika väl skulle kunna användas för LCO_2. Med densiteten 1,1 ton/m^3 fås dock en för tung last. I tabell 4 ses att ekipaget vid fullast skulle väga runt 79 ton vilket markant överskrider maxvikten om 64 ton för BK1. Att inte använda hela fyllnadsgraden hade kunnat minska totalvikten, men efter diskussion under ett projektmöte framhölls att detta istället medför problem med ”skvalpning”. Därför förkastas 40-fots container som möjlig lastbärare.

Genom att jämföra totalvikten för en 20- och 40-fots container inses att en 30-fots container skulle kunna vara en lastbärare som maximerar lastkapaciteten utifrån BK1. Karbonsan tillverkar inte 30-fots containrar för LCO_2, och efter sökande påträffades ingen annan tillverkare heller. Därför gjordes antagandet att en 30-fots container måste specialbeställas, och dess mått uppskattades genom linjärapproximering mellan en 20- och 40-fots container (linjärapproximering av dimensioner från tabell 3 och 4). Resultatet ses i tabell 5.

Vidare konstateras det likt resonemanget ovan att det behövs en extra hjulaxel och en förlängning av semitrailer-containerchassit. För detta har ett vikttillägg om drygt två ton tilltagits, se tabell 5.

Tabell 5: Dimensioner och vikter för 30-fots container som lastbärare

	Nyckeltal	**Källa**
30-fots container		
Lastvolym	32.5 m^3	(Yilmaz 2020)
Lastkapacitet (95% fyllnadsgrad och densitet 1.1 ton/m^3)	34 ton	
Chassivikt (tomvikt)	13 ton	(Yilmaz 2020)
Semitrailer-containerchassi		
Tjänstevikt	7.5 ton	
Dragbil		
Tjänstevikt	8.7 ton	(Volvo Lastvagnar n.d.)
Hela ekipaget		
Totalvikt	63 ton	
Total tomvikt	29 ton	

Med de linjärapproximerade containerdimensionerna och korresponderande last- och chassivikt och den uppskattade semitrailer-chassi-tjänstevikten fås en totalvikt kring 63 ton enligt tabell 5. Det är en totalvikt närliggande den maximalt tillåtna på BK1 och det är bra att det finns ett ton i marginal eftersom det finns en osäkerhet i viktuppskattningarna.

En prisuppskattning behöver också göras för en specialdesignad 30-fots container. Eftersom det inte finns en kommersiell standardlösning tillkommer en kostnad för att ta fram specialdesignen utöver materialkostnader. Priset för en 30-fots container ansattes till samma kostnad som en 40-fots container. Ett kostnadstillägg görs också för ett specialdesignat semitrailer-containerchassi, drygt 100 000 SEK adderades till kostnaden för det standardiserade containerchassit från AG trailer. Kostnaderna presenteras tillsammans med alla övriga kostnader i följande avsnitt i tabell 8.

Den specialbyggda semitrailern är en färdig mobil lösning, men om den ska användas som mobilt lager behövs dess stödben förstärkas. Efter samtal med en kontaktperson från Karbonsan fås informationen att deras specialbyggda semitrailer inte är byggd för att bära full last utan att vara kopplad på en dragbil, lastbärarens stödben är inte dimensionera de för att klara maxvikten (Yilmaz 2020).

Dimensioner och vikter för den specialbyggda semitrailern presenteras i tabell 6

Tabell 6: Dimensioner och vikter för specialbyggd semitrailer som lastbärare

	Nyckeltal	**Källa**
Specialbyggd semitrailer		
Lastvolym	27 m^3	(Yilmaz 2020)
Lastkapacitet (95% fyllnadsgrad och densitet 1.1 ton/m^3)	28 ton	
Tjänstevikt	12 ton	(Yilmaz 2020)
Dragbil		
Tjänstevikt	8.7 ton	(Volvo Lastvagnar n.d.)
Hela ekipaget		
Totalvikt	49 ton	
Total tomvikt	21 ton	
Avstånd mellan första och sista axel	13.5 m	

Med en totalvikt på cirka 49 ton och 13,5 m mellan första och sista axel är kraven för att framföra fordonsekipaget på BK1-vägar godkänt enligt bestämmelser om axeltryck och avstånd (se avsnitt 2.3.4 och tabell 2). Förstärkning av stödbenen kommer medföra en något högre chassivikt för lastbäraren men detta har inte tagits med i beräkningarna. Eftersom det finns ett ton i marginal innan en totalvikt om 50 ton uppnås görs bedömningen att det inte är någon risk att det maximalt tillåtna axeltrycket överskrids.

3.1.4 Distributionsscenarion

Genom att kombinera de olika lastbärarna och lagringslösningarna kan olika distributionsscenarion tas fram. Tabell 7 presenterar de scenarion som simuleras i beräkningsmodellen.

Tabell 7: Distributionsscenarion för vägburen transport

	Distributionsscenario
1	Mobila lager genom 20-fots container
2	Mobila lager genom 30-fots container
3	Mobila lager genom specialbyggd semitrailer
4	Stationära lager och specialbyggd semitrailer som lastbärare
5	Stationära lager och 30-fots container som lastbärare

Många nyckeltal är gemensamma för samma lagringslösning medan andra nyckeltal är gemensamma för samma lastbärare. För att undvika upprepning presenteras alla de

resterande nyckeltalen för alla distributionsscenarion i två gemensamma tabeller, en med kostnader och en med övriga nyckeltal, se tabell 8 och 9.

Vid samtliga distributionsscenarion ingår kostnader för all utrustning och infrastruktur utom dragbilen. Dragbil och chaufför erhålls av åkeriföretaget som står för transporterna, och kostnaden för dessa är hopslagna i de två nyckeltalen ”Kostnad dragbil” och ”Chaufförkostnad ställtid” i tabell 8. Kostnaden för dragbil varierar med fordonstågets bruttovikt eftersom bränsleförbrukningen är viktberoende. Revisions- och underhållskostnaden gäller endast lastbärarna, alla omkostnader kopplade till dragbilen är inbakad i nyckeltalet ”Kostnad dragbil”.

Tabell 8: Investerings- och trafikeringskostnader för samtliga distributionsscenarion med vägburen transport

	Nyckeltal	**Källa**
Investeringskostnader		
20-fots container (exk. pump)	692 240* SEK/st	(Yilmaz 2020)
30-fots container (exk. pump)	1 180 880* SEK/st	
Specialbyggd semitrailer (exk. pump)	671 880* SEK/st	(Yilmaz 2020)
Stationära lager	509 000* SEK/st	(Yilmaz 2020)
Inst. av container på trailer-chassi	10 000 SEK/st	
Förstärkning stödben semitrailer [2]	50 000 SEK/fordon	
Transport av lastbärare till Sverige	81 440* SEK/st	(Yilmaz 2020)
Transport av stationära lager till Sverige	122 160* SEK/st	(Yilmaz 2020)
Installation stationära lager	101 800* SEK/st	(Karlsson 2020)
Trailer-chassi för 20-fots container	240 000 SEK/st	(AG Trailer 2020)
Trailer-chassi för 30-fots container	360 000 SEK/st	
Betongplatta för 20-fots container	200 000 SEK/st	
Betongplatta för 30-fots container	260 000 SEK/st	
Betongplatta för specialbyggd semitrailer	340 000 SEK/st	
Betongplatta för stationära lager	24 000 SEK/lager	
Pump1 [1]	40 720* SEK/st	(Yilmaz 2020)
Pump2 [1]	83 476* SEK/st	(Yilmaz 2020)
Stat. installation av 2 st Pump2	1 000 000 SEK	
Mobil installation av 2 st Pump2	500 000 SEK	
Oförutsedda utgifter	20 % av tot. invest. kost.	
Kalkylränta	8 %	
Ekonomisk livslängd	10 år	
Växelkurs EUR -> SEK	10.18	
Trafikeringskostnader		
Kostnad dragbil med 20-fots container	19 SEK/km	(Nilsson 2020)
Kostnad dragbil med 30-fots container	21 SEK/km	(Nilsson 2020)
Kostnad dragbil med specialbyggd semitrailer	20 SEK/km	(Nilsson 2020)
Chaufförkostnad ställtid	650 SEK/h	(Nilsson 2020)
Underhållskostnad	0.45 SEK/mil	(Persson 2020)
Revision	25 000 SEK/år och fordon	(Persson 2020)

[1] Gäller endast scenarion med stationära lager.
[2] Gäller endast då specialbyggd semitrailer används som mobilt lager.
(*) Anger att nyckeltalet ursprungligen gavs i Euro.

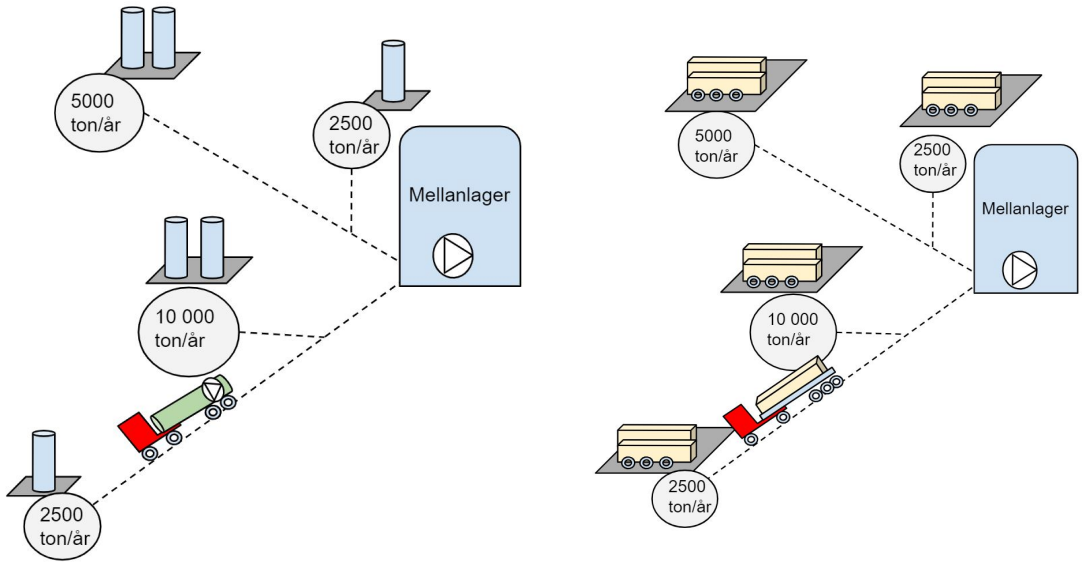
Tabell 9 presenterar alla övriga nyckeltal som används i beräkningsmodellen.

Tabell 9: Övriga nyckeltal för samtliga vägburna distributionslösningar

	Nyckeltal	**Källa**
Stationära lager		
Volym	50 m^3	(Yilmaz 2020)
Lagringskapacitet (95% fyllnadsgrad och densitet 1.1 ton/m^3)	52 ton	
Energianvändning		
Energiinnehåll diesel MK1	9.8 kWh/L	(Drivkraft Sverige 2019)
Bränsleförbrukning med 20-fots container	0.31 L/km	Se bilaga 8.2
Bränsleförbrukning med 30-fots container	0.38 L/km	Se bilaga 8.2
Bränsleförbrukning med specialbyggd semitrailer	0.35 L/km	Se bilaga 8.2
Pumpkapacitet		
Pump 1	21 m^3/h	(Yilmaz 2020)
Pump 2	34 m^3/h	(Yilmaz 2020)
Ställtid		
Ställtid biogasanläggning om mobila lager	15 min	
Ställtid biogasanläggning om station lager	pumptid + 15 min	
Ställtid mellanlager vid samtliga scenarion	pumptid + 15 min	

För att sammanfatta hur distributionskostnaden och energianvändningen beror av både lastbärartyp och lagringslösning, och således av distributionsscenario, görs en separat analys av dessa två faktorer.

Skillnaden i investeringskostnad mellan system med stationära och mobila lager är att de olika lösningarna ger olika uppsättning infrastruktur på varje biogasanläggning, detta illustreras i figur 12. Figur 12 visar ett exemplifierat system av fyra biogasanläggningar med olika CO_2-produktionsstorlekar och på olika avstånd från terminalen.



(a) Stationära lager

(b) Mobila lager

Figur 12: Illustration av infrastrukturbehov vid distributionslösning med stationära och mobila lager

Figur 12a visar att vid lagringslösning med stationära lager kan en biogasanläggning ha ett eller flera parallellkopplade stationära lager, medan biogasanläggningarna i systemet med mobila lager (figur 12b) alltid är utrustade med två mobila lager per anläggning. Systemet med stationära lager medför också en extra pump för fyllning av lastbärare. Eftersom stationära och mobila lager har olika kostnader, och eftersom de olika lagringslösningarna medför olika antal lager och pumpar är det intuitivt att lagringslösningen påverkar investeringskostnaden, men lagringslösningen påverkar även trafikeringskostnaderna. Underhållskostnaden beror delvis på antal rullande fordon genom revisionskostnader. I exemplet i figur 12 har systemet med stationära lager bara en lastbärare, medan det i systemet med mobila lager finns nio stycken. Eftersom de fulla mobila lagren på biogasanläggningarna alltid byts ut mot den tomma lastbäraren kommer det alltid att finnas en rotation på vilka mobila lager som agerar lastbärare. Eftersom alla mobila lager används som lastbärare ges en högre revisionskostnad i scenarion med mobila lager. Lagringslösningen påverkar också ställtiden och således trafikeringskostnaden. Distribution med stationära lager medför en längre ställtid motsvarande pumptiden för fyllning av lastbäraren och hypotesen är därför att mobila lager genom kortare ställtid kommer få en lägre trafikeringskostnad.

De olika lastbärarna påverkar totala investeringskostnaden genom att fordonen har olika investeringskostnad. I fallen då containrar används som lastbärare tillkommer även en kostnad för semitrailer-containerchassi och montage av containern på chassit.

Lastbärarna ger också olika trafikeringskostnader och energianvändningar tack vare olika lastkapacitet och därav olika total ekipagevikt. Lastbärarna med lägre lastkapacitet medför fler tömningar/containerbyten per år vilket ökar den årliga körda distansen. En högre årliga kördistans ger högre trafikeringskostnad och energianvändning. Lastbärare med högre lastkapacitet får således en kortare årlig kördistans, men väger istället mer vilket genererar en något högre bränsleförbrukning vilket också avspeglar sig i en något högre dragbilskostnad.

3.2 Distributionssystem med tågtransport och lastbilstransport för delsträckor utan spår

Om industrispårspår inte finns tillgängligt över hela transportsträckan måste delar av transporten utföras med lastbil. I en studie från *Transportstyrelsen* jämförs distributionskostnad för tåg- och lastbilstransport. Enligt studien krävs transportavstånd längre än 300 km för att den lägre transportkostnaden ska kompensera för omlastningskostnader vid lastning från lastbil till tåg (Sundin 2017). Om industrispår finns tillgängligt över hela transportsträckan kan tågtransport vara konkurrenskraftigt på avstånden 100-200km (ibid.). Det är möjligt att industrispår finns eller kan anläggas till en terminal i en svensk hamn, men det är osannolikt att biogasanläggningar skulle ha anslutning till spår. Därför görs antagandet att tågtransport inte kan vara realistiskt för bio-CCS från biogasanläggningar för den undersökta skalan om transportavstånd $\leq$ 200 km. Eftersom det här arbetet görs i generella termer är det också svårt att göra något antagande om hur långt avståndet skulle vara till närmaste tågterminal för en godtycklig biogasanläggning.

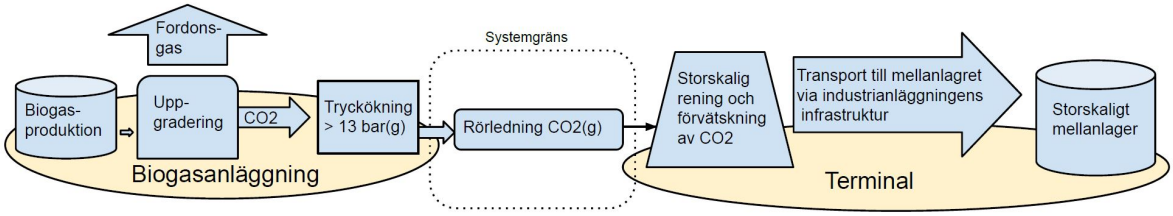
3.3 Distributionssystem med rörledningstransport

Det finns två alternativa sätt att transportera CO_2 genom rörledning. Det ena sättet är genom kolstål-rör med höga tryck över 70 bar, och i den så kallade fasen ”dense phase”. Det andra transportsättet är att överföra CO_2 i gasfas genom plaströr under låga tryck, 10-20 bar, och detta lämpar sig endast för kortare landbaserade sträckor. Vilket alternativ som är mest kostnadseffektivt beror av överföringsvolym, ledningslängd och hur terrängen ser ut där ledningen ska anläggas (Johnsson och Kjärstad 2019). Plaströr lämpar sig bättre för små överföringsvolymer eftersom ett lägre överföringstryck (som krävs vid plaströr) medför att gasen upptar en större volym, och om överföringsvolymerna är stora behövs en orimligt stor diameter på rören (Zero Emission Platform n.d.).

Då överföringsvolymerna i detta arbete är relativt små och de transportavstånd där rörledning förväntas bli kostnadseffektivt är korta görs bedömningen att transport

genom plaströr är lämpligast och att transport genom högtrycksatta stålrör helt kan uteslutas.

Att CO_2 överförs som gas medför en annorlunda utformning på biogasanläggningarna och på mellanlagret, detta ses i blockschemat i figur 13.



Figur 13: Blockschema för distributionslösning med CO_2-transport genom rörledning

Den stora förändringen är att förvätskningsprocessen kan äga rum efter rörtransporten. Tryckhöjning behövs fortfarande vid biogasanläggningen eftersom det är tryckskillnaden som driver CO_2-transporten. Det är fördelaktigt att överföra gas vid så högt tryck som möjligt eftersom detta minskar friktionsförlusterna (som minskar till följd av lägre gasensvolym vid höga tryck). Samtidigt vore det ineffektivt att tryckhöja till en så hög grad att en tryckreduktion måste ske efter transporten för att erhålla en produkt av rätt kvalitet för slutlagring enligt Northern Lights krav. Således antas den energieffektivaste transportlösningen vara att på biogassidan tryckhöja till en nivå som medför att gasen på terminalsidan håller rätt förvätskningstryck (minst 13 bar(g)). Dessutom möjliggör detta att endast en tryckökningsstation behövs. Om inkommande CO_2 vid terminalen redan håller rätt tryck behövs troligen endast kylning för att förvätska.

Som figur 13 visar bevaras tryckökningsstationerna på biogasanläggningarna medan den slutliga förvätskningen sker genom en storskalig förvätskningsanläggning vid terminalen. Att CO_2-strömmen från biogasanläggningar kan sam-förvätskas storskaligt är en förutsättning för distributionslösningen med rörtransport. Att bygga en småskalig förvätskningsprocess på terminalen är inte aktuellt.

Dimensionering av rördiameter har inte gjorts eftersom prisskillnaden för olika rörstorlekar väntas vara mycket liten i förhållande till gräv- och anläggningskostnaden. Grävkostnaden beror på hur många hinder, så som vägar och järnvägar, som måste passeras och kostnaden ökar kraftigt i tätort jämfört med på landsbygd (Lantbrukarnas Riksförbund n.d.). Då prisestimeringar för anläggningskostnad av gasledning i tätort varierar kraftigt i litteraturen diskuterades nyckeltalet istället med industriaktörer under ett projektmöte. Med ett, enligt aktörerna, möjligt spann om 5 000-10 000 kr/m

insågs att osäkerheten är stor. Slutligen valdes kostnaden 8 000 SEK/m som nyckeltal till simuleringarna. Samtliga nyckeltal presenteras i tabell 10.

Tabell 10: Nyckeltal för distribution med plaströrledning

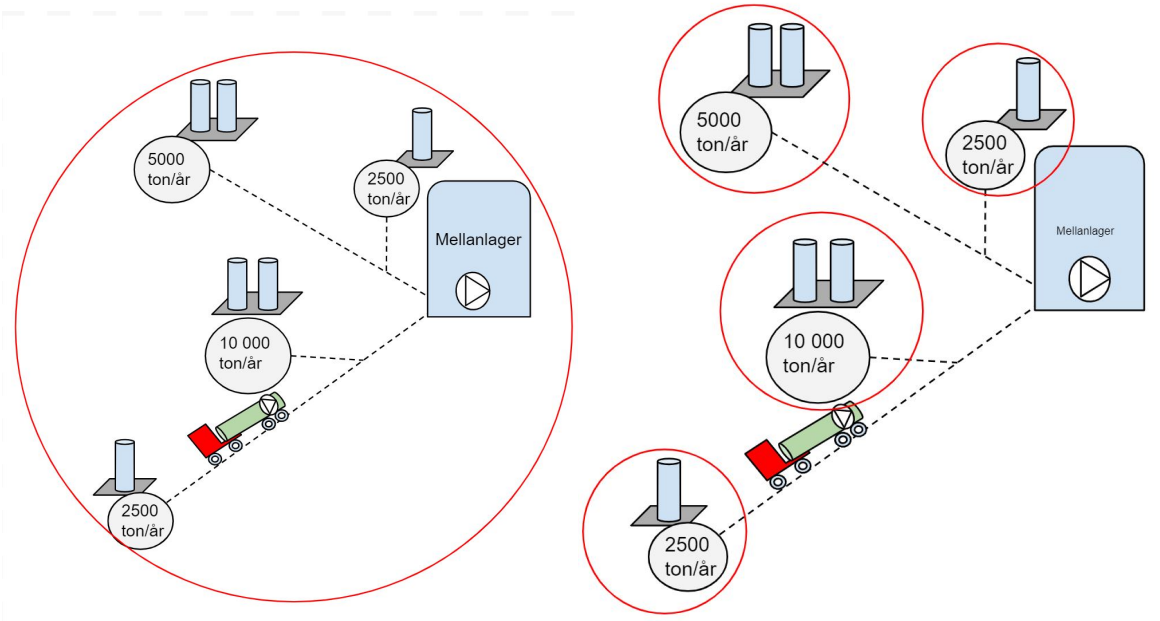
	Nyckeltal
Investeringskostnader	
Röranläggning (inklusive rör)	8000 SEK/m
Oförutsedda utgifter	20 % av tot. invest.kost.
Övriga Nyckeltal	
kalkylränta	8 %
Ekonomisk livslängd	25 år

Då kostnaden för tryckhöjningen fortfarande förläggs på förvätskningsprocessen och utanför systemgränsen för detta arbete fås inga rörliga kostnader i detta scenario. En längre ekonomisk livslängd på 25 år har ansatts vid denna distributionslösning eftersom en rörledning har en mycket hög installationskostnad och teknisk livslängd. Detta gjordes i samråd med industriaktörer under ett möte.

Ingen specifik kostnad för anslutningen av rörledningen har uppskattats, denna kostnad väntas bäras av meterpriset samt kostnadstillägget för ”Oförutsedda utgifter”.

4 Modellbeskrivning

Baserat på ovan beskrivna distributionsscenarion för lastbilstransport och distributionslösningen med rörtransport har två olika beräkningsmodeller för distributionskostnad per ton CO_2 utvecklats. Programvaran *Matlab* har använts för simulering genom statiska beräkningar. Den första modellen beräknar en genomsnittlig distributionskostnad per ton CO_2 för ett system av biogasanläggningar på olika avstånd från ett gemensamt mellanlager och med olika årsproduktion av CO_2. Resultat ger en bra kostnadsbild i generella drag. Den andra modellen beräknar kostnad per ton CO_2 för enskilda anläggningar, och resultatet ger en bättre bild av hur transportavstånd och årsproduktion av CO_2 påverkar distributionskostnaden. En illustration av modellerna ses i figur 14.



(a) Modell 1 - Genomsnittlig distributionskostnad

(b) Modell 2- Distributionskostnad för enskilda anläggningar

Figur 14: Illustration av de två beräkningsmodellerna för distributionskostnad vid bio-CCS från biogasanläggningar

I figur 14a illustrerar den röda cirkeln att första modellen summerar alla kostnader och dividerar med systemets totala CO_2-produktion. I figur 14b illustrerar cirklarna att modellen istället summerar kostnaderna för varje anläggning, och att kostnaden för dragbil och pump vid mellanlagret i detta fall måste allokeras på alla biogasanläggningar i systemet. Figur 14 är ett exempel av ett distributionsscenario med lastbil och stationära lager, men båda modellerna simulerar samtliga vägburna distributionsscenarion, och den andra modellen (figur 14b) simulerar även distribution genom rörledning.

En förutsättning för att kunna beräkna distributionskostnaden för vägburen transport är att beräkna hur många lastbärare som behövs och hur många stationära lager varje anläggning behöver (vid scenarion med stationära lager). Förutom de presenterade nyckeltalen i avsnitt 3 är biogasanläggningarnas avstånd till terminalen och årsproduktion av CO_2 indata i modellen. Utifrån årsproduktionen bestäms antal parallellkopplade stationär lager genom en iterativ process där den dagliga CO_2-produktionen jämförs mot den volym som finns kvar i det stationära lagret om en tömning uteblir (dvs. om lagret är fyllt med en lastbärares lastkapacitet). Med krav om minst två dagars överkapacitet måste den dagliga CO_2-produktionen vara mindre eller lika med halva den

kvarvarande lagringskapaciteten, detta uttrycks matematiskt enligt följande uttryck:

Om

$$\frac{\text{Årsproduktion CO}_2}{365} \leq \frac{\text{Kapacitet}_{lager} - \text{Kapacitet}_{lastbärare}}{2}$$

ger ett lager minst två dagars överkapacitet.

Om

$$\frac{\text{Årsproduktion CO}_2}{365} > \frac{\text{Kapacitet}_{lager} - \text{Kapacitet}_{lastbärare}}{2} \text{ och}$$
$$\frac{\text{Årsproduktion CO}_2}{365} \leq \frac{2\text{*Kapacitet}_{lager} - \text{Kapacitet}_{lastbärare}}{2}$$

ger två lager minst två dagars överkapacitet, och så vidare.

En graf över antal stationära lager och överkapacitet som funktion av års-CO_2-produktion används för att analysera om det alltid är nödvändigt med minst 2 dagars överkapacitet, se figur 17.

Investerings- och underhållskostnader beror av antalet parallellt arbetande dragbilar (i scenarion med vägburen transport), eftersom detta bestämmer totalantalet lastbärare. Därför görs en analys av tömningsfrekvens och tidsåtgång för tömning. För kostnadsberäkningarna bestäms behovet av dragbilar utifrån den genomsnittliga körtiden per dag, men modellen ger också ett ”tömningsschema” för ett kortare tidsintervall. Schemat visar antal tömningar per dag och tidsåtgång för dessa, samt den totala tidsåtgången per dag. Tömningsschemat tas fram med en iterativ process där 18 timmar om dygnet ansätts som arbetstid och resterande sex h är utanför arbetsskiftet. De fall där behov av tömning inträffar under dessa sex h förläggs tömningsbehovet på nästkommande arbetsdags första arbetstimme. Syftet med tömningsschemat är att påvisa den stora dagliga variationen. För att omvandla avstånd till körtid användes en hastighetsprofil med medelhastighet som funktion av transportavstånd. Profilen togs fram genom litteratur och samtal med åkeriaktören Litra (Andersson och Tamm 2019; Nilsson 2020), se bilaga 8.1.

4.1 Kostnadsmodell för system av biogasanläggningar

I modellen för systemet av biogasasnläggningar har simuleringar enbart gjorts för vägburen distribution. Det finns två typer av kostnader som tillsammans ger den totala distributionskostnaden. Det är en fast investeringskostnad i utrustning och infrastruktur och en rörlig driftskostnad som i det här arbetet genomgående benämns som ”Trafikeringskostnad”.

Den totala investeringskostnaden allokeras inom den ekonomiska livslängden genom annuitetsmetoden enligt ekvation 1 där r är kalkylränta och n ekonomisk livslängd.

$$Annuitet = \sum (Total\ investeringskostnad) * \frac{r}{1-(1+r)^{-n}} \tag{1}$$

Den rörliga trafikeringskostnaden beräknas enligt ekvation 2.

$$\begin{aligned} Trafikeringskostnad = &(Kostnad\ dragbil\ +\ Underhållskostnad) * \sum (Årlig\ distans) \\ &+ Chaufförkostnad * \sum (Årlig\ ställtid) + Revisionskostnad * \sum (Lastbärare) \end{aligned} \tag{2}$$

Ekvation 1 och 2 ger totalkostnad per år. För att slutligen få den genomsnittliga distributionskostnaden per ton CO_2 divideras summan av den fasta och rörliga totalkostnaden med den årliga insamlade CO_2 för hela systemet, se ekvation 3.

$$Totalkostnad = \frac{Annuitet + Trafikeringskostnad}{\sum (Årlig\ CO_2\text{-}produktion)} \tag{3}$$

Ekvation 3 används för att optimera pumpkapaciteten vid terminalen (för samtliga distributionsscenarion) och vid biogasanläggningarna (för scenarion med stationära lager). Genom att jämföra den distributionskostnad som ges vid användande av olika pumpar och konfigurationer av dessa kunde den optimala pumplösningen identifieras. Pumpkapaciteterna som undersöktes vid terminalen var Pump1, Pump2 och en dubbel uppsättning av Pump2. På biogasanläggningarna (för distributionsscenariona med fyllning av lastbärare genom pump) undersöktes samma pumpkapaciteter men också om pumpen bör installeras på lastbäraren eller på varje biogasanläggning.

Simuleringarna av den genomsnittliga distributionskostnaden för ett system av biogasanläggningar (modell 1) baserades på två teoretiska uppsättningar av biogasanläggningar. Den mindre uppsättningen tros kunna avspegla ett verkligt scenario i närtid, både i termer av transportavstånd, årsproduktion av CO_2 per biogasanläggning och den totala mängd CO_2 som systemet skulle generera. Det lilla systemet av biogasanläggningar har fyra anläggningar med års-CO_2-produktionerna och transportavstånden som presenteras i tabell 11. Detta system genererar totalt 20 000 ton CO_2/år.

Tabell 11: System av biogasanläggningar som tillsammans utgör en total CO_2-produktion om 20 000 ton/år (lilla systemet)

Anläggning	**1**	**2**	**3**	**4**
Avstånd [km]	50	100	150	200
Produktion [ton/år]	2500	10 000	5000	2500

Den större uppsättningen tros vara ett realistiskt scenario på sikt. En uppsättningen av tio biogasanläggningar som totalt genererar 60 000 ton CO_2/år togs fram, se tabell 12.

Tabell 12: System av biogasanläggningar som tillsammans utgör en total CO_2-produktion om 60 000 ton/år (stora systemet)

Anläggning	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Avstånd [km]	25	50	75	100	100	125	150	150	175	200
CO_2 [ton/år]	2500	5000	2500	5000	15 000	2500	10 000	5000	10 000	2500

4.2 Kostnadsmodell för enskild biogasanläggning

Syftet med modellen för den enskilda biogasanläggningen är att påvisa hur transportavstånd och årsproduktion av CO_2 påverkar distributionskostnaden. Målet var att täcka in alla möjliga utfall av biogasanläggningar, det vill säga alla kombinationer av transportavstånd och CO_2-produktioner mellan 1-200 km och 1 500-15 000 ton CO_2/år. För att kunna presentera resultatet på ett läsvänligt sätt valdes en tvådimensionell graf med kostnad som funktion av transportavstånd för ett antal utvalda CO_2-produktionsstorlekar mellan 1 500-15 000 ton/år. Produktionsstorlekarna valdes ut till ett antal tillräckligt stort för att väl illustrera hur kostnadsfördelningen beror av CO_2-produktion men utan att generera ett för plottrigt och svårläst resultat.

Kostnaden för den enskilda biogasanläggningen beräknades likt ekvation 1-3, men beräkningarna genomfördes i vektorform. I ekvation 4-6 anger hakparenteserna att det är en vektor som innehåller de angivna värdena för vardera biogasanläggning.

Det krävs inte en arbetande dragbil och lastbärare per biogasanläggning, utan några få dragbilar kan utföra tömningslogistiken för samtliga biogasanläggningar och därför måste kostnaden för dragbil och lastbärare fördelas rättvist mellan biogasanläggningarna. Ett antagande behövs om hur många dragbilar som arbetar parallellt, det går alltså inte att ta fram en kostnad per biogasanläggning på en helt generell basis. Utifrån resonemanget i avsnitt 4.1 antas 20 000 ton CO_2/år vara en realistisk totalproduktion i ett godtyckligt system av biogasanläggningar idag. Därför genomförs beräkningarna i modell 2 utifrån att varje biogasanläggning ingår i ett system som totalt producerar 20 000 ton CO_2/år och som har samma behov av lastbärare som ges av resultatet från kostnadsmodell 1 (se avsnitt 4.1). Kostnaden för lastbärarna allokeras på biogasanläggningarna utifrån dess CO_2-produktion, och fördelningen togs fram enligt följande uppställning:

$$\frac{[\text{Årlig } CO_2\text{-prod. per biogasanläggning}]}{20000} * (\text{Antal lastbärare}) * (\text{Lastbärarrelaterad kostnad}).$$

Den fasta kostnaden beräknades likt ekvation 1, men istället för att summera kostnaden för alla biogasanläggningar beräknades kostnaden per anläggning enligt ekvation 4. I vektorn "[Total investeringskostnad]" ingår kostnadsfördelningen av dragbil och lastbärare som beskrevs ovan.

$$[Annuitet] = [Total\ investeringskostnad\ ] * \frac{r}{1-(1+r)^{-n}} \tag{4}$$

Den rörliga kostnaden beräknades likt ekvation 2, men istället för att summera kördistansen och alla ställtider behölls de i vektorform vilket genererade en rörlig kostnad per biogasanläggning, och de rörliga kostnaderna kopplade till antal lastbärare beräknades enligt fördelningen beskriven ovan. Trafikeringskostnaden per biogasanläggning beräknades enligt ekvation 5.

$$\begin{aligned}[Trafikeringskostnad] = (Kostnad\ dragbil\ +\ Underhållskostnad) * [Årlig\ körd\ distans\ ] \\ + Chaufförkostnad * [Årlig\ ställtid] \\ + \frac{[Årlig\ CO_2\text{-}produktion\ ]}{20000} * Antal\ lastbärare * Revisionskostnad\end{aligned} \tag{5}$$

Slutligen ger ekvation 6 likt ekvation 3 totala distributionskostnaden, men per biogasanläggning och ton CO_2.

$$[Totalkostnad] = \frac{[Annuitet] + [Trafikeringskostnad]}{[Årlig\ CO_2\text{-}produktion]} \tag{6}$$

Vid distributionslösning med rörledning har driftskostnader förlagts utanför systemgränsen, och distributionskostnaden beräknades därför enligt ekvation 6 men vektorn "[Trafikeringskostnad]" från ekvation 5 utesluts.

5 Resultat och diskussion

5.1 Vägburen transport

5.1.1 Optimering av antal stationära lager och pumpkapacitet på biogasanläggningarna vid scenarion med stationära lager

Antal stationära lager beräknades utifrån att ge en överkapacitet om 2 dagar som grund, men med ett maxtak om 2 stycken per biogasanläggning. Pumpen med den högre pumpkapaciteten (Pump 2) gav en lägre totalkostnad, och den pumpkonfiguration som gav lägst kostnad var två parallellkopplade pumpar (av pump 2) installerade på lastbäraren. Ett utförligare resultat av optimeringen finns i bilaga 8.3.

5.1.2 Behov av lastbärare i lilla systemet av biogasanläggningar

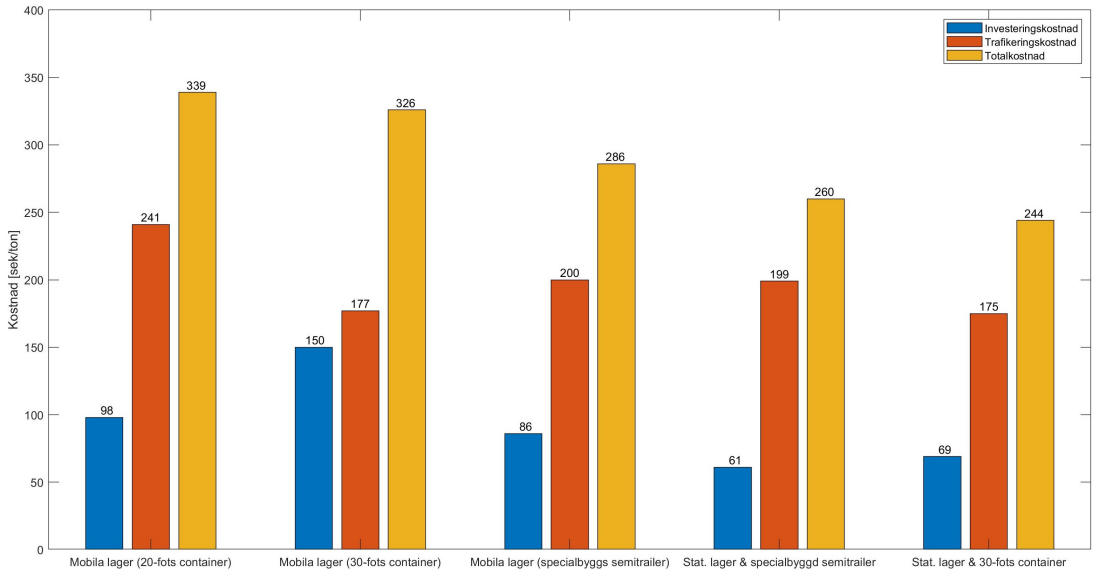
Simuleringarna för systemet med totalt 20 000 ton CO_2/år visade att endast en uppsättning dragbil och lastbärare krävs för att få ihop tömningslogistiken, oavsett scenario. Den genomsnittliga arbetstiden varierar med varje distributionsscenario. Detta var ett väntat resultat eftersom lastbärarens storlek påverkar antalet tömningar och således körtiden, och lagringslösningen påverkar ställtiden. Antal arbetande lastbärare, arbetstid och nyttjandegrad för respektive distributionslösning presenteras i tabell 13.

Tabell 13: Antal arbetande lastbärare och dess nyttjandegrad för systemet av biogasanläggningar om 20 00 ton CO_2/år (lilla systemet, se tabell 11)

	Mobilt lager (20-fots container)	Mobilt lager (30-fots container)	Mobilt lager (specialbygd semitrailer)	Stationära lager & specialbygd semitrailer	Stationära lager & 30-fots conatiner
Antal lastbärare [st]	1	1	1	1	1
Genomsnittlig arbetstid [h/dag]	11.4	7.6	8.6	9.5	8.4
Genomsnittlig användargrad [%]	63	42	48	53	47

5.1.3 Distributionskostnad för lilla systemet

Med en arbetande lastbärare och de nämnda optimeringarna i avsnitt 5.1.1 gav beräkningsmodellen den distributionskostnad som presenteras i figur 15.



Figur 15: Genomsnittlig distributionskostnad för systemet av biogasanläggningar om 20 000 ton CO_2 per år (lilla systemet, se tabell 11)

Distributionslösningen med mobila lager medför en betydligt högre investeringskostnad men en likvärdig trafikeringskostnad som distributionslösningen med stationära lager, detta ses genom att jämföra scenarion med mobila- och stationära lager av samma storlek på lastbäraren i figur 15. Lastbärare av samma lastkapacitet har samma tömningsfrekvens och får därför samma kostnad för dragbil och rullande underhåll, men ställtiden för distribution med mobila lager är betydligt kortare. Distribution med mobila lager har samtidigt många fler rullande enheter och får till följd av underhållskostnaden per rullande enhet en högre total underhållskostnad. Slutsatsen som kan dras från figur 15 är att de ekonomiska vinster som görs av kortare ställtid vid mobila lager kompenseras av en dyrare underhållskostnad. Det medför att distributionslösningen med mobila lager, genom högre investeringskostnader, får en högre total distributionskostnad än distributionslösningen med stationära lager.

Figur 15 visar också att ökad lastkapacitet minskar trafikeringskostnaderna (obs. att den specialbyggda semitrailern har en lastkapacitet mellanliggande 20- och 30-fots containern). Det gör att distributionsalternativet med stationära lager och lastbärare med maximal lastkapacitet är den distributionslösning som ger lägst total distributionskostnad. Detta är scenariot med stationära lager och 30-fots container som lastbärare. Den genomsnittliga totala distributionskostnad som erhölls av simuleringarna med stationära lager och 30-fots container som lastbärare är 244 SEK per ton CO_2. Figur 15 visar att trafikeringskostnaden utgör den största andelen av totalkostnaden.

5.1.4 Energianvändning för lilla systemet

Lastbärarnas olika lastkapacitet medför olika tömningsfrekvens och således olik årlig kördistans. De olika lastkapaciteterna medför också olika totalvikt som påverkar bränsleförbrukningen. Tabell 14 presenterar de olika distributionsalternativens totalvikt, bränsle- och energianvändning. Observera att energianvändningen enbart innefattar bränsleåtgång och inte elkonsumtion från pumpar.

Tabell 14: Energianvändning för lastbilstransport i systemet av biogasanläggningar om 20 000 ton CO_2/år (lilla systemet, se tabell 11)

	Mobilt lager (20-fots container)	Mobilt lager (30-fots container)	Mobilt lager (specialbygd semitrailer)	Stationära lager & specialbygd semitrailer	Stationära lager & 30-fots conatiner
Totalvikt fordonståg [ton]	45	63	49	49	63
Total distans [km/år]	216000	140000	168000	168000	140000
Diesel förbrukning [l/km]	0.31	0.38	0.35	0.35	0.38
Total energiförbrukning [MWh/år]	659	525	575	575	525
Energiförbrukning [kWh/ton CO_2]	33.0	26.2	28.7	28.7	26.2

Tabell 14 visar att de tyngre fordonstågen har en högre bränsleförbrukning per

kilometer, men eftersom de får en kortare total kördistans blir den totala årsenergianvändningen och energianvändning per ton CO_2 lägre. De distributionsalternativ som är energieffektivast är de som konsumerar minst energi för samma transportarbete och därför är det alternativen med störst lastkapacitet, 30-fots container som lastbärare, som har den lägsta energianvändningen på 26,2 kWh/ton CO_2. Distributionsscenarion med specialbyggd semitrailer som lastbärare har en årsenergianvändning på 28,7 kWh/ton CO_2 och distributionslösningen med 20-fots container har årsenergianvändning på 33,0 kWh/ton CO_2. Då distribution med stationära lager innebär ett extra pumpmoment för fyllning av lastbärarna inses att lösningen med mobila lager genom 30-fots containrar är den energieffektivaste vägburna distributionslösningen, sett till total energianvändning.

5.1.5 Behov av lastbärare i stora systemet

Tabell 15 visar att två parallellt arbetande dragbilar med tillhörande lastbärare räcker för att klara tömningslogistiken för samtliga distributionsalternativ i det större systemet om totalt 60 000 ton CO_2/år. Tabell 15 visar också att nyttjandegraden av de arbetande lastbärarna är större för systemet med 60 000 ton CO_2/år, ett resultat som är intuitivt då den totala fraktade produkten ökat trefaldigt medan antal arbetande lastbärare ökat tvåfaldigt.

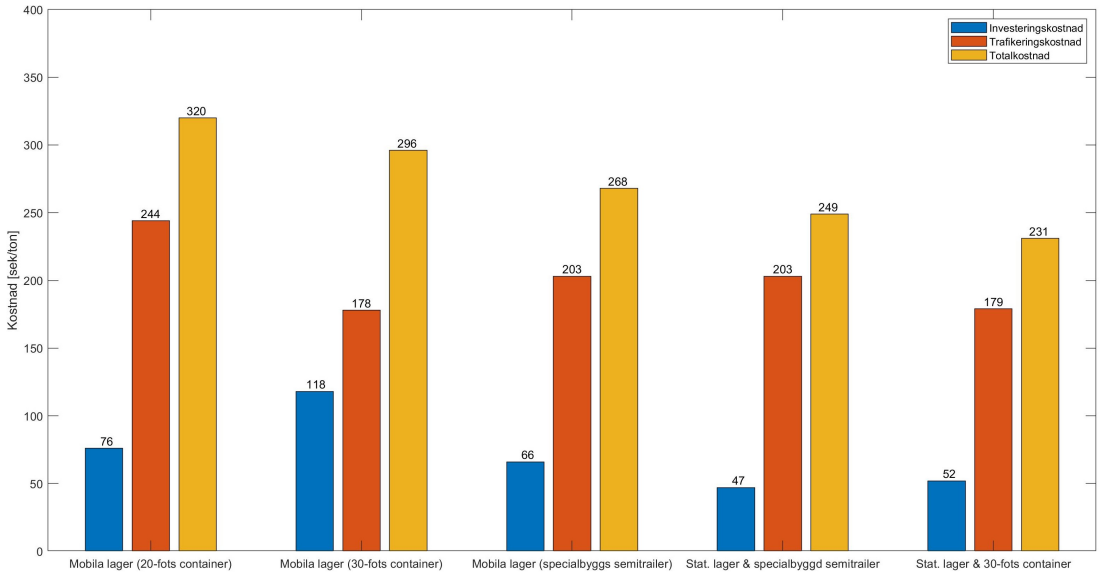
Tabell 15: Antal arbetande lastbärare och dess nyttjandegrad i systemet av biogasanläggningar om 60 00 ton CO_2/år (stora systemet, se tabell 12)

	Mobilt lager (20-fots container)	Mobilt lager (30-fots container)	Mobilt lager (specialbygd semitrailer)	Stationära lager & specialbygd semitrailer	Stationära lager & 30-fots container
Antal lastbärare [st]	2	2	2	2	2
Genomsnittlig arbetstid [h/dag]	34.6	23.1	25.9	28.9	25.3
Genomsnittlig användargrad [%]	96	64	72	80	70

Ett distributionssystem med en lastbärare kan teoretiskt, utifrån hur beräkningsmodellen fungerar, ha en nyttjandegrad mellan 0-100 %, men ett system med två eller fler lastbärare har ett definierat minimumvärde. Om två lastbärare behövs är den lägsta möjliga nyttjandegraden 50% eftersom $\frac{18{,}1h}{36h} = 50\%$, och ett system med tre arbetande dragbilar kan som lägst ha en nyttjandegrad på 67% eftersom $\frac{36{,}1h}{54h} = 67\%$, och så vidare. Således minskar risken för en mycket låg nyttjandegrad för större bio-CCS-system.

5.1.6 Genomsnittlig distributionskostnad för stora systemet

Figur 16 visar den genomsnittliga distributionskostnaden för ett biogasanläggningssystem om 60 000 ton CO_2/år. Figur 16 visar samma mönster som figur 15, och enligt samma resonemang som för lilla systemet är det lagringslösningen med stationära lager som är kostnadseffektivast. Lägst kostnad har distribution med stationära lager och lastbärare med maximal lastkapacitet genom 30-fots container, och den genomsnittliga totala distributionskostnaden är för detta scenario 231 SEK/ton CO_2.



Figur 16: Genomsnittlig distributionskostnad för systemet av biogasanläggningar om 60 000 ton CO_2 per år (stora systemet, se tabell 12)

Att distribution av CO_2 i det större systemet av biogasanläggningar får lägre genomsnittlig kostnad kan delvis härledas till en högre nyttjandegrad av lastbärarna (jämför tabell 13 och 15), och delvis till att en annan uppsättning av biogasanläggningar använts som indata (jämför tabell 11 och 12). Resultatet från den andra beräkningsmodellen illustrerar att transportavstånd och CO_2-produktionssstorlek har stor påverkan på distributionskostnaden för den enskilda biogasanläggningen. Följaktligen går det inte att anta att ett bio-CCS-system med högre total årsproduktion av CO_2 alltid har en lägre genomsnittlig distributionskostnad, utan den beror till stor del av vilka anläggningar och transportavstånd som utgör systemet, liksom vilken nyttjandegrad av lastbärare som uppnås.

5.1.7 Energianvändning för stora systemet

Tabell 16 visar enligt samma resonemang som för lilla systemet av biogasanläggningar (tabell 14) att det är lastbäraren med maximal lastkapacitet som är energieffektivast. Enligt samma resonemang är distribution med mobila lager genom 30-fots containrar energieffektivare än distribution med stationärt lager och 30-fots container som lastbärare tack vara ett pumparbete mindre, men i termer av bränsleförbrukning är scenariona ekvivalenta. Tabell 16 visar också att det större systemet av biogasanläggningar får en mycket likvärdig energianvändning per ton CO_2 som det mindre systemet (se tabell 14).

Tabell 16: Energianvändning för lastbilstransport i systemet av biogasanläggningar om 60 000 ton CO_2/år (stora systemet, se tabell 12)

	Mobilt lager (20-fots container)	**Mobilt lager (30-fots container)**	**Mobilt lager (specialbygd semitrailer)**	**Stationära lager & specialbygd semitrailer**	**Stationära lager & 30-fots conatiner**
Totalvikt fordonståg [ton]	45	63	49	49	63
Total distans [km/år]	666000	431000	518000	518000	431000
Diesel förbrukning [l/km]	0.31	0.38	0.35	0.35	0.38
Total energiförbrukning [MWh/år]	2030	1620	1770	1770	1620
Energiförbrukning [kWh/ton CO_2]	33.8	26.9	29.5	29.5	26.9

5.1.8 Tömningsbehov för lilla systemet

Tabell 17 visar ett tömningsschema där raderna representerar dagar och värdena representerar arbetstiden i timmar som det tar att utföra en tömning för den enskilda anläggningen. Arbetstiden inkluderar körtid till och från biogasanläggningen samt ställtid på både biogasanläggningen och terminalen. Värdet 0 anger att det inte finns behov av tömning den dagen. Den sista kolonnen visar den totala arbetstiden per dag.

Tabell 17: Tömningsschema som visar arbetstid i timmar per tömning och anläggning samt total arbetstid per dag för systemet av biogasanläggningar om 20 000 ton CO_2/år (lilla systemet, se tabell 11)

Dag	Anläggning 1	Anläggning 2	Anläggning 3	Anläggning 4	Total arbetstid [h]
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	4.8	0.0	0.0	4.8
3	0.0	4.8	5.8	0.0	10.6
4	0.0	4.8	0.0	0.0	4.8
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	3.4	4.8	5.8	7.3	21.3
7	0.0	4.8	0.0	0.0	4.8
8	0.0	4.8	5.8	0.0	10.6
9	0.0	4.8	0.0	0.0	4.8
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	3.4	4.8	5.8	7.3	21.3
12	0.0	4.8	0.0	0.0	4.8
13	0.0	4.8	5.8	0.0	10.6
14	0.0	4.8	0.0	0.0	4.8
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	3.4	4.8	5.8	7.3	21.3
17	0.0	4.8	0.0	0.0	4.8
18	0.0	4.8	5.8	0.0	10.6
19	0.0	4.8	0.0	0.0	4.8
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	3.4	4.8	5.8	7.3	21.3
22	0.0	4.8	0.0	0.0	4.8
23	0.0	4.8	5.8	0.0	10.6
24	0.0	4.8	0.0	0.0	4.8
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	3.4	4.8	5.8	7.3	21.3
27	0.0	4.8	0.0	0.0	4.8
28	0.0	4.8	5.8	0.0	10.6

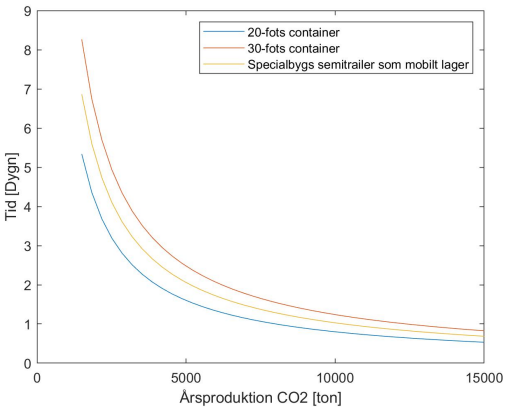
.

Genom att studera tömningsschemat ses att varje anläggning har ett tömningsbehov med ett repetitivt mönster. Det är anläggningens årliga CO_2-produktion som avgör tömningsfrekvensen, och det är anläggningens avstånd från terminalen som avgör tidsåtgången för varje tömning. Exempelvis har anläggning 1 och 4 samma årliga CO_2-produktion vilket medför deras behov av tömning alltid infaller samma dag (eftersom modellen utgår från att alla anläggningar börjar fyllas samma dag), men deras olika transportavstånd medför en stor variation i tidsåtgång. Genom att studera den sista kolumnen inses att den dagliga variationen i arbetstid är stor, även om den genomsnittliga arbetstiden är 9.11 timmar per dag enligt tabell 13. Förvisso finns potential att fördela arbetstiden bättre genom att inte tömma anläggning 1 och 4 på samma dag. Om anläggning 1 och 4 skulle tömmas på olika dagar skulle alla dagar kunna få en arbetstid < 18 timmar vilket är nödvändigt för att klara logistiken med

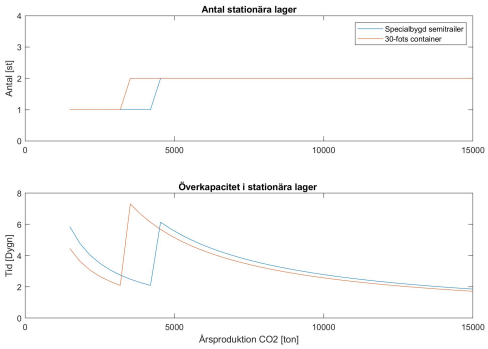
en lastbärare. Trots denna åtgärd skulle variationen vara fortsatt stor, och tabell 17 visar att behovet av tömning spänner över två skift vissa dagar medan det under andra dagar räcker med ett skift. Tömningsschemat visar också att det ofta blir halva arbetsskift.

5.1.9 Överkapacitet i lager

Syftet med att ha en viss överkapacitet i lagren är att minska behovet av tömning vid precis rätt tidpunkt. Överkapaciteten kan fungera som buffert för när störningar i logistikkedjan uppstår, men den skulle också kunna användas för att aktivt senarelägga en tömning. Att aktivt senarelägga vissa tömningar skulle kanske kunna vara ett strategiskt verktyg för att få till ett mer effektivt tömningsschema. Resultatet i figur 15 och 16 visar att distribution med mobila lager redan har en mycket hög investeringskostnad, och det är inte kostnadsmässigt aktuellt att öka lagringskapaciteten ytterligare genom att öka antalet mobila lager i systemet, medan i fallet med stationära lager kan en högre lagringskapacitet vara ekonomiskt hållbart. Figur 17 visar skillnaden i överkapacitet i lager mellan scenarion med mobila lager och stationära.



(a) Mobila lager



(b) Stationära lager

Figur 17: Överkapacitet i lager mätt i tid

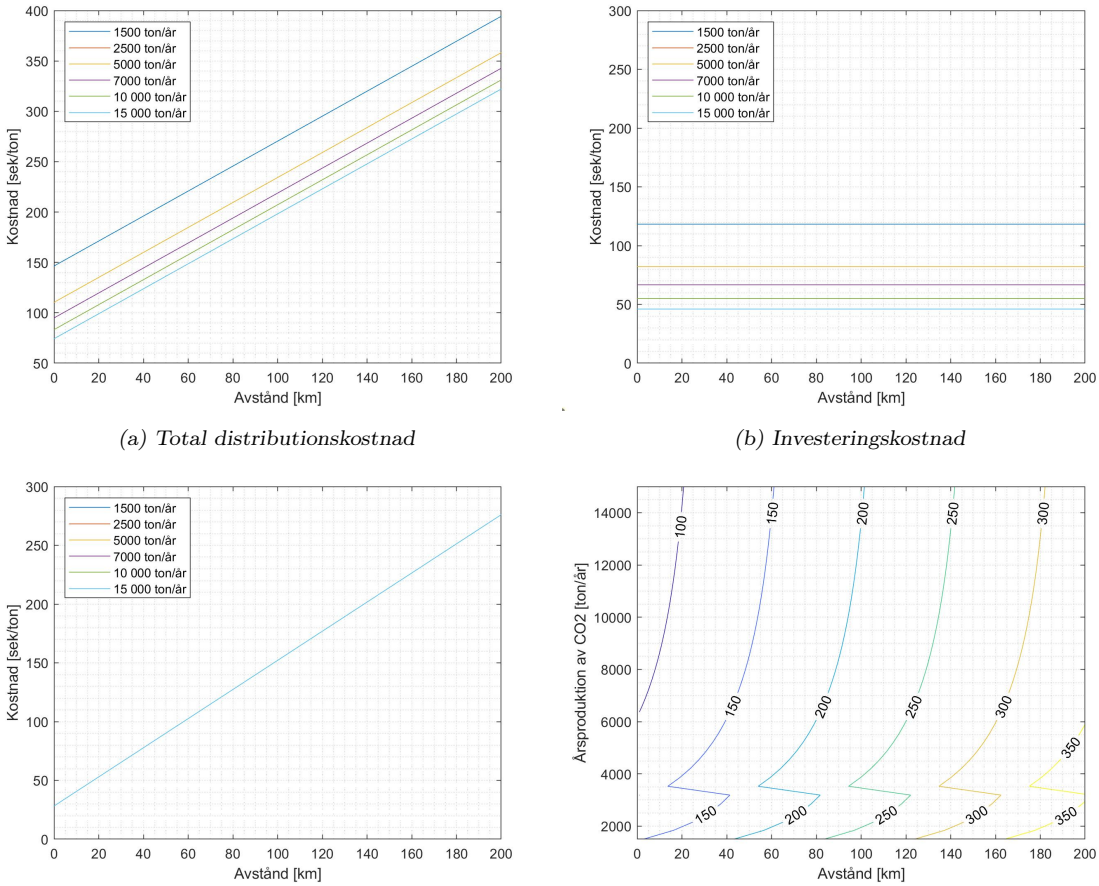
Genom att jämföra figur 17a och den undre figuren i 17b ses att mobila- och stationära lager har en ekvivalent överkapacitet för små CO_2- produktioner. Kravet om minst två dagars överkapacitet vid lagringslösning med stationära lager medför att biogasanläggningar med hög CO_2-produktion kräver två parallellkopplade stationära lager. Lagringslösningen med stationära lager medför därför en högre överkapacitet än lagringslösningen med mobila lager för biogasanläggningar med hög CO_2-produktion. Figur 17b illustrerar också att brytpunkten mellan behov av ett och två stationära

lager beror av lastbärarens storlek. Om en tömning uteblir kommer det stationära lagret vara fyllt till en högre grad om lastbäraren är större. Det innebär att tiden tills lagret är fullt minskar vid större lastbärare. Därför behövs två parallella lager tidigare vid transport med 30-fots container än när en specialbyggd semitrailer används som lastbärare.

5.1.10 Distributionskostnad för en enskild biogasanläggning

Resultatet av beräkningsmodell 1 visar att scenariot med stationära lager och 30-fots container som lastbärare är den kostnadseffektivaste lösningen, och även en av de energieffektivaste lösningarna. Därför presenteras resultat från simuleringarna över den enskilda anläggningen (modell 2) endast för detta scenario, se figur 18.

Figur 18a visar total distributionskostnad som funktion av transportavstånd (enkel väg) för ett antal utvalda biogasanläggningsstorlekar. Anläggningsstorlekarna, eller snarare deras korresponderande årsproduktion av CO_2, valdes ut för att väl representera hela spektret av möjliga uppgraderingsanläggningar och deras CO_2-frånskiljning. Även om figur 18a inte visar en exakt kostnad för varenda möjlig anläggningsstorlek kan en bra uppskattning göras för CO_2-produktionsstorlekar mellanliggande de utvalda som presenteras i figur 18a. Figur 18a visar också att totalkostnaden för en anläggning med 2500 ton/år och 5000 ton CO_2/år har samma kostnad, detta beror på en olinjäritet i investeringskostnaderna tack vare att anläggningar större än ungefär 3200 ton CO_2/år går från att ha ett stationärt lager till två stycken. Denna olinjäritet syns också i figur 18d och 17b.



(a) Total distributionskostnad

(b) Investeringskostnad

(c) Trafikeringskostnad

(d) Gränsvärden för kostnadsnivåer

Figur 18: Distributionskostnad för enskild biogasanläggning vid distribution med stationära lager och 30-fots container som lastbärare

Figur 18c visar att trafikeringskostnaden är helt oberoende av produktionsstorlek, det är endast transportavståndet som påverkar trafikeringskostnaden. Trafikeringskostnaden beror av en avståndsoberoende kostnad som korrelerar till ställtiden på biogasanläggningarna, denna kostnad representeras på y-axeln där x=0. För korta avstånd ses att kostnaden för ställtiden dominerar totala trafikeringskostnaden, men för större avstånd blir transportkostnaden dominerande. Figur 18b visar omvänt att investeringskostnaderna är oberoende av avstånd med beror av anläggningsstorlek. Summan av trafikerings- och investeringskostnaderna blir det avstånds- och anläggningsberoende linjära samband som illustreras i figur 18a.

Figur 18d visar vilka kombinationer av transportavstånd och CO_2-produktioner som ger en viss totalkostnad. Figuren visar således vilka gränsvärden som gäller för att

understiga en viss kostnadsnivå. Hacket i grafen korresponderar till övergången från ett stationärt lager per biogasanläggning till två stycken, och ur graf 18d går det också att utläsa att en anläggning med 2500 och 5000 ton CO_2/år har samma distributionskostnad tack vara övergången.

Resultatet av distributionskostnaden för den största biogasanläggningen (15 000 ton CO_2/år) kan jämföras mot resultatet av den tidigare gjorda studien nämnd i avsnitt 1.3. I den tidigare studien finns ett scenario där tömningslogistik sker dygnet runt alla dagar i veckan, och där punktutsläppskällan har en årlig CO_2-produktion om 125 000 ton/år. För transportsträckan 65 km (enkel väg) erhölls då lastbilstransportkostnaden 129 SEK/ton CO_2 (Vattenfall AB 2020). Kostnaden inkluderar hyra av lastbärare och chaufför samt bränsleförbrukning. Resultaten är inte direkt jämförbara av flera anledningar: den stora skalskillnaden, beräkningarna baseras på olika skiftlängd och att det är olika distributionssystem. Dessutom ingår olika kostnader i båda studierna. I den tidigare studien baseras lastbilstransportkostnaden på hyra av lastbärare medan denna studie utgår från investering av dessa. En jämförelse kan ändå göras för att få en uppfattning om överensstämmelsen. Figur 18c och 18a visar att den största biogasanläggningen på 65 km transportavstånd har en trafikeringskostnad på 110 SEK/ton CO_2 och en total distributionskostnad på 155 SEK/ton CO_2. Om alla investeringskostnader förutom lastbärarna hade uteslutits hade en total distributionskostnad mellan 110 och 155 SEK/ton erhållits, och detta kan jämföras med resultatet av den tidigare studien vars transportkostnad är 129 SEK/ton CO_2. Jämförelsen visar att båda studierna har kommit till ett ganska likvärdigt resultat.

5.2 Distribution med rörledning

Den rörliga kostnaden för distribution genom rörledning sattes till noll eftersom kostnaden för kompression allokeras på förvätskningsprocessen. Investeringskostnaden är kraftigt avståndsberoende vilket gör att rörledning endast blir det kostnadseffektivaste alternativet på mycket korta transportavstånd. Tabell 18 visar för vilka avstånd och års-CO_2-produktioner som distribution genom rörledning är kostnadseffektivare än distribution med stationära lager och 30-fots container som lastbärare. Värdet anger distributionskostnad och anges i enheten SEK/ton.

Tabell 18: Distributionskostnad i SEK/ton CO_2 för CO_2-transport i rörledning då detta är kostnadseffektivare än vägburen distribution med stationära lager och 30-fots container som lastbärare

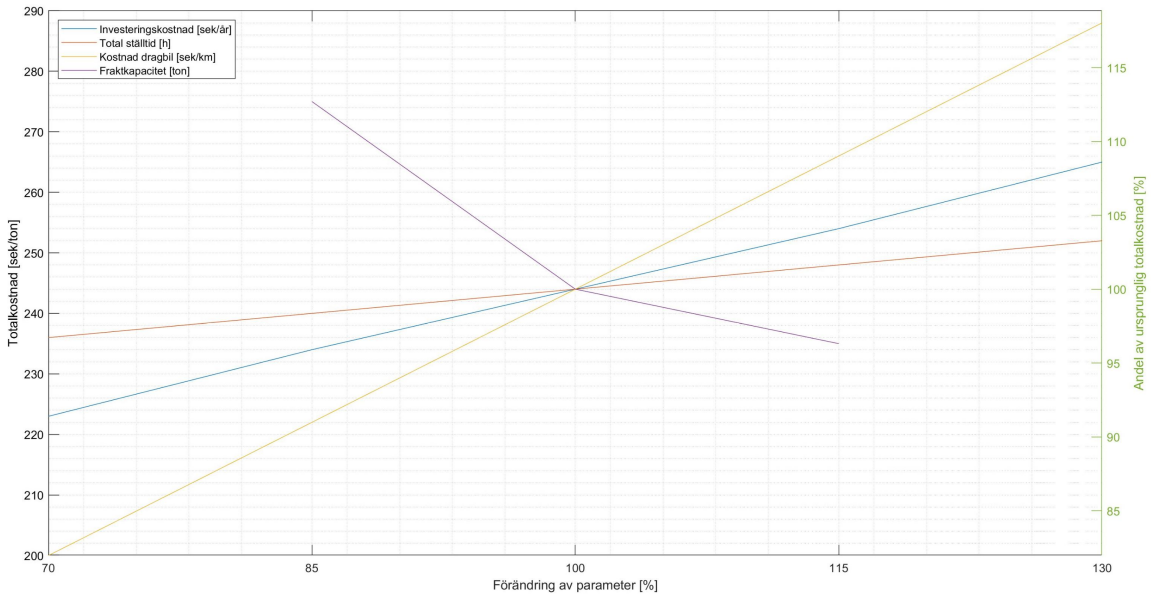
CO_2 [ton/år]	0.2 km	0.4 km	0.6 km	0.8 km	1 km	1.2 km	1.4 km
1500	120						
3750	48	96					
6000	30	60	90				
8250	22	44	65	87			
10500	17	34	51	69			
12750	14	28	42	56	71		
15000	12	24	36	48	60	72	

Tabell 18 visar att rörledning endast är ekonomiskt försvarbart för transportavstånd upp till en dryg kilometer. Biogasanläggningarnas storlek har också stor inverkan på det maximala transportavstånd där rörledning kan vara konkurrenskraftigt med vägtransport.

Eftersom kompressionsarbetet har allokerats på förvätskningsprocessen fås resultatet att den enda energianvändning för att överföra CO_2 i rörledning är den energi som motsvarar tryckfallet som uppstår till följd av förluster. Denna energiåtgång är inte beräknad eller uppskattad, men den är försumbart liten i förhållande till de vägburna distributionsscenarionas energianvändning. Därför är transport genom rörledning den energieffektivaste distributionslösningen.

5.3 Känslighetsanalys

En av känslighetsanalyserna genomfördes för distributionslösningen med stationära lager och transport genom 30-fots container och genom beräkningsmodell 1 (lilla systemet av biogasanläggningar). Figur 19 visar resultatet då parametrar förändrats andelsmässigt och figur 20 visar resultatet då parametrar som ändrats i heltal. På vänster y-axel visas total distributionskostnad och på höger y-axel visas andel av ursprungspris. Figuren kan alltså användas för att utläsa både förändring i kronor och i procent.

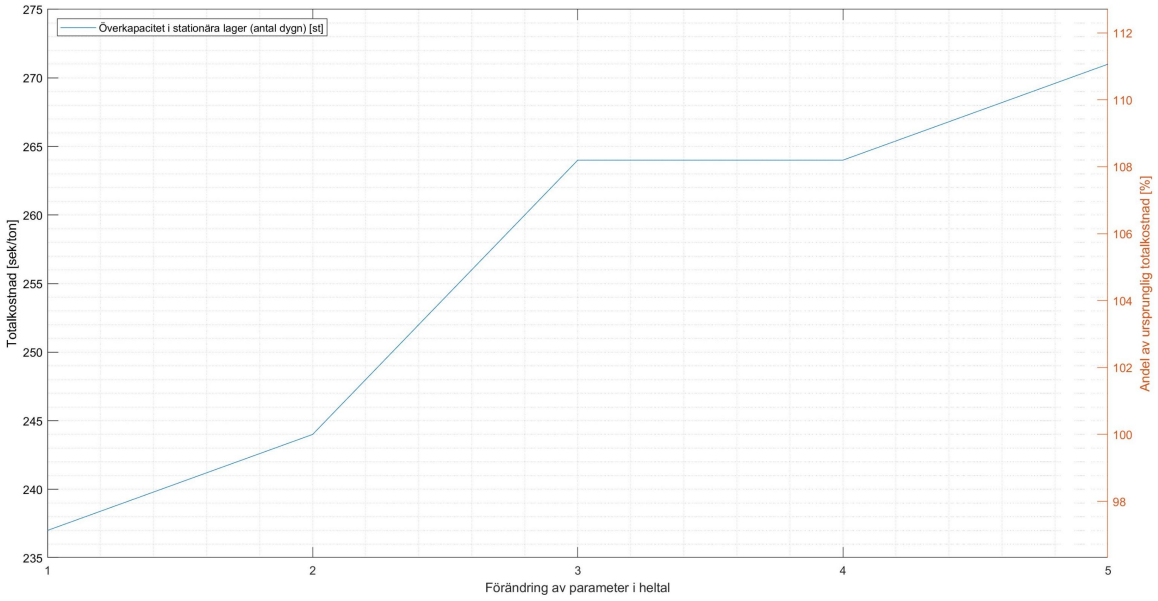


Figur 19: Känslighetsanalys där parametrar ändras procentuellt

Av de parametrar som ändrats andelsmässigt är kostnad för dragbil en av de parameter som har störst påverkan på totalkostnaden. Om priset för dragbil ökar med 30% ökar distributionskostnaden med 17%. Det innebär att en felkälla i denna parametrar ger ett stort totalt utslag. Det innebär samtidigt att det kan finnas potential att minimera distributionskostnaden genom att skapa optimala förutsättningar för åkeriföretaget som ska stå för logistiken. En felbedömning av infrastrukturkostnad ger också en relativt stor påverkan på totalpriset, om investeringskostnader är 30% högre ger det en ökning av distributionskostnad med ca. 8%. En missbedömning av ställtiden har låg påverkan på distributionskostnaden. Om den totala ställtiden skulle öka med 30% ökar distributionskostnaden endast med ca 3%.

Parametern lastkapacitet ändrades endast med ±15% eftersom det bedömdes mycket osannolikt att felbedömningen skulle kunna vara så stor som 30%. Förändring av lastkapaciteten får ett olinjärt utslag på distributionskostnaden och det beror på att antal stationära lager beror av lastkapaciteten. När lastkapaciteten ökas krävs troligen att en eller flera biogasanläggningar i systemet måste gå från ett till två parallella stationära lager och det förklarar varför kostnadsbesparingen av ökad lastkapacitet är mindre än kostnadsökningen av minskad lastkapacitet. Figur 19 visar att om lastkapaciteten skulle vara 15% mindre ökar distributionskostnaden med ca 13%, men om lastkapaciteten skulle vara 15% större minskar distributionskostnaden endast med ca 4%. Eftersom 30-fots containerns dimensioner har linjärapproximerats utifrån en 20-

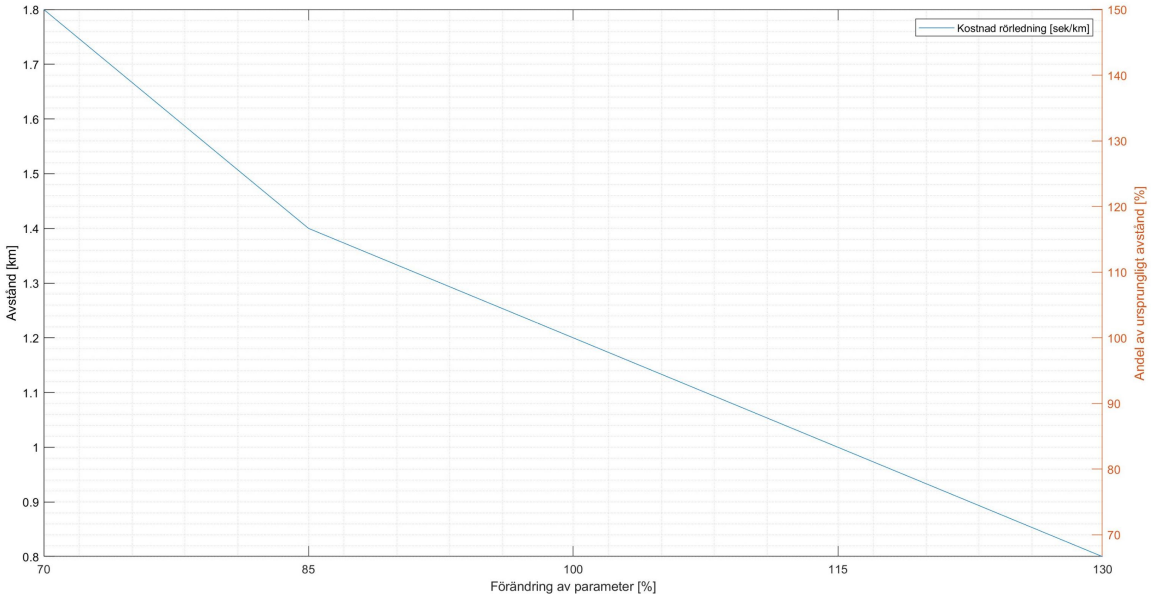
och 40-fots container finns en risk för felkälla i just 30-fots containerns lastkapacitet. Resultatet av känslighetsanalysen visar att den slutgiltiga lastkapaciteten vid en specialdesignad lastbärare kan få stor inverkan på distributionskostnaden.



Figur 20: Känslighetsanalys där parameter ändras i heltal

Figur 20 visar hur ökad eller minskad överkapacitet i lager påverkar distributionskostnaden. Resultatet är olinjärt eftersom ökning och minskning av antal dagars överkapacitet medför att olika många anläggningar i systemet behöver gå från ett till två parallella stationära lager, och vice versa. Resultatet visar att överkapaciteten har stor inverkan på distributionskostnaden, och en onödigt stor överkapacitet får stora konsekvenser.

För distributionslösningen med rörledning genomfördes en känslighetsanalys genom beräkningsmodell 2 och en biogasanläggning med produktionsstorlek på 15 000 CO_2/år. Figur 21 visar det största transportavståndet där distribution genom rörledning är kostnadseffektivare än distribution genom stationära lager och 30-fots container som lastbärare. Känslighetsanalysen visar att om meterkostnaden för rörledning skulle minska med 30 % (till 5600 SEK/m) skulle rörledning vara kostnadseffektivt för transportavstånd upp till 1.8 km. Om meterpriset istället skulle vara 30 % högre (10 400 SEK/m) skulle det största transportavståndet vara 0,8 km. Prisförändringen ±30 % motsvarar alltså väl det prisintervall som diskuterats med industriaktörer och som påträffats i litteratur.



Figur 21: Känslighetsanalys där största transportavstånd som distribution genom rörledning har ekonomisk potential har uppmäts vid förändrad anläggningskostnad

5.4 Sammanfattande diskussion

Resultatet av beräkningsmodell 1 (genomsnittlig distributionskostnad för system av biogasanläggningar) är relativt ”straight forward”, figur 15 och 16 visar en tydlig trend att stationära lager är den kostnadseffektivaste lagringslösningen och lastbärare med optimerad lastkapacitet är den kostnadseffektivaste lastbäraren. Att stationära lager ger en lägre investeringskostnad var väntat eftersom de mobila lagren är dyrare per volymenhet. Att trafikeringskostnaden för scenarion med mobila- och stationära lager med samma lastbärare gav likvärdig kostnad var dock oväntat. Hypotesen var att mobila lager genom minskad ställtid skulle ge en kraftigt reducerad trafikeringskostnad. Figur 15 och 16 visar att ställtid inte har tillräckligt stor effekt för att ge en reducerad trafikeringskostnad. Den ekonomiska vinst som görs i minskad ställtid vägs upp av en ökad underhållskostnad på grund av fler rullande lastbärare. Känslighetsanalysen (figur 19) visar att en förändring i ställtid om ± 30 % inte har särskilt stor effekt på distributionskostnaden, men det är viktigt att notera att det finns mycket tid att vinna på att dubbla pumpkapaciteten eller att gå från stationära till mobila lager. I dessa fall är ställtidsförändringen långt större än 30% vilket ger stor skillnad i kronor även om grafens lutning är låg. Att det är kostnadseffektivt att investera i högre pumpkapacitet bevisar att ställtiden är en viktig parameter även om det inte syns i känslighetsanalysen. Känslighetsanalysen visar dock att en feluppskattning av

tidsåtgången för containerbyte eller för att koppla in och ur pump för tömning (som skulle kunna ligga inom tidsintervallet ±30%) inte har stor inverkan på totalkostnaden.

Att lastbärarna med högst lastkapacitet gav lägst energiåtgång var ett väntat resultat eftersom lägre tömningsfrekvens medför kortare årlig körsträcka. Energiberäkningarna inkluderar endast bränsleåtgång för lastbilar, men eftersom distribution med stationära lager medför ett extra pumparbete för fyllning av lastbärare inses att distributionsscenariot med mobila lager genom 30-fots containrar är den energieffektivaste vägburna distributionslösningen. Energiåtgången för pumparbetet uppskattas emellertid som litet i sammanhanget och därför bedöms scenariot med stationära lager och 30-fots container som nästintill ekvivalent. Energiberäkningarna är baserade på diesel som bränsle, men om dragbilen istället skulle drivs av ett CO_2-neutralt bränsle skulle CO_2-effektiviteten och klimatnyttan öka. Resultatet av lastbärarnas relativa energianvändningar bör dock vara oförändrad oavsett bränsle.

Tabell 13 visar att samtliga lastbilsscenarion medför en tömningslogistik med genomsnittlig arbetstid mindre än 18 timmar per dag för det mindre systemet av biogasanläggningar (20 000 ton CO_2/år). Detta medför att en uppsättning med arbetande dragbil och lastbärare räcker för samtliga scenarion. Ur ett ekonomiskt perspektiv är det fördelaktigt med så hög nyttjandegrad som möjligt eftersom det innebär att mängden CO_2 som en lastbärare kan transportera har maximerats, och således har fordonets investeringskostnad/ton CO_2 minimerats. Ur ett administrativt perspektiv kan det dock vara besvärligt med en hög genomsnittlig nyttjandegrad. Tabell 17 visar att den dagliga tömningsvariationen är stor. I det undersökta systemet med 20 000 ton CO_2/år är variationen inte ett problem (i avseende att klara logistiken med en lastbärare) eftersom en arbetstid mindre än 18 timmar kan uppnås på daglig basis genom att tömning av anläggningarna med samma tömningsfrekvens förläggs på olika dagar. Om den genomsnittliga körtiden är låg finns det stor potential att på detta vis få till en önskvärd arbetstid på daglig basis, men om den genomsnittliga körtiden skulle vara nära 18 timmar finns inte samma flexibilitet. Ingen analys har gjorts rörande vilken högsta genomsnittlig nyttjandegrad som är möjlig, men eftersom det finns mycket marginal i det lilla systemet av biogasanläggningar dras slutsatsen att det med stor säkerhet räcker med en uppsättning arbetande dragbil och lastbärare.

Vidare kan det tänkas att variationerna i arbetstid är något som skulle kunna skapa problem för det åkeriföretag som ska stå för chaufförer och dragbilar, men detta har inte analyserats i det här arbetet. Det är dock troligt att åkeriföretaget får högre omkostnader om tömningslogistiken är problematisk, och detta kommer troligt avspeglas genom en högre trafikeringskostnad. Känslighetsanalysen visar att kostnaden för dragbil är en parameter som har stor inverkan på totala distributionskostnaden. Att vidare optimera distributionskedjan vid bio-CCS från biogasanläggningar för att

få till ett effektivt tömningsschema kan därför vara ett viktigt framtida steg.

Jämförelse mellan figur 15 och 16 visar att det större systemet av biogasanläggningar gav en lägre distributionskostnad tack vare en lägre investeringskostnad. Tabell 13 visar att det mindre systemet av biogasanläggningar behöver en lastbärare medan det större systemet enligt tabell 15 bara behöver två trots en trefaldig ökning av totala CO_2-produktionen. Således slås omkostnaderna för en extra lastbärare ut på en större mängd CO_2 och investeringskostnaden för lastbäraren per ton CO_2 minskar. Ur tabell 13 och 15 kan det också utläsas att det större systemet har en högre nyttjandegrad av lastbärarna, men ett system med högre årsproduktion av CO_2 behöver inte nödvändigtvis ha högre nyttjandegrad av lastbärare. Ett mindre system skulle t.ex. kunna ha en nittioprocentig nyttjandegrad av en lastbärare medan ett större system skulle kunna ha en sjuttiprocentig nyttjandegrad av två lastbärare. Nyttjandegraden beror av tidsåtgången för tömningslogistiken, och således av både CO_2-produktion och transportavstånd, och i dessa specifikt utvalda system om 20 000 och 60 000 ton CO_2/år gavs en lägre nyttjandegrad för det mindre systemet.

Nyttjandegraden är en parameter som är svår att analysera eftersom den beror av både transportavstånd och årsproduktion av CO_2 (tömningsfrekvens). Exempelvis, om transportavstånden i modellen ökas medan årsproduktionen av CO_2 hålls konstant kommer arbetstiden att öka tack vare längre körtid per tömning. Investeringskostnaden kommer vara oförändrad (förutsatt att behovet av lastbärare är oförändrat) men de ökade transportavstånden kommer däremot leda till högre trafikeringskostnader och en högre totalkostnad. Slutsatsen är att en hög nyttjandegrad inte nödvändigtvis implicerar en låg investeringskostnad, men en hög CO_2-transport per lastbärare kommer minska investeringskostnaden för lastbäraren och således den totala investeringskostnaden för hela systemet. I den studerade jämförelsen mellan systemet med 20 000- och 60 000 ton CO_2/år inses att nyttjandegraden ökat till följd av en annan uppsättning anläggningar med både olika transportavstånd och CO_2-produktionsstorlekar, men det är det faktum att det större systemet transporterar mer CO_2 per lastbärare som gör att dess investeringskostnad är lägre.

Vidare kan det konstateras att om nyttjandegraden av lastbärarna är låg finns det tidsmässigt potential att inkludera ytterligare en biogasanläggning i bio-CCS-systemet, och detta skulle öka den totala mängden transporterad CO_2 per lastbärare. I verkligheten är det naturligtvis geografiska förutsättningar som avgör vilka anläggningar som kan ingå i systemet och inte. Syftet med att tillämpa bio-CCS på biogasanläggningar är att åstadkomma negativa utsläpp, och målet är att uppnå en så stor reduktion av CO_2 som möjligt. Om det inte finns tekniska begränsningar kring hur mycket CO_2 det tänkta mellanlagret kan mottaga är det troligt att alla biogasanläggningar inom ett rimligt avstånd (inom en rimlig distributionskostnadsnivå) kommer att ingå i

bio-CCS-systemet. Det slutgiltiga antalet lastbärare och dess nyttjandegrad är således en parameter som troligen inte kan påverkas eller optimeras genom att addera eller utesluta anläggningar ur bio-CCS-systemet.

Genom den studerade jämförelsen mellan ett system om 20 000- och 60 000 ton CO_2/år kan ändå vissa slutsatser dras om ett framtida potentiellt bio-CCS-system. Även om ett verkligt system inte kommer vara identiskt med varken det mindre eller större systemet är det sannolikt att en distributionskostnad för ett system med årsproduktion mellan 20 000-60 000 ton CO_2/år skulle landa inom storleksordningen 230-245 SEK/ton vid distribution med stationära lager och 30-fots container som lastbärare. Det är sannolikt att energiåtgången skulle landa inom storleksordningen 26-27 kWh/ton CO_2. Det mesta tyder på att ett bio-CCS-system i storleksordning 20 000 ton CO_2/år har behov av endast en lastbärare eftersom nyttjandegraden i det undersökta systemet är så pass låg. I ett större bio-CCS-system, upp till 60 000 ton CO_2/år, kommer det troligt maximalt krävas två lastbärare.

Figur 18 visar att parametrarna transportavstånd och anläggningsstorlek har stor inverkan på distributionskostnaden per ton CO_2 för den enskilde anläggningen, så de verkliga biogasanläggningarnas geografiska läge och storlek kommer troligt vara det som avgör om de ur ett ekonomiskt perspektiv kan ingå i ett bio-CCS-systemet eller inte. Figur 18d togs fram för att synliggöra begränsningarna i transportavstånd och anläggningsstorlek för olika kostnadsgränsvärden eftersom den slutgiltiga avsättningen för CO_2 väntas ge just ett gränsvärde för hur mycket distributionen maximalt får kosta. Kostnaden per biogasanläggning gäller endast anläggningar som ingår i ett system som totalt producerar 20 000 ton CO_2/år och vars tömningslogistik bedrivs med en lastbärare. Figur 18 visar att transportavståndet har stor inverkan på distributionskostnaden, och när en avsättning för CO_2 är fastslagen kommer figur 18 ge en fingervisning om vilka maximala transportavstånd som kan komma att vara aktuella.

Känslighetsanalysen (figur 19) visar att kostnaden för dragbil är en viktig parameter, och om detta nyckeltal skulle komma att ändras kan det få stora konsekvenser för distributionskostnaden. Som tidigare nämnts behövs det vidare utredas om kostnaden för dragbil kan påverkas genom optimeringar, och om det finns metoder för att optimera tömningsschemat. En metod skulle kunna vara att utnyttja överkapacitet i lager för att senarelägga vissa tömningar, men figur 20 visar att även överkapaciteten har en stor inverkan på distributionskostnaden. Någon slutsats om vilken lägsta överkapacitet som är nödvändig eller vilken roll överkapacitet i lager skulle kunna ha för dragbilskostnaden har inte dragits i detta arbete. Vidare kan det konstateras att det också finns en möjlighet att släppa ut CO_2 till atmosfären om ett problem i distributionskedjan skulle uppstå. Huruvida detta är mer kostnadseffektivt än att investera i mer överkapacitet är en optimering som kan göras först när avsättningen

för CO_2 är känd. Figur 20 visar resultatet av att förändra överkapaciteten i tid (antal dagar) för alla biogasanläggningar i hela systemet, men ett annat alternativ är att optimering göras utifrån varje enskild anläggning. Om det skulle visa sig att det finns behov av att skjuta på tömningar av en specifik anläggning går det att investera i en större överkapacitet vid den enskilda anläggningen istället för hos alla.

Rörledning har ekonomisk potential för transportavstånd upp till en dryg kilometer, och distributionssystemet bedöms vara det energieffektivaste tack vare att kompression behövs till förvätskningsprocessen oavsett. Det finns en stor osäkerhet i nyckeltalet ”Röranläggning” eftersom meterkostnaden påverkas av antal hinder och lokala förutsättningar, och därför är det omöjligt att anta ett noggrant pris i generella termer. Känslighetsanalysen (figur 21) visar att en felbedömning av meterpriset om ± 30 % kan påverka det maximala transportavståndet där rörledning har ekonomisk potential på skalan 0,8 - 1,8 km. Därför kan det vara nödvändigt att göra en platsspecifik kostnadsuppskattning av röranläggningskostnaden hos alla uppgraderingsanläggningar som finnas inom ca. 2 km från terminalen.

Distribution med rörledning innebär också att en lösning behöver tas fram för samförvätskning av CO_2 med en storskalig CCS-anläggning vid terminalen. Eftersom rörledning inte är en distributionslösning som fungerar för alla transportavstånd kommer det finnas biogasanläggningar som behöver distribution med lastbil, och vid dessa anläggningar kommer det behövas byggas småskaliga förvätskningsanläggningar. Det innebär att om vissa biogasanläggningar har distributionslösningen med rörledning måste två separata systemlösningar byggas parallellt för både förvätskning och distribution, något som skulle kunna konsumera extra tid och pengar. Även om det finns ekonomisk potential för rörledning på vissa transportavstånd kan det av praktiska skäl vara enklare att investera i ett gemensamt distributionssystem för alla biogasanläggningar. Resultatet (figur 18 och 21) visar ändock att det finns potential för att vidare undersöka transport genom rörledning för stora biogasanläggningar på korta avstånd och vid förutsättning att en storskalig CCS-anläggning finns vid terminalen.

Om en rörledning skulle bli distributionslösning för någon enstaka biogasanläggning kommer detta ge den energieffektivaste distributionen. Ur ett systemperspektiv är det vägburen transport som kan bli en generell lösning. Fördelen med mobila lager är mindre installationer på biogasanläggningen, minskat pumparbete som minskar energiåtgången samt kortare ställtider. Nackdelen med mobila lager är fler lastbärare i omlopp som genererar högre fasta kostnader och en högre underhållskostnad. Resultatet av beräkningsmodellerna visar att distribution med stationära lager, genom lägre investeringskostnader, blir kostnadseffektivare trots en större installation och längre ställtider. Den lägre investeringskostnaden medför en möjlighet att erbjuda högre

överkapacitet i lager än vad som är möjligt om mobila lager används. Lagringslösning med mobila lager är något energieffektivare än distribution med stationära lager. Över det hela taget bedöms distribution genom stationära lager vara den lämpligaste distributionslösningen tack vare lägre kostnad och större flexibilitet att kunna välja högre överkapacitet i lager. En lägre kostnad innebär i slutändan en större acceptans för transportavstånd och anläggningsstorlekar, och alltså en möjlighet för fler biogasanläggningar att kunna ingå i ett bio-CCS-system. En ökad total CO_2-infångning leder till ett större negativt utsläpp och en större klimatnytta, och i slutändan är det detta som är kärnan med att tillämpa bio-CCS vid biogasanläggningar.

6 Slutsats

- För transportavstånd mellan 1-200 km är distribution med lastbil kostnadseffektivast. Distribution genom rörledning är endast kostnadseffektivt för transportavstånd $\leq$ 1 km. Distribution med tåg är inte kostnadseffektivt för transportavstånd $\leq$ 200 km.
- Den mest kostnadseffektiva lagringslösningen för lastbilsdistribution är stationära lager, och den kostnadseffektivaste lastbäraren är den med maximal lastkapacitet. Stationära lager och 30-fots container som lastbärare är det kostnadseffektivaste distributionsscenariot som simulerats i det här arbetet.
- Den mest energieffektiva distributionslösningen är rörledningstransport. För lastbilsdistribution är den energieffektivaste lagringslösningen mobila lager och den energieffektivaste lastbäraren är den med maximal lastkapacitet. Distribution med mobila lager genom 30-fots containrar är det energieffektivaste scenariot för distribution med lastbil.
- Distribution med stationära lager och 30-fots container som lastbärare bedöms övergripande vara den effektivaste och lämpligaste systemlösningen. En framtida utbyggnad av bio-CCS från biogasanläggningar med total CO_2-infångning om 20 000-60 000 ton/år och transportavstånd $\leq$ 200 km kan med denna distributionslösning erhålla:
  - Genomsnittlig distributionskostnad om 230-245 SEK/ton CO_2
  - Energianvändning för dragbil om 26-27 kWh/ton CO_2
  - Behov av 1-2 lastbärare för tömningslogistiken

7 Vidare arbete

Om ett bio-CCS-system från biogasanläggningar ska implementeras måste en terminal fastslås. När platsen är känd kan verkliga biogasanläggningars avstånd från terminalen och deras års-CO_2-produktion användas som indata i de modeller som tagits fram i det här arbetet. Detta skulle vara ett naturligt nästa steg för att erhålla simuleringar som ytterligare avspeglar ett realistiskt framtida bio-CCS-system. Att utgå från en fysisk plats är också nödvändigt för att ta reda på om det finns en storskalig CCS-anläggning vid terminalen och om det finns några biogasanläggningar på ett transportavstånd med ekonomisk potential för distribution genom rörledning.

När avsättningen för CO_2 har fastslagits kan en analys göras över vilka konsekvenser som finns kopplade till att släppa ut CO_2 om det uppstår störningar i logistikkedjan. En kostnadsanalys bör göras för att utreda vad som får störst konsekvens, att installera en för stor överkapacitet i stationära lager eller att tvingas släppa ut CO_2 ibland.

En vidare undersökning kan göras kring vad som är kostnadsdrivande för det åkeri som ska ansvara för tömningslogistiken, och om det finns några möjliga åtgärder för att skapa optimala förutsättningar för tömningslogistiken.

En ytterligare aspekt som vore en naturlig fortsättning är att studera klimatpåverkande utsläpp från bio-CCS-distributionen genom att kartlägga hur mycket CO_2 som genereras av transporterna för olika bränslen och transportsätt. Det vore även intressant att kartlägga vilken acceptans av CO_2-utsläpp per ton transporterad CO_2 som kan vara rimlig, och alltså vilket längsta transportavstånd som kan vara rimligt ur ett CO_2-effektivitetsperspektiv.

Referenser

AG Trailer (2020). Personlig kommunikation.

Air Liquide (n.d.). *Säker hantering av koldioxid - Kunskap är den bästa livförsäkringen.* URL: https://industri.airliquide.se/sakerhet/saker-hantering-av-koldioxid (hämtad 22-02-2021).

Andersson, J och D Tamm (2019). *Nytt innovativt koncept för småskalig produktion och distribution av flytande biogas.* ISBN: 978-91-88907-81-3. URL: https://www.ri.se/sites/default/files/2019-09/Sm%C3%A5skalig%20produktion%20och%20distribution%20av%20LBG_rapport.pdf (hämtad 21-03-2021).

Bauer, F m. fl. (2013). *Biogas upgrading – Review of commercial technologies.* (SGC Rapport 2013:270). URL: http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC270.pdf (hämtad 18-11-2020).

Biluppgifter (n.d.). *Fliegl SDS 420.* URL: https://biluppgifter.se/fordon/CGE04T (hämtad 31-03-2021).

Cementa - Heidelberg Cement Group (2009). *Välkommen till Cementa.* [pdf].

Cengel, Yunus A. och Michael A. Boles (2015). *Thermodynamics - An Engineering Approach.* Eighth edition in SI units. McGraw-Hill Education. ISBN: 978-981-4595-29-2.

CoolProp (2021). URL: http://www.coolprop.org/index.html (hämtad 03-05-2021).

Drivkraft Sverige (2019). *Energiinnehåll, densitet och koldioxidutsläpp.* URL: https://drivkraftsverige.se/uppslagsverk/fakta/berakningsfaktorer/energiinnehall-densitet-och-koldioxidemission/ (hämtad 31-03-2021).

Energiforsk (2016). *Biogas Upgrading – Technical Review.* (Report 2016:275). URL: http://vav.griffel.net/filer/C_Energiforsk2016-275.pdf%20Sida%209 (hämtad 10-11-2020).

Energigas Sverige (2019). *Produktion och användning av biogas och rötrester år 2018.* (ER 2019:23). URL: https://www.energigas.se/library/2622/produktion-och-anvaendning-av-biogas-och-roetrester-aar-2018.pdf (hämtad 18-11-2020).

Energimarknadsinspektionen (n.d.). *Tillstånd att anlägga vissa rörledningar.* URL: https://www.ei.se/sv/for-energiforetag/el/Natkoncession/tillstand-att-anlagga-vissa-rorledningar/ (hämtad 25-02-2021).

Equinor (2019). *Northern Lights Project Concept report.* (RE-PM673-00001). URL: https://northernlightsccs.com/en/facts-and-reports.

Gode, J m. fl. (2011). *Emissioner från transport av biodrivmedel och flytande biobränslen.* STEMFS 2011:2. URL: https://www.energimyndigheten.se/globalassets/fornybart/hallbara-branslen/hallbarhetslagen/transportexempel.pdf (hämtad 02-04-2021).

Johnsson, F och J Kjärstad (2019). *Avskiljning, transport och lagring av koldioxid i Sverige - Behov av forskning och demonstration.* ISBN: 978-91-88041-20-3. URL: https://research.chalmers.se/publication/509912/file/509912_Fulltext.pdf (hämtad 25-02-2021).

Karlsson, L-E (2020). Personlig kommunikation. Wärtsilä.

Klimatpolitiska vägvalsutredningen (2020). *Vägen till en klimatpositiv framtid.* (SOU 2020:4).

Lambton, C (2020). *Northern Lights Summit.* [Illustration]. URL: https://northernlightsccs.com/wp-content/uploads/2021/03/1-Northern-Lights-Summit-Cristel-Lambton-Facilities.pdf.

Lantbrukarnas Riksförbund (n.d.). *Biogas på gården – en introduktion.*

Lantmäteriet (n.d.). *Ledningsrätt.* URL: https://www.lantmateriet.se/sv/fastigheter/andra-fastighet/tillgang-till-annans-mark/ledningsratt/ (hämtad 25-02-2021).

Li, H m. fl. (2017). "Capturing CO2 from biogas plants". I: *13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies.* (GHGT-13). 14-18 November 2016. Lausanne, Switzerland: Elsevier Ltd. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217319409/pdf?md5=511ac758ed9f15d0b2ae19f124fde607&pid=1-s2.0-S1876610217319409-main.pdf (hämtad 11-11-2020).

Miljödepartementet (2017). "Det klimatpolitiska ramverket". I: (Artikel 12-06-2017). URL: https://www.regeringen.se/artiklar/2017/06/det-klimatpolitiska-ramverket/ (hämtad 10-11-2020).

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (n.d.[a]). *ADR-utbildning.* URL: https://www.msb.se/sv/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/farligt-gods/adr-utbildning/.

– (n.d.[b]). *Identitet – Koldioxid, kyld, flytande.* URL: https://rib.msb.se/Portal/template/pages/Kemi/Substance.aspx?id=547 (hämtad 19-02-2021).

– (n.d.[c]). *MSBFS 2020:9 föreskrifter om transport av farligt gods på väg och i terräng (ADR-S 2021).* URL: https://www.msb.se/sv/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/farligt-gods/lag-forordning-och-foreskrifter/adr-s/ (hämtad 19-02-2021).

Nationalencyklopedin (n.d.[a]). *Fas.* URL: https://www-ne-se.ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/enkel/fas (hämtad 19-02-2021).

– (n.d.[b]). *Kryogen.* URL: https://www-ne-se.ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/ordbok/svensk/kryogen (hämtad 05-42-2021).

Naturvårdsverket (2020). *Biogena koldioxidutsläpp och klimatpåverkan.* URL: https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Klimat/Tre-satt-att-berakna-klimatpaverkande-utslapp/Biogena-koldioxidutslapp-och-klimatpaverkan/# (hämtad 10-11-2020).

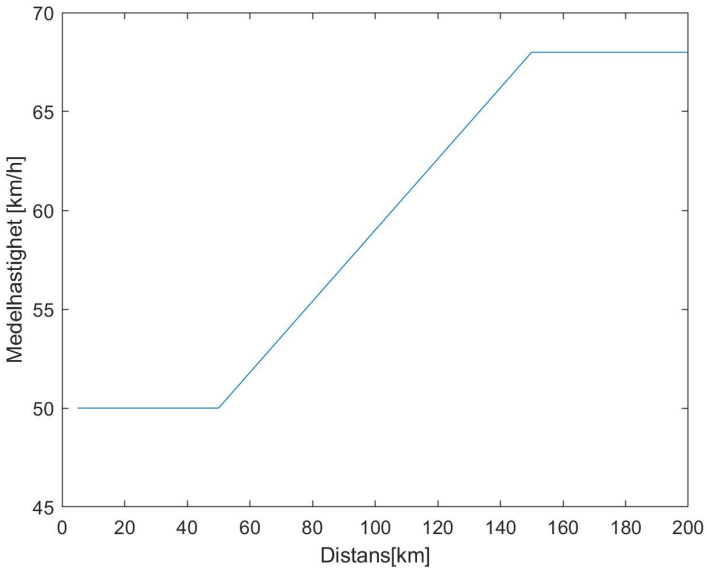
Nilsson, D (2020). Personlig kommunikation. Litra Gas AB.

Nippon Gases (2020). *Koldioxid - Den livsviktiga gasen.* URL: https://nippongases.com/se-sv/gaserna/koldioxid (hämtad 07-05-2021).
Nordell, E (2020). Personlig kommunikation. Tekniska Verken.
Persson, F (2020). Personlig kommunikation. Nippon Gases.
RISE (2020a). *Bio-CCS från biogasanläggningar.* URL: https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/projekt/bio-ccs-fran-biogasanlaggningar (hämtad 11-11-2020).
– (2020b). "Projektansökan till Energimyndigheten för projektet "Bio-CCS från biogasanläggningar"". Opublicerad.
Sundin, J (2017). *Väg eller järnväg vid transporter av gods – vad säger litteraturen?* Dnr TSJ 2017-3780. URL: https://transportstyrelsen.se/globalassets/global/publikationer/marknadsovervakning/litteraturstudie-vag-jarnvag.pdf (hämtad 11-03-2021).
Tamm, D (2021). Personlig kommunikation. RISE.
Trafikverket (n.d.). *NVDB på webb.* URL: https://nvdb2012.trafikverket.se/ (hämtad 22-02-2021).
Transportstyrelsen (2018). *Lasta lagligt - Vikt- och dimensionsbestämmelser för tunga fordon.* URL: https://www.transportstyrelsen.se/4ab665/globalassets/global/publikationer/vag/yrkestrafik/lasta-lagligt/tran045-lasta-lagligt-sve.pdf (hämtad 07-05-2021).
– (n.d.[a]). *Kör- och vilotider.* URL: https://transportstyrelsen.se/4a782b/globalassets/global/publikationer/vag/yrkestrafik/produkter/kor-och-vilotider-webb-sept-2018.pdf (hämtad 24-02-2021).
– (n.d.[b]). *Regler om kör- och vilotider.* URL: https://transportstyrelsen.se/sv/vagtrafik/Yrkestrafik/Kor--och-vilotider/regler-om-kor--och-vilotider/ (hämtad 24-02-2021).
Vattenfall AB (2020). *Delrapport - CO2-logistik till utskeppningshamn (WP4).* URL: https://www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/projektdatabas/sokresultat/?projectid=30974.
Volvo Lastvagnar (n.d.). *FM 6x4 semidragare luftfjädrad (LNG/LBG) FM 64T LA2.* URL: http://segotn12827.rds.volvo.com/STPIFiles/Volvo/ModelRange/fm64rla2_swe_swe.pdf (hämtad 24-02-2021).
Wikipedia (2021). *Carbon dioxide (data page).* [Illustration]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide_(data_page) (hämtad 04-04-2021).
Yilmaz, F (2020). Personlig kommunikation. Karbonsan.
Zero Emission Platform (n.d.). *The Costs of CO2 Transport.* URL: https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/119811/costs-co2-transport-post-demonstration-ccs-eu.pdf (hämtad 25-02-2021).

8 Appendix

8.1 Hastighetsprofil

För att kunna beräkna körtider (då modellen inte bygger på faktiska anläggningars lokalisering) gjordes en uppskattning av medelhastighet som funktion av körsträcka. Utgångspunkten är en hastighetsprofil från en rapport om distribution av LBG (Andersson och Tamm 2019), men efter samtal med transportföretaget Litra Gas gjordes vissa modifikationer (Nilsson 2020). Den framtagna hastighetsprofilen som används i beräkningsmodellerna presenteras i figur 22.



Figur 22: Medelhastighet som funktion av kördistans

De approximerade körtiderna utifrån hastighetsprofilen kontrollerades mot simuleringar i logistikprogrammet *PTV Route Optimiser* med god överensstämmelse.

8.2 Bränsleförbrukning

Åkeriföretaget Litra har lastbärare som tillsammans med dragbil får en total ekipagevikt om 25-30 ton (utan last) och med lastkapacitet om 25-32 ton. Lastbärarna ger alltså en total ekipagevikt (vid full last) mellan 50-62 ton. Dessa lastbärare medför en genomsnittlig diselförbrukning för dragbilen om 0,35 l/km (ibid.). Baserat på detta görs antagandet att en lastbärare som totalt väger 56 ton och har en chassivikt på 27,5

ton och en ”payload” på 28,5 ton har den exakta genomsnittliga dieselförbrukningen 0,35 l/km.

I litteratur anger en annan källa att dieselförbrukningen för ett fullastat ekipage med 33 ton last är 0,445 l/km, och utan last är förbrukningen 0,246 l/km (Gode m. fl. 2011). Genom att lösa följande ekvation ger värdet för x dieselförbrukningsökningen per ton last och km:

0,246+(x*33)=0,445 => x=0,006 l/ton last och km.

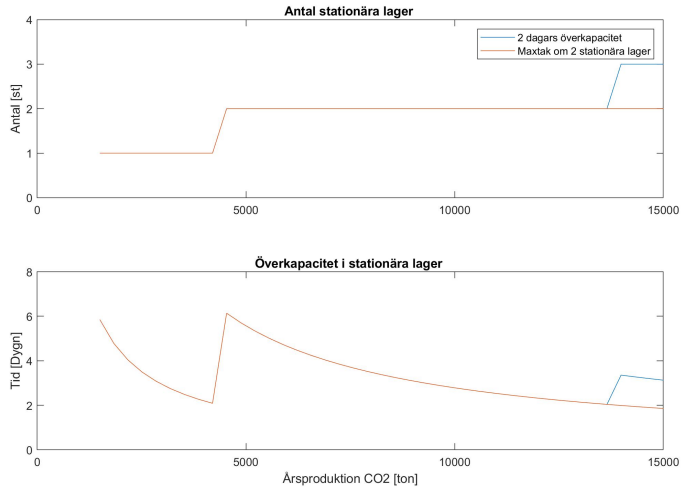
Bränsleförbrukningen för Litras dragbilar har använts som utgångspunkt eftersom de utför gastransporter, och de borde därför ha mycket liknande transportförutsättningar som vid transport av LCO_2 från biogasanläggningar. Faktorn som beräknades ovan adderades för att få fram olika bränsleförbrukningar baserade på lastbärarnas olika totalvikter. Ekvationen nedan illustrerar hur bränsleförbrukningarna för respektive lastbärare i detta arbete togs fram baserat på både Litras snittförbrukning och den lastviktsberoende bränsleförbrukningsfaktorn.

0,35+(lastkapacitet -28,5)*0.006.

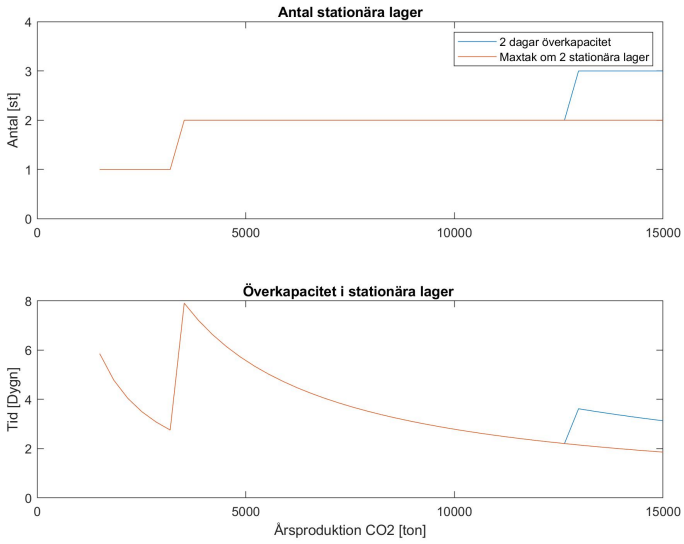
För varje extra ton i last utöver 28,5 ton ökar förbrukningen med 0,006l/km ton och vice versa.

8.3 Optimering av scenario med stationära lager

Det första steget i arbetet med att optimera distributionsscenariona med stationära lager var att bestämma antalet stationära lager för olika biogasanläggningsstorlekar. Figur 23 och 24 visar antal parallellkopplade stationära lager för respektive biogasanläggningsstorlek och den korresponderande överkapaciteten mätt i tid.



Figur 23: Överkapacitet mätt i tid för scenario med stationära lager och specialbyggd semitrailer som lastbärare

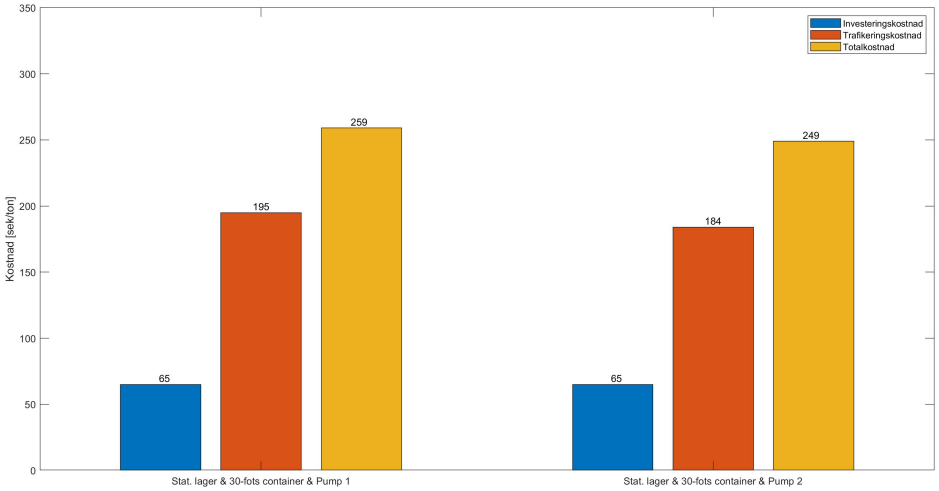


Figur 24: Överkapacitet mätt i tid för scenario med stationära lager och 30-fots container som lastbärare

Som tidigare nämnts i rapporten var två dagars överkapacitet utgångspunkten. Den blå linjen i den övre figuren i figur 23 och 24 visar antalet stationära lager om två dagar överkapacitet alltid ska uppfyllas. Figurerna visar att det är ett mycket litet

spann av anläggningsstorlekar som hade behövt tre stationära lager. Om endast de allra största biogasanläggningarna ligger lite under två dagar överkapacitet borde dessa kunna prioriteras i för tömning i ett bio-CCS-system. De undre figurerna i figur 23 och 24 visar dessutom att överkapaciteten hade blivit mycket nära två dagar för samtliga anläggningar även om ett tak om 2 parallellkopplade stationära lager ansätts. För att kostnadsoptimera sattes därför 2 parallellkopplade stationära lager som tak i beräkningsmodellerna.

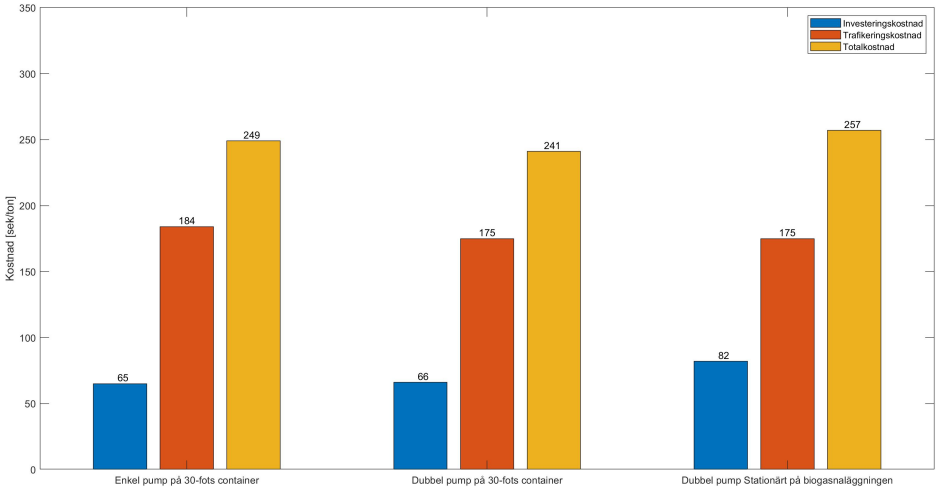
Nästa steg var att optimera pumpkapaciteten. Figur 25 visar distributionskostnaden för scenariot med stationära lager och 30-fots container som lastbärare utrustad med en pump av den lägre pumpkapaciteten (Pump 1) och med den högre (Pump 2). Då kostnaden för pumparna är mycket låg i förhållande till totala investeringskostnaderna ger byte från Pump 1 till Pump2 inte något utslag i stapeln för investeringskostnader. Däremot ses att trafikeringskostnaden minskar med drygt 10 kr/ton CO_2 tack vare minskad ställtid genom högre pumpkapacitet. Resultatet indikerar att det finns potential att minska distributionskostnaden ytterligare vid ytterligare utökad pumpkapacitet.



Figur 25: Jämförelse av distributionskostnad för scenario med stationära lager och 30-fots container som lastbärare utrustad med en Pump 1 och en Pump 2

För att öka pumpkapaciteten ytterligare beräknades distributionskostnaden med två parallellkopplade pumpar av Pump 2. Ett test gjordes även om det är mest fördelaktigt att ha två parallellkopplade pumpar installerade stationärt på biogasanläggningarna eller mobilt på lastbäraren. Figur 26 illustrerar resultatet. Likt i figur 25 är vins-

ten i trafikeringskostnader vid dubbel pumpkapacitet betydligt större än förlusten i investeringskostnader. Figur 26 visar också att det är mer kostnadseffektivt att installera pumparna på lastbäraren och inte på biogasanläggningarna. Detta var ett väntat resultat då några få lastbärare klarar tömningslogistiken för många biogasanläggningar.

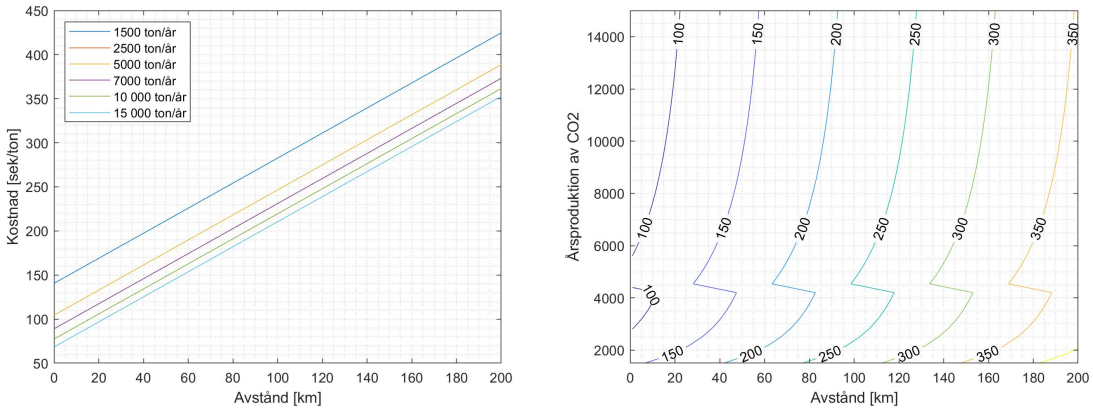


Figur 26: Jämförelse av distributionskostnad för scenario med stationära lager och 30-fots container som lastbärare och olika pumpkonfigurationer av Pump 2

Förutom att två parallellkopplade pumpar innebär lägre distributionskostnad genom dubbel pumpkapacitet innebär det också att det alltid finns en ”back-up” ifall den ena pumpen skulle gå sönder.

8.4 Distributionskostnad för en enskild biogasanläggning vid distributionslösning med stationära lager och specialbyggd semitrailer som lastbärare

I avsnitt 5.1 presenteras resultatet att det kostnadseffektivaste lastbilsscenariot är distribution med stationära lager och 30-fots container som lastbärare. Det skulle ändå kunna finnas intresse av att använda den specialbyggda semitrailern som lastbärare eftersom det är en standardlösning, och kanske finns det åkerier som redan har godkända lastbärare för LCO_2-transport. Figur 27 visar total distributionskostnad för den enskilda anläggningen om distribution sker med stationära lager och specialbyggd semitrailer som lastbärare.



(a) Total distributionskostnad

(b) Gränsvärden för kostnadsnivåer

Figur 27: Distributionskostnad för enskild biogasanläggning vid distribution med stationära lager och specialbyggd semitrailer som lastbärare

Distributionskostnaden i figur 27 gäller biogasanläggningar som ingår i ett bio-CCS-system som totalt producerar 20 000 ton CO_2/år och där en lastbärare behövs för tömningslogistiken.

8.5 Fönster av CO_2-produktionsstorlekar och transportavstånd för biogasanläggningar där distribution genom rörledning är kostnadseffektivare än distribution med lastbil

Tabell 19 visar för vilka transportavstånd och produktionsstorlekar av CO_2 som distribution med rörledning är kostnadseffektivare än distribution med stationära lager och specialbyggd semitrailer och lastbärare.

Tabell 19: Distributionskostnad i enheten SEK/ton för CO_2-transport i rörledning då detta är kostnadseffektivare än vägburen distribution med stationära lager och specialbyggd semitrailer som lastbärare

CO_2 [ton/år]	0.2 km	0.4 km	0.6 km	0.8 km	1 km	1.2 km	1.4 km
1500	120						
3750	48						
6000	30	60	90				
8250	22	44	65				
10500	17	34	51	69			
12750	14	28	42	56	71		
15000	12	24	36	48	60		

SLU
Institutionen för energi och teknik
Box 7032
750 07 UPPSALA
Tel. 018-67 10 00
pdf.fil: www.slu.se/energiochteknik

SLU
Department of Energy and Technology
P. O. Box 7032
SE-750 07 UPPSALA
SWEDEN
Phone +46 18 671000