

Jaran Skeie Carlsen  
Stian Gunnerød  
Natalia Jagiello

# Karbonkompensasjonsløsninger for OKEA ASA: en komparativ analyse

Carbon Offsetting Solutions for OKEA ASA: A  
Comparative Analysis

Bacheloroppgave i Kjemiingeniør  
Veileder: Ina Merete Stuen  
Medveileder: Marianne Melgård  
Mai 2023



Jaran Skeie Carlsen  
Stian Gunnerød  
Natalia Jagiello

# **Karbonkompensasjonsløsninger for OKEA ASA: en komparativ analyse**

Carbon Offsetting Solutions for OKEA ASA: A  
Comparative Analysis

Bacheloroppgave i Kjemiingeniør  
Veileder: Ina Merete Stuen  
Medveileder: Marianne Melgård  
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for naturvitenskap  
Institutt for materialteknologi



Kunnskap for en bedre verden





NTNU

---

# KARBONKOMPENSASJONSLØSNINGER FOR OKEA ASA: EN KOMPARATIV ANALYSE

---

## CARBON OFFSETTING SOLUTIONS FOR OKEA ASA: A COMPARATIVE ANALYSIS

Jaran Skeie Carlsen, Stian Gunnerød og Natalia Jagiello

Bacheloroppgave, Kjemiingeniør

Prosjektnummer: IMA-B-2-2023

Innlevert: 20.05.2023

Gradering: Åpen

Intern veileder: Ina Merete Stuen

Oppdragsgiver: OKEA ASA

Ekstern veileder: Marianne Melgård



Institutt for materialteknologi



## Forord

Denne rapporten er utarbeidet i samarbeid med olje- og gasselskapet OKEA ASA som avsluttende bacheloroppgave ved Institutt for materialteknologi ved NTNU i Trondheim. Oppgaven er skrevet våren 2023, og er utarbeidet som en strategi for å kompensere for selskapets klimautslipp, og tar utgangspunkt i behovet for endring mot klimanøytralitet. Rapporten dokumenterer hvordan et olje- og gasselskap kan løse klimautslippene sine. Den viser også hvilke utslippsreducerende tiltak som kan utføres generelt i samfunnet for å nå internasjonale klimamål.

Vi har vært svært heldig med oppgaven vi har fått. Den er interessant, lærerik og relevant på tvers av ulike fag nasjonalt og internasjonalt. Vi har fått muligheten til å gjennomføre en viktig og dagsaktuell fordypning innen bærekraft, og ulike miljøaspekter i olje- og gassvirksomheten. Det har gitt en god forståelse for miljøspørsmål dagens og fremtidens næringsliv står over for. Dette har gitt oss en unik kunnskap, som vil være nyttig i både videre studier og i arbeidslivet. I bacheloroppgaven har vi fått benyttet tidligere erfaringer med litteratursøk og rapportskrivning som vi har utviklet gjennom ingeniørstudiet på NTNU.

Vi ønsker å benytte anledningen til å takke OKEA ASA for denne spennende muligheten til å skrive denne rapporten. Vi er spesielt takknemlig overfor ekstern veileder Marianne Melgård i OKEA ASA. Melgård presenterte oppgaven til oss, og har rettleidet oss underveis i prosjektet. Videre ønsker vi også å takke intern veileder Ina Merete Stuen, for god oppfølging og veiledning gjennom utførelsen av bacheloroppgaven.



---

Jaran Skeie Carlsen



---

Stian Gunnerød



---

Natalia Jagiello





## Sammendrag

Formålet med bacheloroppgaven var å undersøke karbonkompensasjonsløsninger, og hvordan OKEA kan benytte metodene for å kompensere for sine utslipp. I tillegg skulle det undersøkes hvordan andre olje- og gasselskap på norsk sokkel kompenserer for sine utslipp.

Ved grundig litteratursøk ble både naturbaserte og teknologibaserte løsninger undersøkt. Naturbaserte løsninger omfatter bærekraftig skogbruk, karbonlandbruk, biokull, dyphavslagring og restaurering av blå hav. Teknologibaserte løsninger omfatter Carbon Capture and Storage (CCS), Direct Air Capture and Carbon Storage (DACCS) og Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS). I tillegg er det flere mindre utviklede metoder som Indirect Ocean Capture (IOC), havalkalisering, havgjødsling, karbonlagring i ørken og økt forvitring.

På bakgrunn av teorien, ble de beste karbonkompensasjonsløsningene bestemt ved hjelp av Analytical Hierarchy Process (AHP) modellen. Løsningene ble vurdert opp mot hverandre basert på flere kriterier, som kostnad, politikk, etc. Prioriteringen av de ulike kriteriene ble fastlagt i samarbeid med Marianne Melgård.

Resultatene fra AHP viste at den beste metoden er CCS, etterfulgt av bærekraftig skogbruk og karbonlandbruk. Andre metoder som biokull, DACCS og BECCS hadde omtrentlig lik prioritet. Vår anbefaling skiller seg fra AHP-resultatene. Dette skyldes at OKEA må benytte seg av løsninger der risikoen for grønnvasking er lav. Det handler om troverdigheten til selskapet. Vår anbefaling er derfor først og fremst å benytte seg av CCS, deretter biokull og bærekraftig skogbruk. Sistnevnte kan byttes ut med restaurering av blå hav når det blir mulig. DACCS, BECCS, CO<sub>2</sub>-mineralisering og dyphavslagring har stort potensiale, og er derfor metoder som bør ha tett oppfølging. Metodene er ikke en del av vår anbefaling på grunn av høye kostnader, tidlig utviklingsstadium og foreløpig lite tilgjengelig. Andre metoder som IOC, havgjødsling, økt forvitring og havalkalisering, ble forkastet. Dette skyldes at metodene er i et tidlig utviklingsstadium, har høye kostnader og politiske utfordringer.



## Abstract

The aim of the bachelor's thesis was to investigate carbon offset solutions, and how OKEA can utilize these methods to offset their emissions. Additionally, the offsetting practices of other oil and gas companies on the Norwegian continental shelf were examined.

Through a comprehensive literature review, both nature-based and technology-based solutions were explored. Nature-based solutions include sustainable forestry, carbon farming, biochar, deep ocean storage and blue ocean restoration. Technology-based solutions include Carbon Capture and Storage (CCS), Direct Air Capture with Carbon Storage (DACCS), and Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS). Furthermore, there are several less-developed methods such as Indirect Ocean Capture (IOC), ocean alkalization, ocean fertilization, carbon storage in deserts, and enhanced weathering.

Based on the theory, the best carbon offset solutions were determined using the Analytical Hierarchy Process (AHP) model. The solutions were evaluated against each other based on various criteria, such as cost, policy, etc. The prioritization of the different criteria was determined in collaboration with Marianne Melgård.

The results from AHP suggested that the best method is CCS, followed by sustainable forestry and carbon farming. Other methods such as biochar, DACCS, and BECCS were approximately equal ranked. However, our recommendation differed from the AHP results. This is because OKEA needs to utilize solutions with low risks of greenwashing to create credibility for the company. Therefore, our recommendation is primarily to employ CCS, followed by biochar and sustainable forestry. The latter can be replaced with blue ocean restoration when possible. DACCS, BECCS, CO<sub>2</sub> mineralization and deep ocean storage are methods that should be closely monitored due to their high potential. However, due to their significant costs, low developmental stage, and limited availability, these methods are not part of our recommendation. Other methods such as IOC, ocean fertilization, enhanced weathering, and ocean alkalization, were rejected. This is due to their low developmental stage, high costs, and political challenges.



## Innholdsfortegnelse

<b>FORORD</b> .....	<b>II</b>
<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VI</b>
<b>AKRONYMER</b> .....	<b>X</b>
<b>DEFINISJONER</b> .....	<b>XI</b>
<b>1. INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1 BAKGRUNN FOR RAPPORTEN .....	1
1.2 PROBLEMSTILLING .....	2
<b>2. TEORI</b> .....	<b>3</b>
2.1 KARBONKVOTER OG CO <sub>2</sub> -AVGIFT .....	3
2.2 HAVET SOM ET KARBONLAGER .....	4
2.2.1 <i>Blue carbon som en løsning for karbonfangst</i> .....	5
2.2.2 <i>Dyphavslagring av karbondioksid</i> .....	10
2.3 LANDBASERT KARBONLAGRING .....	14
2.3.1 <i>Bærekraftig skogbruk som et karbonlager</i> .....	14
2.3.2 <i>Karbonoptak med biokull</i> .....	19
2.3.3 <i>Lagring av karbon i jorda ved karbonlandbruk</i> .....	22
2.4 TEKNOLOGIBASERT KARBONLAGRING .....	25
2.4.1 <i>Karbonfangst og -lagring (CCS)</i> .....	25
2.4.2 <i>Direct Air Capture and Carbon Storage (DACCS)</i> .....	31
2.5 ANDRE TEKNOLOGIER SOM KAN LAGRE KARBON .....	37
2.5.1 <i>Karbonlagring ved økt forvitring</i> .....	37
2.5.2 <i>Karbonfangst ved hjelp av havalkalisering</i> .....	38
2.5.3 <i>Havgjødsling som en metode for karbonlagring</i> .....	39
2.5.4 <i>CO<sub>2</sub>-mineralisering</i> .....	41
2.5.5 <i>Indirect Ocean Capture</i> .....	43
2.5.6 <i>Karbonlagring i ørken</i> .....	44
2.5.7 <i>Karbonlagring ved hjelp av nanoteknologi</i> .....	44
2.6 OVERSIKTSBILDE .....	45
2.7 KARBONKOMPENSASJONSSTRATEGIEN TIL ANDRE BEDRIFTER .....	46
2.7.1 <i>Wintershall DEA</i> .....	46
2.7.2 <i>Norske Shell</i> .....	47
2.7.3 <i>Repsol Norge</i> .....	47

2.7.4 Neptune Energy Norge .....	48
2.7.5 TotalEnergies EP Norge .....	48
2.7.6 Sval Energi .....	49
<b>3. METODE OG RESULTAT .....</b>	<b>50</b>
3.1 METODE .....	50
3.2 RESULTAT .....	54
<b>4. DISKUSJON .....</b>	<b>56</b>
4.1 VURDERING AV KARBONMARKEDET .....	56
4.2 SAMMENLIGNING AV ALTERNATIVER PÅ BAKGRUNN AV ULIKE FAKTORER .....	57
4.2.1 Vurdering av alternativer på bakgrunn av kostnad .....	57
4.2.2 Vurdering av potensial og varighet ved ulike alternativer .....	58
4.2.3 Vurdering av tilgjengelighet og utviklingsstadium ved ulike alternativer .....	59
4.2.4 Vurdering av fordeler og ulemper ved alternativene .....	60
4.2.5 Vurdering av alternativene på bakgrunn av grønnvaskingsrisiko .....	61
4.2.6 Vurdering av andre teknologier .....	62
4.3 ANALYSE AV AHP RESULTATET .....	62
4.4 VURDERING AV DAGENS KARBONMARKED .....	63
4.5 VURDERING AV REFERANSER OG FEILKILDER .....	64
4.6 VÅR ANBEFALTE KARBONKOMPENSASJONSSTRATEGI FOR OKEA ASA .....	65
4.6.1 Fremstilling av vår anbefalte karbonkompensasjonsstrategi .....	66
4.6.2 Vurdering av alternativer vi utelukker .....	67
<b>5. KONKLUSJON .....</b>	<b>69</b>
<b>REFERANSELISTE .....</b>	<b>70</b>
<b>VEDLEGGSLISTE .....</b>	<b>85</b>
<b>VEDLEGG A .....</b>	<b>I</b>
TABELLER OG UTREGNING FOR AHP .....	I

## Akronymer

**A&R** – Afforestation and Reforestation

**AHP** – Analytical Hierarchy Process

**BECCS** – Bioenergy with Carbon Capture and Storage

**CCS** – Carbon Capture and Storage

**CCUS** – Carbon Capture Utilisation and Storage

**CDR** – Carbon dioxide removal

**CORC** – CO<sub>2</sub> Removal Certificate

**DACCS** – Direct Air Capture and Carbon Storage

**DACCU** – Direct Air Capture and Carbon Utilisation

**Foepd** – Fat oljeekvivalenter per dag

**Gt** – Gigatonn

**GWP** – Global Warming Potential

**IGCC** – Integrated Gasification Combined Cycle

**IOC** – Indirect Ocean Capture

**LEAF** – Lowering Emissions by Accelerating Forest finance

**Mt** – Megatonn

**REDD** – Reduced Emissions from Deforestation and Degradation

**TRL** – Technology Readiness Level

## Definisjoner

**Addisjonalitet** – faktisk virkning av tiltaket

**Anoksi** – en tilstand hvor der er fullstendig mangel på oksygen

**CO<sub>2</sub>-ekv.** – CO<sub>2</sub>-ekvivalenter: en enhet som omgjør effekten av ulike klimagassutslipp til CO<sub>2</sub> verdier i henhold til GWP-verdier av de ulike gassene

**Eutrofiering** – økt planteproduksjon i hav eller overflatevann grunnet tilføring av næringsstoffer

**Karbonnegativitet** – aktiviteter som i sum bidrar til å fjerne CO<sub>2</sub> fra atmosfæren

**Karbonnøytralitet** – aktiviteter som i sum ikke bidrar til økt CO<sub>2</sub> i atmosfæren

**Offsets** – engelsk ord som forklarer reduksjon eller fjerning av klimagasser som en kompensasjon for utslipp oppstått andre steder

**Sekvestrering (carbon sequestration)** – langtidslagring av karbon



## 1. Innledning

### 1.1 Bakgrunn for rapporten

OKEA ASA ble grunnlagt i 2015, og fokuserer på utbygging og drift av «mid- to-late-life» oljeplattformer på den norske kontinentalsokkelen. Dette går ut på å ta over driften av oljeplattformer i sin midtfase, og forsøke å øke levetiden, fremfor å bygge nye oljeplattformer. Selskapet ble grunnlagt av Ola Borten Moe, Knut Evensen, Eirik Haugane og Anton Tronstad. Derav kommer navnet OKEA.

I dag består bedriften av om lag 400 ansatte, med hovedkontor i Trondheim. OKEA er operatør for feltene Draugen og Brage, hvor de eier henholdsvis 44,56 % og 35,2 %. I tillegg eier de mellom 6-15 % av en rekke andre felter [1]. I første kvartal 2023 produserte selskapet 22 210 fat oljeekvivalenter per dag (foepd) [2].

Grunnet økende utfordringer med klimagassutslipp i atmosfæren har alle en global plikt til å ta ansvar for konsekvensene. Sett i lys av global oppvarming og problemene som medfører, ble Parisavtalen inngått i 2015. Hovedpunktene i Parisavtalen går ut på at alle land har forpliktelser til å sørge for at temperaturen ikke stiger mer enn 2 grader før århundret er over. Optimalt skal landene forsøke å holde temperaturstigningen på under 1,5 grader. Parisavtalen fastslår at de rikeste landene har et samlet økonomisk ansvar for å hjelpe fattigere land med å kutte utslipp [3]. Tiltakene skal resultere i jevnt synkende klimagassutslipp og deretter en klimanøytral klode i slutten av andre del av århundret [3]. En grønn omstilling blir derfor mer og mer aktuell for industrien i Norge. Petroleumssektoren er Norges fremste industri. Den er en av de største kildene til klimagassutslipp og blir også fysisk påvirket av klimaendringene. OKEA erkjenner behovet for å følge målene i Parisavtalen og jobber kontinuerlig med å redusere utslippene sine [4].

OKEA har forpliktet seg til å redusere negativ miljøpåvirkning gjennom ulike tiltak. I 2021 bidro selskapet i en klimastrategi ved navnet «The energy industry of tomorrow on the Norwegian continental shelf» utarbeidet av Konkraft. Den definerer diverse mål som skal oppnås innen 2030 og 2050. Målene Konkraft har satt er en 40 % reduksjon i klimagassutslipp innen 2030, sammenlignet med 2005. Innen 2050 skal utslippene være nær null for den norske petroleumssektoren [5]. I 2021 etablerte OKEA en dekarboniseringsstrategi for sine opererte felter i produksjon. Primære mål for bedriften er å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp fra faking med 6 % innen 2025, og eliminere faking innen 2030. Innen 2025 skal også metanutslippene og andre flyktige organiske forbindelser reduseres med 80 %,

samt redusere metanintensiteten til nært null innen 2030. I tillegg har OKEA besluttet å elektrifisere Draugen, noe som vil bidra til 95 % reduksjon i CO<sub>2</sub>-utslippene innen 2025 [6].

## 1.2 Problemstilling

For å klare å oppnå målene til Parisavtalen, samt selskapets egne mål, ble denne oppgaven satt i gang i samarbeid med OKEA for å se på mulige karbonfangstløsninger. OKEA ønsker å fordype seg i tematikken, for å ha muligheter til å kunne anvende ulike løsninger.

Oppgaven er basert på et litteratursøk, samt kontakt med relevante fagpersoner, for deretter å lage en oversikt over tilgjengelige løsninger for å kompensere for karbonutslipp. Løsningene skal deretter sammenlignes på ulike grunnlag. Faktorene som tilgjengelighet, potensialet til å ta opp CO<sub>2</sub>, økonomisk lønnsomhet, og tid skal dokumenteres i en oversikt. Rapporten inkluderer også en oversikt over hvordan andre operatører på den norske kontinentalsokkelen kompenserer for utslippene sine. Ut ifra dokumentert informasjon om de ulike løsningene skal det utformes en anbefaling for OKEA's karbonkompensasjonsstrategi.

## 2. Teori

Carbon offset, også referert til som karbonfangst eller karbonkompensasjon, er løsninger som har som mål å fjerne eller redusere menneskeskapte klimautslipp. Hensikten er å minimere menneskelig påvirkning på global oppvarming, og på den måten gjøre selskaper klimanøytrale. De totale utslippene globalt i 2021 var på 52,8 Gt CO<sub>2</sub>-ekvivalenter [7]. OKEA ASA slapp ut 249 641 tonn klimagass fra scope 1 og 2 i 2022. Scope 1 er klimagassutslipp direkte fra eide eller kontrollerte kilder, og scope 2 er indirekte utslipp fra kjøpt eller generert energi [4].

I dette kapittelet er det satt fokus på de største løsningene for karbonfangst innen områdene hav, land og teknologi. På havet er det fokus på blue carbon, som omfatter blå skoger hvor karbon lagres via fotosyntesen. Andre metoder på hav er havgjødsling og dyphavslagring. Disse metodene fører med seg en del utfordringer som er avhengig av mer forskning. På land er det største markedet skogbruk, som inkluderer skogplanting og vern av skogområder. I tillegg er det satt fokus på karbonlandbruk, som er en naturlig kilde til karbonfangst. En annen løsning på land er biokull, der fornybar biomasse blir omgjort til kull, noe som gjør at karbon kan holdes stabilt over en lengre periode. Fremtredende forskning på karbonkompensasjon via teknologi omhandler løsninger som Carbon Capture and Storage (CCS), Direct Air Capture and Carbon Storage (DACCS) og Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS). Disse løsningene fokuserer på å fjerne CO<sub>2</sub> fra atmosfæren, og langtidslagre det trygt under jordens overflate. Andre mindre utviklede teknologier som blir presentert i dette kapittelet er økt forvitring, havkalking, ørken som en mekanisme for karbonfangst, nanoteknologi, CO<sub>2</sub>-mineralisering og Indirect Ocean Capture (IOC).

### 2.1 Karbonkvoter og CO<sub>2</sub>-avgift

Karbonkvoter, også kalt klimakvoter, er et tiltak innført i ulike deler av verden som et tiltak for å redusere utslipp [8]. Karbonmarked deles inn i regulerte og frivillige karbonmarkeder [9]. I denne oppgaven blir kvoter fra frivillige markeder omtalt som kreditter. Det finnes flere forskjellige regulerte markeder, og et eksempel er EUs kvotehandelssystem, EU ETS. Det ble opprettet av EU i 2005 for å regulere utslippene til industrien. I EU ETS gir én kvote rett til å slippe ut ett tonn CO<sub>2</sub> eller CO<sub>2</sub>-ekvivalenter, og alle kvotepliktige selskaper må levere inn like mange kvoter som de har sluppet ut. Dersom et selskap har større utslipp enn antall kvoter tillater, må det betales en kvoteavgift på 100 euro per tonn CO<sub>2</sub>. Det er et maks tak på kvoter som er tilgjengelige. Fra og med fjerde fase av EU ETS

(2021-2030) reduseres tilgjengelige kvoter med 2,2 prosent hvert år. I denne fasen er det heller ikke tillatt å benytte seg av karbonkreditter fra det frivillige markedet [9, 10].

Kvotesystemet gjør det mulig å kjøpe kvoter på et kvotemarked. Prisen på kvotene styres av forespørselen, og vil i fremtiden øke grunnet færre tilgjengelige kvoter [10]. Flere oljeselskap forsøker å redusere utslippene sine ved hjelp av eksempelvis elektrifisering, men for å bli karbonnøytrale må bedriftene kompensere for resterende utslipp. Dette har skapt interesse for karbonkreditter fra det frivillige markedet. Dette markedet er uregulert og kan være vanskelig å standardisere. En karbonkreditt oppstår når et prosjekt kan dokumentere at tiltakene har enten forhindret utslipp eller tatt opp ett tonn CO<sub>2</sub>. For å skape troverdighet til kreditten blir aktørene, som selger kredittene, verifisert av anerkjente standarder som International Organization for Standardization (ISO), Verified Carbon Standard (Verra), The Gold Standard, Climate Action Reserve og Plan Vivo [9]. For at en karbonkreditt oppnår god kvalitet er det viktig at kreditten fører til addisjonalt (faktisk virkning av tiltaket), langvarig lagring og eksklusivitet. Eksklusivitet betyr at kreditten ikke blir dobbelttelt, og dette oppnås når kreditten slettes fra markedet etter at den er kjøpt. I tillegg er det viktig at en kreditt faktisk tar opp eller forhindrer utslipp av ett tonn CO<sub>2</sub>, og ikke bidrar til grønnvasking. Det er forventet at forskjellen på kreditter og kvoter i fremtiden blir vanskeligere å skille [9].

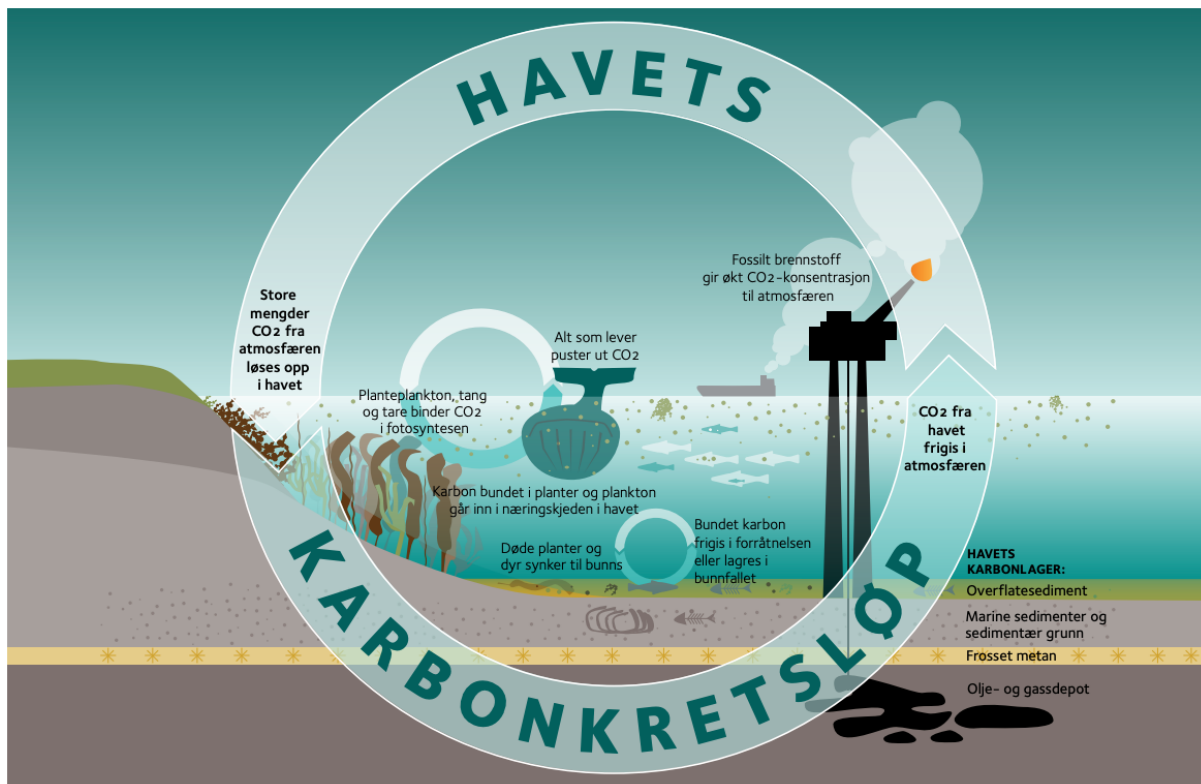
## 2.2 Havet som et karbonlager

Havet dekker om lag 70 % av jordoverflaten vår, og ifølge World Wide Fund for Nature (WWF) utgjør det 93 % av de globale karbonlagrene [11, 12]. Gjennom de siste 200 årene har havet stått for lagring av 30-39 % av menneskeskapt karbonutslipp [12, 13]. Den største andelen av karbonet ligger oppløst i dyphavet. Andre kilder til karbonlagring er havbunnens overflatesedimenter og blå skog nær kysten, som er en fellesbetegnelse på vegetasjonen i havet [14]. Havet inneholder også store, komplekse og sammenkoblede økosystemer som egner seg til karbonbinding, noe som er viktig å bevare.

I dagens utfordringer med global oppvarming og klimagassutslipp, blir også havet og dens liv rammet. Eksempelvis blir blå skog degradert med en rate på 2-7 % hvert år [15]. Dette fører med seg ulemper for både det biologiske mangfoldet i havet og kystvernet som hindrer flom og storm.

Det finnes i dag flere forskningsprosjekter som sikter på å bruke havet til karbonfangst. Blue carbon, havgjødsling og dyphavslagring for å nevne noen. Fellesnevneren for alle potensielle løsninger er utfordringer med karbonkretsløpet i havet, samt de komplekse økosystemene. Havets karbonkretsløp

blir presentert i Figur 1, og omhandler karbonets rolle i havet og hvordan den samspiller med atmosfæren og økosystemer.



Figur 1: Illustrasjon av havets karbonkretslop [16].

Karbonet blir langtidslagret ved å synke ned til bunnen og bli samlet ned i sedimentene. Ved hjelp av fotosyntesen vil mikroorganismer som planteplankton, samt blå skoger, omgjøre CO<sub>2</sub> fra atmosfæren til biomasse, og deretter inngå i næringskjeden. Når organismer som har tatt opp CO<sub>2</sub> lagres varig på havbunnen, kalles dette biologisk karbonpumpe. Denne pumpen vil presse ned karbon i form av ekskrementer og døde celler. Alle avdøde marine organismer synker ned til bunnen, og det som ikke blir brutt ned av bakterier blir langtidslagret i sedimentene [17]. Karbon som ikke blir bundet blir remineralisert gjennom respirasjon, og deretter sluppet ut i atmosfæren igjen [18].

### 2.2.1 Blue carbon som en løsning for karbonfangst

Blue carbon refererer til lagring av karbon i kystnære- og marine økosystemer, som mangrover, tidevannsmyrer, sjøgress, tang og tare, og dype hav, eller samlet sett «blå skog». Ødeleggelse av slike økosystemer fører til at karbonet blir sluppet ut igjen. Prosjekter går ut på bevaring og restaurering av blå karbonøkosystemer [19]. Blå skog dekker 10 000 km<sup>2</sup> i Norge og består for det meste av stortare

og sukkertare [20]. I verden dekker blå skoger omtrent 49 millioner hektar [21]. Disse blå skogene har krympet i størrelse, noe som fører med seg konsekvenser for miljøet og det biologiske mangfoldet. Ifølge havforskningsinstituttet har 40-60 % tareskog på kloden hatt en tilbakegang i løpet av de 10 siste årene [20]. The Blue Carbon Initiative opplyser at et estimat på 1,02 milliarder tonn CO<sub>2</sub> blir frigitt av degraderte blå skoger årlig [21]. Prosjekter for å forhindre videre degradering kan mulig i fremtiden kjøpes i form av karbonkreditter.

#### 2.2.1.1 Bruken av blue carbon og potensialet det har til å lagre karbon

Tareskoger lagrer karbon i biomasse og sedimenter ved hjelp av fotosyntesen. Når taren på en eller annen måte kommer seg ned til havbunnen begravnes den, og blir dermed langtidslagret, eller med andre ord sekvestrert. Karbonet kan på denne måten være bundet i flere hundre år [22]. Det er flere måter de forskjellige skogene kan lagre karbonet over lengre tid. Internasjonalt er det fokus på mangrover, som er trær tilpasset livet i vann. Mangroveskogene lagrer karbon ved å fange opp CO<sub>2</sub> fra atmosfæren, og deretter lagre det i røttene og sedimentene under dem. I Norge er det mest tareskoger, som arbeider på en annen måte for å sekvestrere karbon. Tareskoger tar opp CO<sub>2</sub> i bladene sine, som etter hvert havner i havet. Bladene vil strømme med vannet og gå inn i karbonsyklusen igjen ved å bli spist av havdyr. For å bli langtidslagret må de synke ned til bunnen og bli lagret i sedimentene. Tareskoger vokser fort, og får nye blader hvert år, noe som gjør at kapasiteten er kontinuerlig. For at bladene skal nå havbunnen på optimal dybde, er det viktig at de ikke blir nedbrutt før de rekker å komme ned. Kulde er en av faktorene som hindrer nedbrytingen av tareblader, noe som gjør Norge til en god ressurs for denne type lagring [23].

Forskjellige metoder blir brukt til å forhindre karbonutslippet fra blå skoger. De går ut på bevaring, restaurering og opprettelse. Dette har en dobbel innvirkning på karbonutslippene, da økosystemer blir hindret i å slippe ut karbondioksid, samtidig som fremtidig kapasitet blir beskyttet. Bevaring av blå skog kan oppnås gjennom lovgivninger og støtte. Sedimentering og vannforsyning er også noen metoder som støtter denne tilnærmingen [19]. Restaurering går ut på blant annet gjenplantning av hogget eller nedbrutt blå skog for å gjenopprette økosystemet. En annen måte er å redusere næringsstoffer tilført av mennesker, som nitrogen og fosfor, som har vist seg å bidra til tap av karbon. Det er også viktig å redusere annen menneskelig påvirkning på sårbare blå skog, som for eksempel å begrense fiske eller avfall i området, slik at biologisk mangfold blir bevart [24]. Overfiske har i Norge ført til at kråkebolle bestanden økte. Kråkebollene er en trussel for blå skoger, da de livnærer seg på plantene. Dette fører til opphavet av prosjekter hvor invasive arter fjernes [23]. I tillegg arbeides det med restaurering av

hydrologi for å øke karbonakkumulering ved drenerte kystområder [25]. Overvåking av blå skoger inngår i prosjekter, og det er utviklet flere teknologier som hjelper til med dette arbeidet, som eksempelvis dronebasert teknologi [22].

Flere mener at våtmark, som myrer, bør være inkludert under blue carbon [26]. Restaurering av våtmark er, i likhet med blå skoger, et prosjekt for å få tilbake myrer, og forhindre destruering av de eksisterende myrene. I Norge er 10 % av fastlandet våtmark. Miljødirektoratet har opprettet en plan for restaurering av våtmark i Norge i årene 2021-2025 [27].

Grunnet flere faktorer er det utfordrende å anslå potensialet til blå skog i Norge og i verden. Lokasjon, type skog, dybde, og tilgang på næringsstoffer er forhold som påvirker kapasiteten på karbonbinding. Estimerer baserer seg ofte på karbon sluppet ut ved degradering av blå skoger, samt estimerer av den totale mengden karbon skogene holder på. Potensialet et område har til å binde karbon ved hjelp av restaurering er ikke klart. Det er likevel noen tall som kan gi et bilde på hvor mye kapasitet blå skog har. Nordic Council of Ministers skriver i en rapport at nordisk blå skog har potensialet til å langtidslagre 1 087 tonn karbon hvert år [24]. Havforskningsinstituttet oppgir at ved dyrkningssesong vil en kystnær lokalitet produsere 7 500 tonn tare som kan ta opp 1 500 tonn CO<sub>2</sub> per km<sup>2</sup>. Dyrking på et dypere hav vil kunne ta opp 3 000 tonn CO<sub>2</sub> per km<sup>2</sup> ved et område med 20 000 tonn tare [28]. SINTEF skriver i en av sine rapporter at ved å dyrke 20 millioner tonn tare på et område som er 6000 km, vil dette binde 7,5 millioner tonn CO<sub>2</sub>, hvorav 1 million går ned i sedimentene [29]. En annen kilde påstår at 360 milliarder tonn CO<sub>2</sub> blir fiksert årlig, hvorav 1,39 % langtidslagres på havbunnen ved hjelp av den biologiske pumpen [30]. Det er likevel ikke noen gode tall på hvor mye karbon som går ned i sedimentene og hvor mye som går ut i karbonkretsløpet igjen [23].

Det arbeides med utvikling av blå kreditter, som gjør det mulig å kjøpe lagret CO<sub>2</sub> via blå skog. Det er likevel vanskelig å anslå verdien av sekvestrert karbon via blå skog, noe som gjør det problematisk å sette det ut på et marked. Det er også utfordrende å dokumentere hvor mye CO<sub>2</sub> som blir langtidslagret, noe som kan gjøre det ulønnsomt for bedrifter å engasjere seg i prosjekter [31]. En studie fra 2012 opplyser at mer arbeid må til for å sette ut blå kreditter på markedet, noe som inkluderer økonomisk analyse, mer forskning og politisk påvirkning [32]. Flere prosjekter er satt i gang, og noen av de internasjonale prosjektene selger blå kreditter, men det er likevel ikke en strategi som blir brukt i Norge. Grunnet manglende data kan ikke tareskog telles som bidrag til å offsette utslippene ifølge Parisavtalen. Mangrover derimot har fått anerkjennelse for å bidra til karbonbinding [23].

### 2.2.1.2 Fordeler og ulemper ved blue carbon sekvestrering

Blå skog har stor kapasitet til å langtidslagre karbon, samt ta opp menneskeskapt CO<sub>2</sub>. En annen fordel er den positive påvirkningen på kystens økosystemer. Bevaring av disse skogene bidrar blant annet til at kystvannskvaliteten øker, fiskebestanden vil øke og sunt fiskeri forekommer i større grad. For eksempel er mangrover husly for noen fiskearter, og er en kilde til næring [33]. En annen fordel er kystvern mot erosjon og naturkatastrofer som storm og flom [21].

Den største ulempen med bevaring og restaurering av blå skog er reversibiliteten av prosjektet. Degradering og ødeleggelse av blå skog fører til at store deler av bundet karbon slippes ut i atmosfæren igjen. Et kontinuerlig arbeid er derfor nødvendig for å opprettholde resultatene. Skogene blir av den grunn også påvirket av klimaendringer og naturkatastrofer [19]. I tillegg er det store utfordringer med overvåking og dokumentering av sekvestrert karbon [34]. Det er derfor vanskelig å utføre et regnskap på hvor mye karbon som går ut, og hvor mye som går inn [35]. Dette gjør det vanskelig å validere eventuelle kreditter på markedet, og lage et kredittsystem basert på blue carbon.

Som tidligere nevnt bidrar menneskelig aktivitet på kysten negativt til restaurering av blå skoger [19]. Ødeleggende aktivitet kan eksempelvis være overfisking eller kjemisk gjødsling [30]. Kjemiske forbindelser brukt på land vaskes ut i elver og kommer i kontakt med den kystnære vegetasjonen. Dette fører til eutrofiering, som betyr økt planteproduksjon som følge av tilførte næringsstoffer. Dette fenomenet fører til at ødeleggende algearter forvokser blå skog og ødelegger økosystemet [30].

Et annet poeng er at det er vanskelig å estimere kapasiteten til blå skog. Som med alle prosjekter for restaurering er det også her ærlighetsproblemer knyttet til lagringen av karbon. Dobbelttelling er et fenomen som kommer frem når et prosjekt om å restaurere en viss mengde skog blir solgt til to forskjellige selskaper, som en måte å tjene mer penger på. Dette fører til at grønnvasking blir et problem [23].

### 2.2.1.3 Kostnadsbilde av blue carbon

Lite forskning, og problematikk med overvåking av blå skog gjør det utfordrende å gi et anslag på kostnader knyttet til prosjekter. Det har blitt gjort beregninger som illustrerer verdien av karbonlagring via blå skog. En artikkel fra 2021 om blue carbon anslår at den globale verdien er 190 billioner US\$ per år [36]. Noen prosjekter selger karbonkreditter som en måte å finansiere arbeidet sitt på, men ikke alle er verifisert av United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), som er FNs



rammekonvensjon for klimaendringer [37]. Eksempelvis ble et prosjekt i Kenya finansiert med salg av kreditter ved hjelp av Plan Vivo organisasjonen gjennom en PES-avtale (Payment for Ecosystem Services) med lokalsamfunnet. For dette prosjektet varierte kredittkostnadene mellom 6,50–10,00 US\$ i 2013-2014 [38]. En annen artikkel hevder at blå karbonkreditter går for 13-35 US\$ per tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter [39]. Grunnet utfordringer knyttet til verifikasjon av lagret karbon er det få tredjepartsorganisasjoner som kan validere oppkjøpte kreditter. Teknologi og metoder for beregning av CO<sub>2</sub>-regnskap knyttet til restaurering av tareskoger er under utvikling, på lik linje med beregningsteknologi knyttet til skog på land. Derfor finnes det få organisasjoner som er sertifisert til å selge blå kreditter i 2023. Flere store organisasjoner forsker på disse metodene, og har satt i gang blue carbon prosjekter. Verra, som administrerer Verified Carbon Standard, er en av pionerne på markedet [40]. En annen stor organisasjon som arbeider med tareskoger er The Gold Standard [41]. South Pole er en av organisasjonene som selger blå kreditter. Etter kontakt med en av ansatte i organisasjonen kom det frem at det er mangel på kreditter, og at prisen varierer mellom 30-50 US\$ per tonn CO<sub>2</sub> avhengig av lokasjon, størrelse på prosjektet og tilgjengeligheten av kredittene. Karbonkredittene deres blir verifisert av Verra [42].

#### 2.2.1.4 Klimapolitikk og initiativer knyttet til blue carbon

Flere organisasjoner har innsett viktigheten og potensialet til blå skoger. Selv om det ikke finnes et validert kredittsystem for blå karbon enda, er det satt i gang flere prosjekter som skal redde blant annet mangrover og tareskoger. En av de store organisasjonene, The Blue Carbon Initiative, samarbeider med Blue Carbon Scientific Working Group og International Blue Carbon Policy Working Group for å restaurere og bevare kystnære økosystemer [21]. FNs organisasjon for utdanning, vitenskap, kultur og kommunikasjon United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), UNFCCC og FNs miljøprogram (UNEP), deltar også i forskningen på blå skoger, i tillegg til en rekke mindre, private organisasjoner [37, 43]. I 2022 ble flere storskala prosjekter satt i gang, inkludert i Oslo-fjorden, Indonesia og New-Zealand [22].

Politisk sett er det ingen hindringer i å bevare og restaurere tareskoger. Det kan likevel være utfordrende å validere arbeidet med tilhørende tall på mengde sekvestrert karbon, og føre til at bidraget ikke telles politisk. Dette er en utfordring som arbeides med kontinuerlig. Parisavtalen har for første gang inkludert hav i en av rapportene sine, noe som tyder på fremskritt for Blue Carbon. Ocean Panel, en organisasjon som arbeider for implementering av havløsninger i verden for en bærekraftig fremtid, har også begynt å inkludere blå skog i sin forskning. Selv om politikken ikke går imot blå skog,

er det likevel vanskelig å få tillatelser til prosjekter, noe som tyder på at regulering ennå ikke er på plass og mer forskning må til. Ifølge Cecilie Linn Wathne, seniorrådgiver for Havforskningsinstituttet, er dette noe som kommer til å forandre seg fort. Allerede neste år blir det satt i gang med testprosjekter, som kan føre til tilgjengelige karbonkreditter i Norge. Eksempelvis prosjekter som går ut på fjerning av kråkeboller, ved hjelp av blant annet kalking. Andre metoder går ut på å lage kunstige rev over kråkebollene i havbunnen for å få tareskogen høyere opp. Dette vil kunne føre til at fiskebestanden kommer tilbake og livnærer seg på kråkebollene. Det er også forsket på å dyrke tarefrø i laboratorier, for å så deretter kaste de i havet hvor de fortsetter å vokse seg store. Slike prosjekter kan etter hvert bidra til dannelsen av et validert kredittsystem [23]. Rundt i verden er det opprettet flere prosjekter allerede. Fair Carbon, som er en ikke profitabel organisasjon som gjør informasjonen om blue carbon lett tilgjengelig, har dannet et kart over offentlig registrerte blue carbon prosjekter [44]. Dette kartet er presentert i Figur 2.



Figur 2: Kart over offentlig registrerte blue carbon prosjekter [44].

### 2.2.2 Dyphavslagring av karbondioksid

Dyphavslagring går ut på å injisere karbondioksid direkte til dyphavet. Denne metoden har potensialet til å lagre karbon i lang tid. Havet dekker 70 % av jordoverflaten, med en gjennomsnittsdypde på 3 800 m, noe som gir store muligheter for karbonlagring [45]. Selv om denne metodikken er lovende for

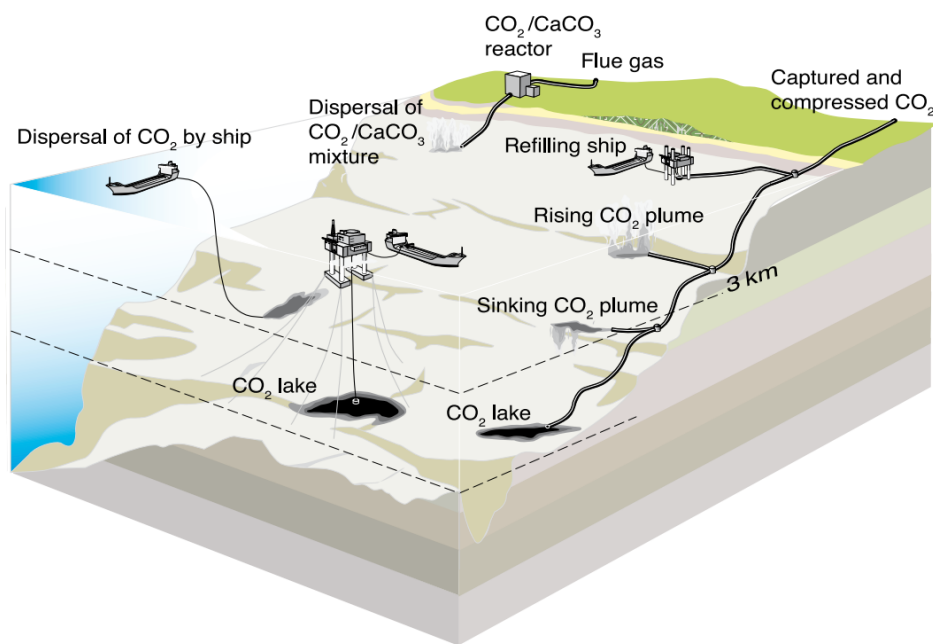
dagens miljøproblemer, er det ulemper som stopper allmenn bruk av denne teknologien. Forsuring, grunnet store mengder CO<sub>2</sub>, fører til negative konsekvenser for miljøet i havet, og gjør det dermed kontroversielt å bruke metoden [46].

#### 2.2.2.1 Anvendelse av dyphavslagring og potensialet det har til å lagre karbon

Lagring i dyphavet utføres ved å pumpe CO<sub>2</sub> direkte minst 2 700 m under havoverflaten. Rent karbondioksid er i gassform frem til 500 m under havoverflaten, og flytende lenger ned i havet. Flytende CO<sub>2</sub> har lavere tetthet enn sjøvann mellom 500-2 700 m under havoverflaten, og er tettere enn sjøvannet dypere enn 3 000 m [45]. Ved dyp på mer enn 3 000 m vil karbondioksid synke til bunnen [47]. Ved injisering av karbondioksid på 1 000 m dype hav vil CO<sub>2</sub> bli oppløst og spredt, og etter hvert bli en del av den globale karbonsyklusen. Injisering av CO<sub>2</sub> kan foregå på flere forskjellige metoder via rør [48]:

- Sprøyte inn fortynnet CO<sub>2</sub> på et 1 000-2 000 m dypt hav.
- Slippe ut karbon ved en dybde på 3 000 m for å forme en innsjø av stillestående flytende CO<sub>2</sub> på bunnen av havet.
- Dannelse av en sky ved 1 000 m, som synker ned til havbunnen og frakter med seg store deler av CO<sub>2</sub>.
- Utslipp av fast CO<sub>2</sub> på det dype havet.

En annen tilnærming går ut på å tilsette flytende CO<sub>2</sub> i en kolonne, der det dannes hydrater i en reaksjon mellom karbondioksid og sjøvann [49]. I Figur 3 er det vist en illustrasjon av de ulike metodene for dyphavslagring.



Figur 3: Illustrasjon av ulike metoder for dyphavslagring av CO<sub>2</sub> [50].

Hav har en naturlig syklus og utveksling av CO<sub>2</sub> med atmosfæren, og tar opp 7 Gt CO<sub>2</sub> hvert år [51]. I teorien er det ingen grense på hvor mye karbon et hav kan lagre. Det er likevel noen faktorer som begrenser injisering av CO<sub>2</sub> direkte i havet. Faktorer som naturlig karbonsyklus, og forsuring av hav grunnet høye CO<sub>2</sub> konsentrasjoner, gjør det utfordrende å anslå hvor mye CO<sub>2</sub> som kan injiseres før det vil skade miljøet og marine økosystemer. I IPCC (FNs klimapanel) rapporten fra 2005 er det fastslått at uten injiseringen vil havet ta opp totalt mellom 2 000-12 000 Gt CO<sub>2</sub>, noe som kan illustrere en øvre grense. Likevel er det viktig å tenke på at forsuringen forekommer ved høye konsentrasjoner av karbondioksid, og derfor må injiseringen fordeles gradvis i havet. [51]. En annen kilde fremhever beregninger av surheten i vannet. Siden førindustriell tid har pH i vannet sunket med 0,1 enheter, og ved å tilsette en mengde på 1 300 Gt karbon, vil pH synke med 0,3 enheter [48]. Dette bør tas hensyn til ved videre studier.

Det meste av forskningen har foregått på laboratorium, grunnet ukjente konsekvenser på havmiljøet [45]. Ingen langsiktige eksperimenter har blitt gjort på åpent hav, og tilnærming på hvor mye CO<sub>2</sub> som blir permanent lagret er gjort ved hjelp av matematiske modeller. Studier viser at 80 % av CO<sub>2</sub> blir lagret permanent, hvorav resterende holder seg i havet i flere hundre år før det slippes ut i atmosfæren igjen [48]. En annen studie får frem at ved kontinuerlig injisering av CO<sub>2</sub> i havet i over 50 år, vil 10 % frigis tilbake til atmosfæren [49].

### 2.2.2.2 Fordeler og ulemper ved dyphavslagring

Som nevnt tidligere har havet kapasitet til at store mengder kan oppbevares permanent under dypet. Det oppstår også utvekslinger av CO<sub>2</sub> mellom havet og atmosfæren, slik at injisert CO<sub>2</sub> kan implementeres i den globale karbonsyklusen. Dyphavslagring er en relativt enkel metode å gjennomføre, med teknologi som eksisterer allerede i dag, og er en metode som gir raske resultater [51].

Noen faktorer stopper likevel allmenn bruk av denne metoden. Den største ulempen er at CO<sub>2</sub> er en syrlig gass som påvirker surheten i havet. Store konsentrasjoner av CO<sub>2</sub> vil føre til forsuring av miljøet, og det har konsekvenser for økosystemet i vannet. Studier viser at lav pH i det dype havet kan føre til redusert fiskehelse og andre marine organismer, og i verste tilfelle fører til døde soner [52]. Artene som blir mest rammet av forsuring er organismer som koraller, kalkflagellater og poredyr, som kan bli forkalket [53]. Dyr på dyphavet, som lever i stabile forhold, er spesielt sensitive til miljøpåvirkninger [54].

Det er ukjent i hvor stor skala dette vil forekomme, noe som også er en ulempe ved denne metoden. Mer forskning må til for å forstå fullstendig hvilke langsiktige konsekvenser vi møter på. I tillegg er det ansett som havdumping å tilsette så mye CO<sub>2</sub> til havet [55].

### 2.2.2.3 Kostnadsbilde ved bruk av dyphavslagring teknologi

Ulike metoder krever forskjellige typer behandlinger og materialer. Derfor kan kostnadene variere en del. IPCC rapporten beregnet kostnadene til injisering av CO<sub>2</sub> fra en plattform til å være 11,9-13,8 US\$ per tonn CO<sub>2</sub> netto lagret. Denne kostnaden innebærer lagring av CO<sub>2</sub>-utslipp fra tre kraftverk, transport av CO<sub>2</sub> til plattformen, og rør til injeksjon på 3 000 m dypt hav. Prisen inkluderer også utslipp lik 3 % av fraktet CO<sub>2</sub>, som går til blant annet drivstoff [51].

IPCC har også estimert kostnaden ved å bruke et injiseringsskip ved å bruke de samme faktorene. Prisen per tonn CO<sub>2</sub> ble da 14,2-15,7 US\$ [51]. Den samme rapporten har i tillegg beregnet kostnadene ved injisering direkte fra land til et grunnere vann. Kostnadene er større ved større distanser, noe som er forklarlig med lengden på røret. CO<sub>2</sub>-utslipp fra et kullkraftverk på land med en produksjonskapasitet på 600 MW kan injiseres ved hjelp av rør langs havbunnen 100-500 km fra land til en dybde på 3 000 m. Denne kostnaden kommer på 6,2-31,1 US\$/tonn netto lagret CO<sub>2</sub>. Kostnader varierer derfor med

lengde på rør, havdybde hvor CO<sub>2</sub> skal injiseres, transport og volumet av CO<sub>2</sub>, samt økonomisk tilstand i regionen [56]. Kostnader knyttet til overvåking og verifisering av prosjektet må påregnes i tillegg.

#### 2.2.2.4 Klimapolitikk og initiativer knyttet til dyphavslagring

Dyphavslagring blir sett på som forurensning. Havdumping er regulert av London-konvensjonen, og er forbudt [55]. Det er The United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS), også kalt Havrettskonvensjonen, som er den primære internasjonale juridiske myndigheten som styrer aktiviteter i havet [57].

### 2.3 Landbasert karbonlagring

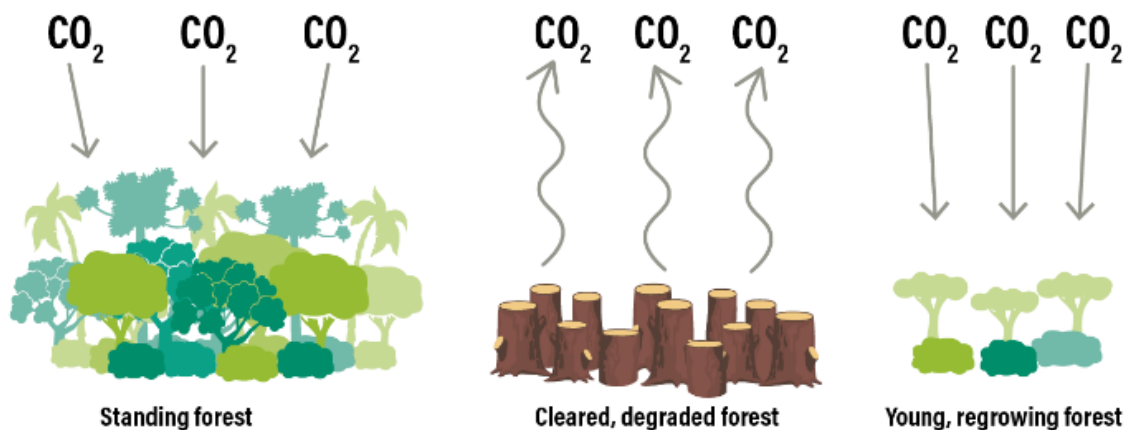
Jordoverflaten på land danner utgangspunktet for menneskelig livsgrunnlag. Ifølge en rapport fra IPCC, er over 70 % av landarealet påvirket av menneskelig aktivitet. Dette har siden førindustriell tid ført til globale klimaendringer, og ekstremvær har økt i både frekvens og intensitet. Disse endringene har en negativ påvirkning på økosystemer og biologisk mangfold, som også får betydning for menneskets levekår [58].

Naturlige tiltak på land i form av ulike karbonfangstmekanismer kan være et positivt bidrag i kampen mot klimaendringer. Disse metodene utnytter naturens evne til å binde og lagre karbon gjennom økosystemene på land [58]. Slike tiltak kan gjøres i karbonholdig biomasser og materialer, som for eksempel i skog, landjorda, bergarter og mineraler. Hver av løsningene har ulike utfordringer knyttet til blant annet kostnad og risiko for reversering av karbonopptak. I dette kapitlet blir tre sentrale naturbaserte metoder for karbonfangst omtalt: bærekraftig skogbruk, biokull og karbonlandbruk.

#### 2.3.1 Bærekraftig skogbruk som et karbonlager

Skog er et av de største karbonlagrene i verden, og tar opp flere gigatonn CO<sub>2</sub> årlig gjennom fotosyntesen. Men til tross for store karbonopptak, medfører det også store utslipp fra naturlig avskoging, som skogbrann, tørke, nedbrytning og vind. Antropogene årsaker som hogst og landbrukskonvertering gir også store utslipp. En studie fra 2021 anslår at skog hvert år tar opp omtrent det dobbelte av hva det slipper ut. Gjennom ulike metoder og prosjekter kan derfor skogbruk benyttes

som et betydelig karbonlager [59]. Figur 4 illustrerer hvordan skog er en kilde til karbonfangst og -utslipp.



Figur 4: Forenklet skisse av opptak og utslipp av CO<sub>2</sub> i skog [59].

#### 2.3.1.1 Prinsippet ved bærekraftig skogbruk og dens potensial til å lagre karbon

I dagens klimadebatt benyttes tre ulike metoder for bærekraftig skogbruk. Den ene metoden er skogplanting eller såkalt «Afforestation & Reforestation (A&R)», to begreper som begge betyr skogplanting. Afforestation er dannelsen av ny skog, hvor det historisk sett ikke fantes skog fra før. Det sistnevnte uttrykker gjenopprettelse av skog som følge av tidligere avskoging. Den andre metoden omtales ofte som REDD (Reduced Emissions from Deforestation and Degradation), og baserer seg på å forhindre eller redusere utslipp fra avskoging. Den tredje og siste metoden er å forbedre skogforvaltningen for å øke eller konservere karbonnivået [60]. I 2022 utgjorde skogprosjekter 30 % av de totale kompenseringskredittene som ble utstedt i det frivillige markedet. Metodene REDD, forbedring av skogforvaltning og A&R sto for henholdsvis 21, 6 og 3 % [61].

Det er krevende å estimere potensiale for karbonlagring fra skogbruk. Dette fordi karbonnivået varierer over tid, med hensyn til lokasjon og metode. Eksempelvis har tropiske områder høyere produktivitet på grunn av økt nedbør, temperatur og lysintensitet. Land i tropiske områder som i Afrika og Latin-Amerika, spesielt u-land, er mer utsatt for avskoging. I disse områdene er dermed potensialet for karbonopptak høyere. En studie fra 2015 estimerer karbonopptak ved A&R til å være 0,5–3,6 Gt CO<sub>2</sub>/år globalt i 2050. Det forventes avtagende til null ved slutten av århundret, som følge av metning

[62]. Metoden for å redusere utslipp fra avskoging har stort konserveringspotensial, da avskoging utgjør 10-15 % av globalt utslipp av drivhusgasser [63]. Andre undersøkelser estimerer det globale potensialet for å øke karboninnholdet med 0,2–2,1 Gt CO<sub>2</sub> ved forbedret skogforvaltning. Dette uten at det går på bekostning av fiber- og økosystemfordelene som kommer med forvaltningen [61].

I den boreale skogen i Norge og resten av Skandinavia anslås potensialet for å øke karbonopptaket som lavt [64]. Likevel er karbonopptaket fra skog i Norge en viktig del av landets netto utslipp. I en rapport utgitt av Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) oppgis det at 24,5 Mt CO<sub>2</sub> ble tatt opp av norsk skog i 2020, en mengde som dekket halvparten av Norges klimagassutslipp samme år [65]. Ifølge Statistisk Sentralbyrå (SSB) består landarealet i Norge av 37,6 % skog, til sammenligning dekker landbruksarealet 3,5 % av Norges landareal [66]. Vern av skog og forbedring av skogforvaltningen vurderes derfor som et mulig klimatiltak i Norge [64].

#### 2.3.1.2 Fordeler og ulemper ved bærekraftig skogbruk

Som beskrevet tidligere, medfører bærekraftig skogbruk flere fordeler enn bare det å være en naturlig kilde til karbonfjerning. Ved å gjenopprette og forbedre skogforvaltningen kan det beskytte økosystemer og det biologiske mangfoldet i den lokale flora og fauna. Dette bedrer jordtilstanden, som igjen kan øke matproduksjonen. Videre kan bærekraftig skogbruk redusere risikoen for flom og erosjon. Dersom skogbruksprosjektene inkluderer lokalsamfunnet, kan det gi lokale økonomiske fordeler [67]. A&R har størst betydning i tropiske områder. Den tropiske skogen fører til dannelsen av skyer, som gir en nedkjølingseffekt. Skyene reflekterer flere solstråler enn mørk skog, og senker dermed overflatetemperaturen. Dette kalles albedo-effekten, som per definisjon er flaters evne til å reflektere sollys [68].

Prosjekter for karbonkompensering i skogbrukssektoren må også ta hensyn til flere ulemper. En studie fra 2022 har identifisert ulike utfordringer ved å utvikle prosjekter for karbonkompensering i skog basert på flere fagfelleverderte artikler. Disse nevner en rekke metodiske utfordringer, som for eksempel addisjonalitet, varighet og lekkasje. Dette fordi addisjonaliteten til slike prosjekter antas å være krevende å bestemme. Varigheten ved karbonkompenseringen i skog er usikker da karbonopptaket kan reverseres ved naturlige eller antropogene forstyrrelser. Det er også risiko for lekkasje, eksempelvis ved at avskoging som forhindres et sted, forskyves til andre steder. Dobbelttelling er en annen ulempe, og fører til feilaktige registreringer av karbonopptak [69]. Dette er negative kriterier som er med på å fremme grønnvasking.



Andre sentrale utfordringer som nevnes er sosioøkonomiske ulemper. Det er blant annet usikkerhet rundt karbonprising, kostnadseffektivitet og påvirkning av sosiale forhold i området, som for eksempel konkurrering om landareal med blant annet landbrukssektoren. Det er også utfordringer i forbindelse med implementering av prosjekter i skogbrukssektoren, fordi det er krevende å overvåke, rapportere og verifisere karbonopptaket [69]. Som beskrevet tidligere, er det sannsynlighet for metning, som vil si at økt karbonopptak ikke er oppnåelig [62, 69].

I Norge er det utfordringer relatert til skogplanting. En undersøkelse gjort av Bjerknessenteret for klimaforskning viser at A&R kan øke den lokale temperaturen med 1°C om våren. Undersøkelsen forklares ved hjelp av albedo-effekten. Skog absorberer nemlig flere solstråler enn hvite, snødekte områder, og øker overflatetemperaturen. Effekten påvirker regioner ved høye breddegrader, som for eksempel Norge [70].

#### 2.3.1.3 Kostnadsbilde ved bruk av bærekraftig skogbruk til karbonlagring

Kostnadsestimatene for kompensingskreditter i skogprosjekter varierer med flere faktorer, blant annet er prisene forskjellige mellom markeder. I en artikkel fra 2021 oppgis gjennomsnittsprisen for en kreditt i det frivillige markedet til å være 4-6 US\$ per tonn CO<sub>2</sub> og 12-14 US\$ per tonn CO<sub>2</sub> i regulerte markeder. Det nevnes at disse prisene fortsatt ikke er høy nok for grunneiere å bytte ut skogfelling med karbonkreditter [71]. En annen faktor er metoden som benyttes. En studie oppgir at kostnader ved A&R, og å forhindre avskoging økes, i takt med mengde karbon tatt opp. Kostnadsestimatene for disse forventes å øke fra rundt 20-50 US\$ i tidsrommet 2020-2050. Forhindre avskoging er derimot mer kostnadseffektiv enn A&R [72].

Kostnadene i denne sektoren er også avhengig av kvaliteten på kredittene. Aktører som ønsker å gjøre opp for sitt utslipp konkurrerer om karbonkreditter av høy kvalitet som gir varig klimavirkning, og dermed reduserer risikoen for grønnvasking. Dette er med på å presse opp prisene på kredittene. I den andre enden gir lavkvalitetskreditter lavere priser, men de medfører også usikkerhet knyttet til faktisk oppnådd klimaeffekt. Det forventes høyere priser i fremtiden som følge av økt etterspørsel i det frivillige markedet, da karbonkreditter av høy kvalitet er begrenset. Samtidig vil krav om høyere kvalitet på karbonkredittene, gi færre kreditter og høyere priser [61].

I Norge er det mulig å kjøpe karbonsertifikater fra selskapet Trefadder, som har utviklet Norges første kommersielle klimaskog. I dag er prisen for å lagre ett tonn CO<sub>2</sub> 299 kr ekskludert mva. Selskapet fungerer som en megler mellom aktuell bedrift og bonden eller tomteeier hvor skogplantingen finner

sted. Microsoft, Gasnor og Vår Energi er selskaper som har kjøpt sertifikater fra Trefadder i Norge [73]. Flere professorer og miljøforkjempere er derimot kritisk til dette konseptet. Jon Bjartnes i WWF uttalte seg til Nettavisen i 2021 at naturlig karbonlagring på jorda må økes, men at skogplanting ikke kan erstatte kutt i fossile utslipp. Bjartnes mener det er problematisk når selskap hevder de blir klimanøytrale ved å betale for skogplanting, blant annet på grunn av risiko for reversering av karbonopptaket [74].

#### 2.3.1.4 Klimapolitikk og initiativer knyttet til bærekraftig skogbruk

Flere initiativer relatert til bærekraftig skogbruk er innført som følge av klimapolitisk enighet internasjonalt. REDD+ er et av dem, og ble vedtatt av FNs klimakonvensjon i desember 2013. Som beskrevet tidligere, baseres dette initiativet på å forhindre avskoging i utviklingsland. Plusstegnet er et tilleggsledd som også inkluderer forbedring av skogforvaltning. Initiativet er ment for å gi utfyllende veiledning for å iverksette aktiviteter innen dette [75]. Til tross for at REDD+ er opprettet for frivillige utslippsreduksjoner, er det også etablert en standard, TREES. Standarden har til hensikt å akselerere arbeidet med nasjonale miljøregnskap og stiller krav til hvordan måle, overvåke, rapportere og verifisere karbonopptak fra REDD+-prosjekter etter en enhetlig og regulert skala. Standarden er etablert etter initiativ fra Architecture for REDD+ Transactions (ART), og legger til rette for en regulert handel med karbonkreditter på nasjonalt nivå [76].

LEAF-koalisjonen (Lowering Emissions by Accelerating Forest finance) etablert i 2021 er verdens største samarbeid mellom offentlige og private for å stoppe avskoging. Målet er å finansiere storskala vern av tropisk skog. I korte trekk fungerer initiativet ved at nasjonale myndigheter i tropiske land reduserer avskoging sammen med privat sektor, der utslippsreduksjoner verifiseres og utstedes av ART. Karbonkredittene selges så videre for en minimumspris på 10 US\$. Betalingen går så tilbake til myndighetene i tropiske land som muliggjør ytterligere skogvern. Koalisjonen anbefaler alle selskap, som forplikter seg til å utføre teknologiske og operasjonelle utslippsreduksjoner i egne verdikjeder for å nå nettonull i 2050, å benytte seg av LEAF-utslippsreduksjoner. Kredittkjøp fra LEAF skal derimot komme i tillegg til, og ikke som erstatning for, interne reduksjoner. Forpliktelsene må være offentlige innen 2023 [77].

Frivillige markeder og de fleste regulerte markeder tillater internasjonale transaksjoner med karbonkreditter i skogbrukssektoren. EU ETS har derimot ikke kompensert utslipp med kreditter utviklet fra A&R-prosjekter, blant annet på grunn av usikkerhet rundt varighet, lekkasje, addisjonalitet

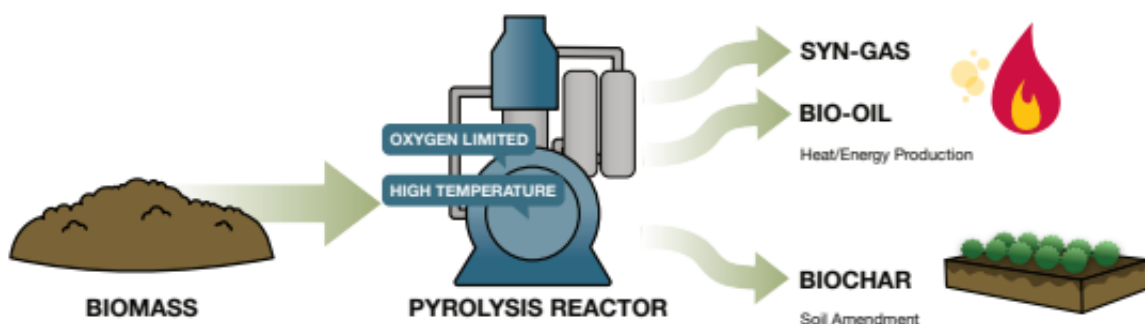
og dobbelttelling [78, 79]. I dag fokuserer EU på innenlands utslippsreduksjoner. Etter 2021 tillater ikke EU lenger kjøp av internasjonale karbonkreditter for å etterleve retningslinjene i EU ETS [78].

### 2.3.2 Karbonopptak med biokull

De siste årene har biokull vært forsket på som ressurs for karbonfangst og en viktig brikke i bekjempelse av klimaendringer. Kullet produseres av fornybar biomasse via pyrolyse. Karbonet i biokullet er motstandsdyktig mot abiotiske- og biotiske (ikke-levende og levende) forstyrrelser. Det gjør at karbonet kan holdes stabilt i flere hundre år [80]. Biokull er teknologisk fremstilt, men omtales her da metoden har naturlig opphav og formål.

#### 2.3.2.1 Metode for biokull og løsningens potensial til å lagre karbon

Karbonfangstprosessen ved bruk av biokull er omfattende. Karbon sekvestreres ved fotosyntese i jord og vegetasjon og danner biomasse. Denne biomassen benyttes i pyrolyse, en termokjemisk prosess der sammensatte stoffer spaltes til mindre forbindelser. Prosessen er anaerob, som vil si at biomassen behandles uten eller med begrenset tilgang til oksygen. I biokullpyrolyse blir biomassen nedbrutt ved at flyktige stoffer under oppvarming ved 400–800°C, drives vekk fra karbonet. Dette karboniserer forbindelsen ved at mengden oksygen og hydrogen reduseres. Biokullet får en dominerende, ringformet karbonstruktur, som stabiliserer forbindelsen. Denne strukturen er avgjørende for at karbonet brytes sakte ned, da mikrober har vansker med å bryte opp ringstrukturen [81]. En studie fra 2021 viser at når temperaturen øker, blir det produsert mindre biokull, men konsentrasjon av karbon blir høyere [82]. Figur 5 illustrerer pyrolyseprosessen av biomasse til biokull. Fra prosessen dannes det to biprodukter, syntetisk gass og bioråolje, også kjent som pyrolyseolje [83].



Figur 5: Forenklet prosesskisse av dannelsen av biokull ved pyrolyse [83].

Biokull har størst karbonfangstpotensial i jordbrukssektoren. Dette kan forklares ved at karbon blir tatt opp i flere ledd. Det første steget er når CO<sub>2</sub> blir utnyttet av planter gjennom fotosyntese og danner biomasse. Etter produksjon av biokull i pyrolyse kan det utnyttes i landbruket, der det har flere formål. Biokull i jordbruket har evnen til å absorbere og adsorbere oppløst organisk karbon i jorda. Dette gjør at ytterligere karbon blir tatt opp både i og på biokullet, og av den grunn hemmer mineralisering av organisk jord. I tillegg øker biokullet fruktbarheten og avlingsutbyttet i jorda, som dermed medfører økt karbonopptak i jorda [84]. Som følge av disse leddene, er potensialet til biokull i landbruket krevende å estimere. Globalt anslås karbonbindingspotensialet til å være i området 0,7–1,3 Gt CO<sub>2</sub>/år, avhengig av tilgjengelig biomasse [85]. I Norge kan bruk av biokull i landbruket ta opp en mengde på 0,9 Mt CO<sub>2</sub>-ekvivalenter årlig [86]. Forskning viser at oppholdstiden for karbon i biokull som tilsettes jorda, varierer fra flere hundre år til tusenvis av år [81]. Biokull kan også brukes som førtilskudd til husdyr [87].

En annen anvendelse av biokull er i sementproduksjon. Sementindustrien står årlig for 5-8 % av globalt utslipp av CO<sub>2</sub>. Tilsats av biokull i sement er dermed en bærekraftig løsning for å redusere CO<sub>2</sub>-utslipp. Dette fordi det reduserer mengde produsert sement, og kan fremme resirkulering av avfallsbiomasse. En undersøkelse fra 2022 viser at produksjon av 1 m<sup>3</sup> sement kan redusere CO<sub>2</sub>-utslipp på 15 %, dersom 8 vektprosent biokull benyttes fremfor sement [88].

### 2.3.2.2 Fordeler og ulemper ved biokull

Som presentert tidligere, kan biokull benyttes for karbonfangst, men har også flere fordeler utover dette. I landbruket er det rapportert at biokull fører til forbedret husdyr- og jordhelse. I jorda gir det blant annet en mer effektiv bruk av vann og næringsstoffer, samt avlingsutbytte [81]. Dette gjør at bruken av gjødsel kan reduseres. Biokull som supplement til husdyrfôr bedrer evne til å ta opp næringsstoffer fra fordøyelsen, som deretter skilles ut som gjødsel til videre bruk i jorda [87]. Dette fører til sparte kostnader for bønder og reduserer karbonutslipp i jordbrukssektoren ytterligere. Ved å blande biokull og nitrogenholdig gjødsel før det benyttes på jordene, vil det øke utnyttelsen av nitrogen og begrense utslipp av nitrose (NO<sub>x</sub>) klimagasser [89]. Eksempelvis har biokull evne til å stimulere mikroorganismer som denitrifiserer lystgass (N<sub>2</sub>O), en potent drivhusgass, til nitrogen (N<sub>2</sub>). På grunn av økt jordlufting, kan tilsats av biokull i landbruket også redusere utslipp av metangass [84]. Det rapporteres om utslippsreduksjon av metangass ved bruk av biokull som førtilskudd. [87] Som nevnt kan biokull forbedre resirkulering og kompostering, da avfall kan benyttes som biomasse i

dannelsen av biokull [84]. Biproduktene fra pyrolyse, syntesegass og bioråolje, kan selges og brukes til oppvarming, syntetisk drivstoff eller annen energiproduksjon [90]. Energien fra disse biproduktene kan også gjenbrukes for å operere pyrolyseprosessen og dermed redusere produksjonskostnader [83].

I likhet med andre karbonfangstmekanismer, er det også begrensinger relatert til biokull. Pyrolyse er en energikrevende prosess. Det vil si at energien som driver prosessen bør være fornybar for at biokull skal resultere i netto negative utslipp. I tillegg bør biomassen være så tørr som mulig, da det reduserer energibehovet for å nå ønsket temperatur i pyrolysen [83]. Tilgjengelig fornybar biomasse er nødvendig for å oppnå et negativt karbonutslipp. En studie fra 2020 nevner derimot at rester fra landbruk og skogbruk er råvarer som er tilgjengelig i store mengder hvert år [81]. Kunnskapen om de langsiktige virkningene ved bruk av biokull er mangelfulle. Det er blant annet usikkert hvordan biokull påvirker ulike jordsmonn og tilhørende økosystemer i det lange løp [84]. Eksempelvis har noen biokullprodukter et høyt innhold av polysykliske aromatiske hydrokarboner (PAH). Dette er en stoffgruppe der enkelte forbindelser kan gi uønskede miljø- og helseeffekter [91].

### 2.3.2.3 Kostnadsbilde ved bruk av biokull til karbonlagring

Priser for produksjon og bruk av biokull varierer. Det avhenger riktignok av ulike faktorer, som lokasjon, tilgjengelig biomasse, pyrolyseforhold, biokullkvalitet og karboninnhold i biokullet [92]. En studie fra 2022 estimerer at driftskostnader ved biokullproduksjon er mellom 20–330 US\$ per tonn tørr biomasse prosessert i pyrolyse [83]. En annen studie fra 2018 estimerer at kostnad per tonn CO<sub>2</sub> lagret i biokull er i området 60–120 US\$ [62]. Disse kostnadene kan kompenseres ved å selge karbonsertifikater på det frivillige markedet. Dette gjøres ved at en leverandør av kommersielle sertifikater registrerer karbonopptak i biokullet, sammen med selskaper eller bønder som drifter pyrolyse- og biokullvirksomhet. På vegne av leverandøren sertifiseres dette av en uavhengig tredjepart. Disse sertifikatene selges videre på karbonmarkedet som frivillige utslippskompensasjoner, til selskaper som ønsker å vise at de tar ansvar for sine klimautslipp [93].

Eksempelvis kan karbonfjerningssertifikater, CORCs (CO<sub>2</sub> Removal Certificates), kjøpes fra Puro.earth, en digital krediteringsplattform for karbonfjerning. Ett sertifikat utgjør ett tonn lagret CO<sub>2</sub>. Dette kan benyttes i landbrukssektoren og sementproduksjonen i Norge ved at CORCs kjøpes via Oplandske bioenergi (OBIO). OBIO er en norsk produsent av biokull fra bærekraftig skogbruk. Dette kan bonden og sementprodusenten benytte i sine virksomheter. Biokull fra OBIO har et karboninnhold på 92 %, en

andel som tilsvarer 3,36 tonn CO<sub>2</sub> per tonn produsert biokull. En tredjepart organisasjon, for eksempel Det Norske Veritas (DNV), verifiserer karbonopptaket i biokullproduksjonen for Puro.earth [94].

Prisen på et sertifikat med biokull som metode varierer over tid, lokasjon og leverandør. Et sertifikat via OBIO koster 210 euro på Puro.earth per mai 2023. For å inngå forhandlinger krever OBIO at det kjøpes minst 50 sertifikater. Det kan også kjøpes tilsvarende sertifikater fra andre leverandører i andre land, som Sverige og USA for henholdsvis 150 og 110 euro på samme krediteringsplattform [94]. Det antas at prisen for slike karbonfjernings sertifikater øker i fremtiden, på grunn av økning i produksjonskostnad og tilgjengelighet for biokull [95].

#### 2.3.2.4 Klimapolitikk og initiativer knyttet til bruken av biokull

Internasjonalt vurderes biokull som en ressurs for å redusere klimapåvirkningene globalt. International Biochar Initiative (IBI) er etablert for å fremme, overvåke og evaluere bærekraftig utvikling av internasjonale biokullprosjekter og -systemer. Europakommisjonens felles forskningssenter, Joint Research Centre (JRC), samarbeider med IBI [96]. I Norge krever en proposisjon fra Klima- og miljødepartementet at biokull må prioriteres for å kutte utslipp i landbrukssektoren, da det ellers ikke eksisterer støtteordninger for dette klimatiltaket i dag [97].

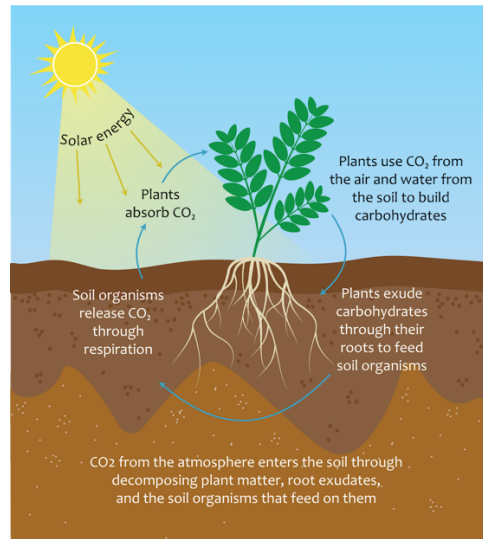
I 2014 finansierte Norges Forskningsråd et 3-årig SINTEF-prosjekt, CAPTURE+, for å utvikle biokull som et klimatiltak i Norge. Prosjektet skal blant annet undersøke de økonomiske, sosiale og politiske aspektene ved biokull som metode for biologisk karbonfangst og -lagring [98].

#### 2.3.3 Lagring av karbon i jorda ved karbonlandbruk

I dag inneholder jordsmonnet to til tre ganger mer karbon enn det som finnes i atmosfæren. Ergo kan små variasjoner i karboninnholdet i jorda medføre store påvirkninger på CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i atmosfæren, og de globale klimaendringene. Lagring av karbon i jordsmonnet, også kjent som «karbonlandbruk», er en naturlig kilde for opptak av CO<sub>2</sub> fra atmosfæren. Karbonlandbruk innebærer ulike metoder for forvaltning av jorda, spesielt for landbruksområder, for å øke karbonopptak og -lagring i jorda [99].

Organisk jord baseres på høyt karboninnhold, som øker avlingsutbyttet og fruktbarheten i jorda. Dermed er denne type dyrking et effektivt tiltak for å forbedre jordbruksjordens tilstand, samtidig som det bidrar til klimahandling. Ved å forvalte landbruket på en klimavennlig måte, åpnes det muligheter

for karbonlandbruk som en ressurs for karbonfjerning [99]. Figur 6 viser en skisse av hvordan fotosyntese og respirasjon skaper et kretsløp for karbonet i atmosfæren og jordsmonnet.



Figur 6: Illustrasjon av karbonkretsløpet i atmosfæren og jordsmonnet [100].

### 2.3.3.1 Bruk av karbonlandbruk og potensialet det har til å lagre karbon

Metoder for å øke karboninnholdet i jorda er varierte. Det kan blant annet være redusert eller ingen jordbearbeiding for å minimere jordforstyrrelser, endre plantemønstre eller planterotasjoner, kontrollert beiting av husdyr, eller påføre kompost eller avlingsrester på jordene [101]. Potensiale for karbonopptak er krevende å estimere, og varierer med hensyn på lokasjon og metode. Karbonopptak i jordsmonnet estimeres til å være 2–5 Gt CO<sub>2</sub>/år globalt i 2050 [62].

I en rapport fra NIBIO nevnes bruk av fangvekster og biokull som metodene med størst potensial for karbonopptak i Norge. Førstnevnte metode er planter som dyrkes sammen med avlingene og utnytter hele vekstsesongen, slik at landbruket tilføres økt karbon i jorda. Det oppgis i rapporten at 0,8 % av kornarealet i Norge benyttet fangvekster i 2019. Dersom dette arealet økes til 60 % kan det bindes 0,2 Mt CO<sub>2</sub> årlig. Denne metoden anses som den sikreste i Norge i forhold til effekt, tilgjengelig teknologi, og hvor lett det er å gjennomføre for bønder [86]. Biokull er metoden som nevnes med størst karbonbindingspotensial i landbruket i Norge. Det kan gi en mengde på 0,9 Mt CO<sub>2</sub>-ekvivalenter årlig [86].

### 2.3.3.2 Fordeler og ulemper ved karbonlandbruk

Som beskrevet tidligere, økes avlingsutbyttet og fruktbarheten i jorda ved å binde karbon og gjenopprette nedbrutt jord. Dette gir sunnere jordsmonn som øker motstandsdyktighet mot tørke og nedbørrike perioder. Sunn og organisk jord har samfunnsøkonomiske og økologiske fordeler da det krever mindre gjødsel, som reduserer både kostnader for bøndene og miljøpåvirkninger [101]. Karbonlandbruk åpner også muligheten for en potensiell inntektskilde for bøndene i form av karbonfjerningssertifikater [101, 102].

Karbonlandbruk medfører flere ulemper. Mengden karbon som kan bindes i jorda er begrenset, ettersom mettet organisk jord ikke kan oppta mer karbon gjennom karbonbinding. På grunnlag av at karbonbindingen kan reverseres dersom jordsmonnet forstyrres, er det usikkerhet rundt varigheten ved å lagre karbonet i jorda. Forebyggende tiltak er da nødvendig for å unngå dette. Det er vanskeligheter knyttet til overvåking, rapportering og verifisering av karbonfangsten i jordsmonnet [101].

I Norge er potensialet for økt karbonbinding i jordsmonnet begrenset. Dette fordi det allerede er et høyt innhold av karbon i jorda. Jord i kalde områder inneholder mer karbon enn varmere jord. I takt med klimaendringene er det risiko for mindre karbonholdig jord i Norge, da det fører til et varmere klima [86]. Landbruksarealet er lite sammenlignet med andre nasjoner, da landarealet består av 3,5 % jordbruksjord, ifølge SSB [66].

### 2.3.3.3 Kostnadsbilde av karbonlandbruk

I dag er det krevende å anslå pris for karbonlagring i landbruket. Dette fordi kostnader er avhengig av faktorer som lokasjon og metode, samt at det ikke eksisterer et karbonmarked som må følge lovpålagte krav i landbrukssektoren [93]. I 2021 estimerte studier at kostnader ved karbonlandbruk i USA var på om lag 10-100 US\$ per tonn CO<sub>2</sub> [102]. Disse estimatene kan kompenseres ved å selge karbonsertifikater på det frivillige markedet. Dette gjøres ved at bønder registrerer karbonopptak på landbruket sammen med leverandører av kommersielle sertifikater som sertifiserer økning av karbon i jorda. Disse sertifikatene selges videre på karbonmarkedet som frivillige utslippskompensasjoner [93].



Eksempelvis kan karbonfjerningssertifikater, CORCs, kjøpes fra Puro.earth, som nevnt i Kapittel 2.3.2.3 om biokull. I landbrukssektoren er det bare mulig å kjøpe biokullsertifikater fra Puro.earth. Dette fordi de bare utsteder sertifikater fra metoder som fjerner CO<sub>2</sub> i minimum 100 år [103].

#### 2.3.3.4 Klimapolitikk og initiativer knyttet til karbonlandbruk

Siden Kyotoavtalen ble vedtatt i 1997 har det vært økt internasjonalt fokus på binding av karbon i jorda. I årene etter er det etablert initiativer og prosjekter for bevisstgjøring, forskning og utvikling rundt karbonlandbruk [99]. I 2021 opprettet EU-kommisjonen en veiledningsbok om hvordan implementere resultatbaserte karbonlandbruksmekanismer og betalingsordninger i Europa. I Norge har regjeringen inngått en klimaplan mot 2030 der landet har forpliktet seg til å kutte eller binde 5 millioner tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i landbrukssektoren fra 2021-2030 [104].

I Norge er det nylig opprettet et initiativ, Karbonløftet, for å engasjere karbonlandbruk i landet. Initiativet er en del av et forskningsprosjekt som er finansiert av Forskningsrådet, med mål om å utvikle et karbonmarked som tar i bruk karbonsertifikater i norsk landbruk [105].

## 2.4 Teknologibasert karbonlagring

Ifølge IPCC vil ikke naturbasert karbonløsninger være nok for å stoppe klimaendringene. Det vil derfor være nødvendig med ulike teknologibaserte metoder, både for å ta opp CO<sub>2</sub> fra atmosfæren og for å redusere utslipp [106]. I dette kapittelet blir tre sentrale teknologibaserte metoder for CO<sub>2</sub>-fangst tatt for seg: Carbon Capture and Storage (CCS), Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) og Direct Air Capture with Carbon Capture and Storage (DACCS).

### 2.4.1 Karbonfangst og -lagring (CCS)

CCS er teknologi som kan fange, transportere og lagre CO<sub>2</sub> trygt under jordens overflate. Innen 2050, må utslipp av CO<sub>2</sub> reduseres med 5 Gt per år, noe som tilsvarer totalutslippet til flere tusen fabrikker og kraftverk. CCS kan bidra til å redusere 14-17 % av disse utslippene [107].

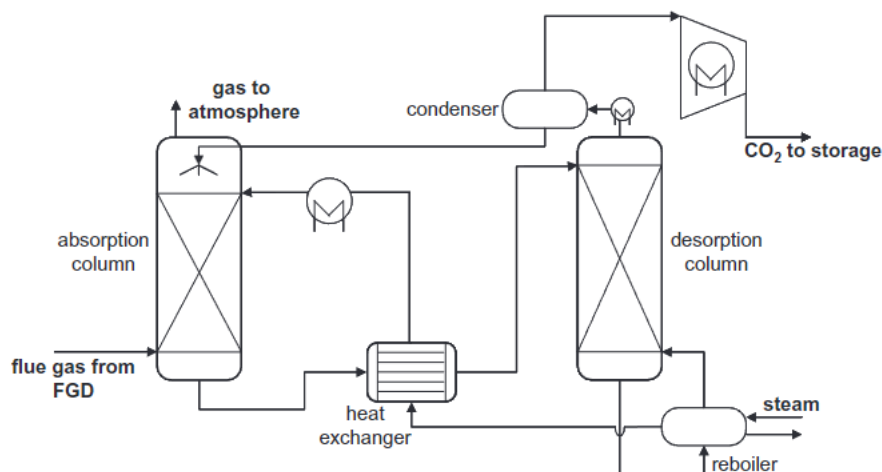
Norge er teknologiledene på CCS, og forskningen på teknologien startet allerede på 1980-tallet. Ideen kom fra USA, der de pumpet CO<sub>2</sub> ned i oljebrønnene for å øke produksjonen av olje, også kalt Enhanced

Oil Recovery (EOR). I Norge ble CCS først tatt i bruk på Sleipner-feltet og siden oppstart i 1996, er det lagret over 1 million tonn CO<sub>2</sub> årlig [108]. Teknologisenteret på Mongstad er verdens største teknologisenter for verifisering av CO<sub>2</sub>-fangstteknologier. Hovedfokuset til teknologisenteret er teknologisk utvikling for å redusere fangstkostnaden, samt miljø og teknisk risiko. Dette skal muliggjøre fullskala CO<sub>2</sub>-fangstanlegg i industrien [57, 109].

#### 2.4.1.1 Metoder for CCS og lagringspotensial

Det er i hovedsak tre ulike metoder CO<sub>2</sub> kan bli fanget på: etter forbrenning, før forbrenning og forbrenning med oksygen.

Fangst etter forbrenning er angivelig den metoden som er mest gjennomførbar. Dette skyldes at fabrikker og industri kan ettermontere teknologien med lavere kostnader, enn de to andre alternativene. Denne metoden baserer seg på en end-of-pipe-strategi, som vil si at luften renses etter forbrenning. I dag er den mest anerkjente metoden å fange CO<sub>2</sub> ved bruk av absorpsjon med flytende løsningsmidler, noe som vises i flytskjemaet i Figur 7. Først blir syngassen ført inn i en absorpsjonskolonne der CO<sub>2</sub> blir tatt opp av en kontinuerlig strøm av løsningsmiddel. Deretter blir det CO<sub>2</sub>-rike løsningsmiddelet ført inn i en desorpsjonskolonne for å regenerere løsningsmiddelet og skille ut CO<sub>2</sub>. De mest vanlige løsningsmidlene som brukes i dag er varm kaliumkarbonat-løsning og alkanolaminer [110].

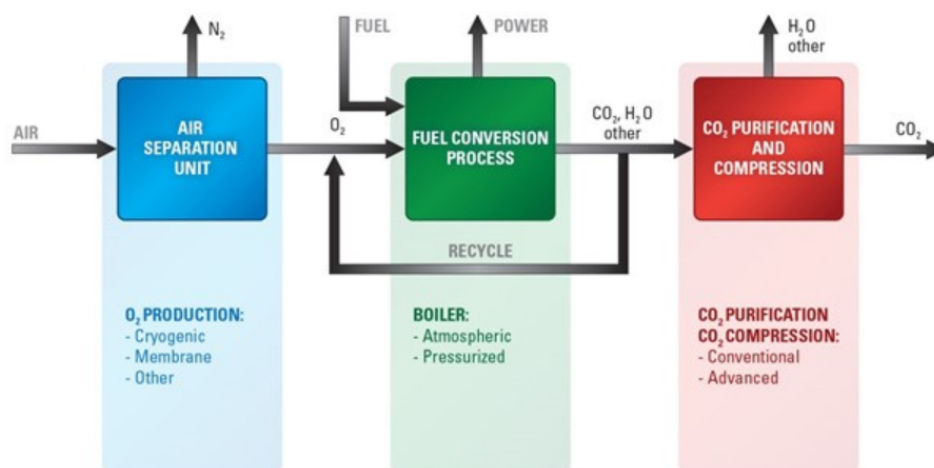


Figur 7: Flytskjema for hvordan CO<sub>2</sub> fanges etter forbrenning [110].

I fangst før forbrenning blir CO<sub>2</sub> fjernet fra brennstoffet før forbrenning. Dette oppnås ved integrated gasification combined cycle (IGCC), der CO<sub>2</sub> blir tatt opp fra en syngass. Videre går syngassen gjennom dampreforming der CO og H<sub>2</sub>O blir omdannet til CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>. Strømmen som går ut av

dampreformeringsreaktoren er under et trykk på rundt 35 bar og har en temperatur på rundt 300 °C, med en konsentrasjon av CO<sub>2</sub> på 15-50 %. Etter at vann og svovel er fjernet blir temperaturen redusert til 35 °C, dette gjør separasjon av CO<sub>2</sub> enklere. For å separere CO<sub>2</sub> kan det bli benyttet ulike teknologier, som absorpsjon, adsorpsjon og membraner. Den mest utviklede metoden er å bruke absorpsjon ved bruk av Selexol eller Rectisol. Etter at CO<sub>2</sub> er fanget, blir det H<sub>2</sub>-rike drivstoffet forbrent for å produsere energi [111].

I oxy-fuel forbrenning blir brenselet forbrent i ren oksyngass, istedenfor luft med stor konsentrasjon av nitrogen. Når rent oksygen brukes som brensel oppstår det svært høye temperaturer. For å forhindre dette, blir avkjølt og resirkulert røykgass injisert i forbrenningskammeret. Røykgassen består for det meste av CO<sub>2</sub> og vandamp, som senere blir kondensert. Resultatet er en strøm med høy konsentrasjon av CO<sub>2</sub>. Den høye CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen gjør det enklere å separere CO<sub>2</sub> fra røykgassen [112]. Et forenklet flytskjema av oxy-fuel forbrenning er vist i Figur 8.

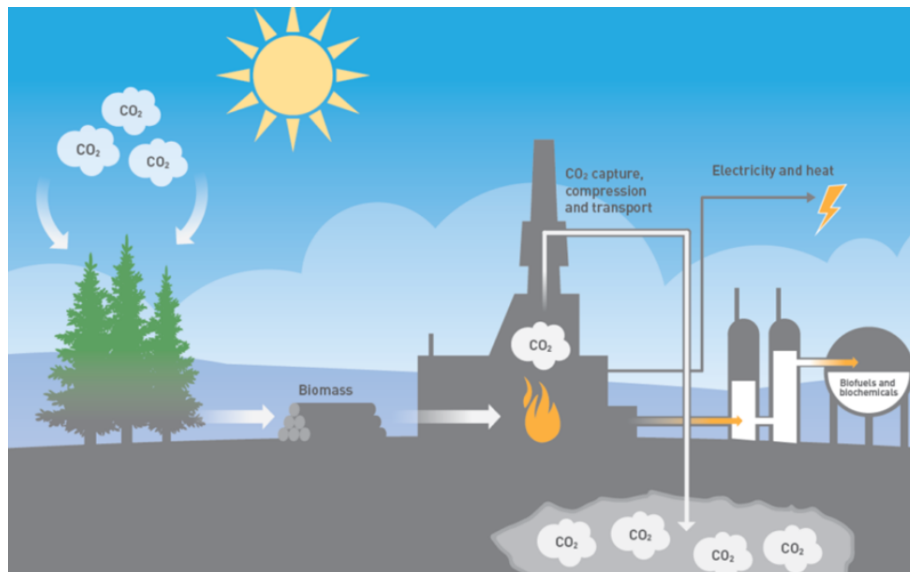


Figur 8: Flytskjema for fangst av CO<sub>2</sub> med oxy-fuel forbrenning [113].

Andre metoder knyttet til CCS er Carbon Capture Utilisation and Storage (CCUS) og BECCS. CCUS er at fanget CO<sub>2</sub> blir utnyttet av industrien til å produsere ulike produkter. Eksempler på slike produkter er syntetisk drivstoff, kjemikalier og kullsyreholdige drikkevarer. Som nevnt tidligere, kan CO<sub>2</sub> også bli brukt for å utvinne mer olje og gass (EOR) [114, 115].

BECCS, også kalt Bio-CCS, er en metode hvor CO<sub>2</sub> fanges på lik måte som CCS. Metoden skiller seg fra CCS ved at biomasse blir brukt som brensel istedenfor fossilt brensel. Ved forbrenning av biomasse produseres det CO<sub>2</sub>, men det tilføres ikke ny CO<sub>2</sub> til atmosfæren. Dette skyldes som nevnt at biomasse, gjennom fotosyntesen, tar opp CO<sub>2</sub> når planter og trær gror. Å fange og lagre CO<sub>2</sub> fra forbrenning av

biomasse er derfor en karbonnegativ metode [116]. Figur 9 illustrerer hvordan CO<sub>2</sub> lagres ved bruk av BECCS.

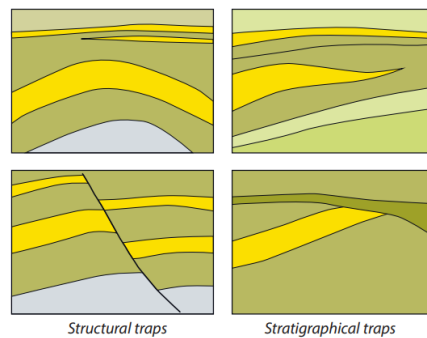


Figur 9: Enkel skisse for hvordan CO<sub>2</sub> fanges fra biomasse ved bruk av BECCS. [116].

CCS er avhengig av trygge, sikre og kostnadseffektive løsninger for transport av CO<sub>2</sub> til lagringsplassen. Metodene som kan benyttes er transport med skip, lastebil, tog og rør både offshore og onshore. Hvilken metode som benyttes avhenger av mengden CO<sub>2</sub>, renheten og distansen den skal transporteres [117]. Av disse metodene er transport ved skip og rør mest aktuelle. Dette fordi disse metodene gjør det enklere å sende større mengder CO<sub>2</sub>, og fordi kostnaden per tonn CO<sub>2</sub> er lavere [118]. Transport ved bruk av skip er mest aktuelt ved mindre mengder CO<sub>2</sub> over lengre distanser. Ved større CO<sub>2</sub>-mengder og kortere avstander, er det mer praktisk å benytte rør [118].

Det siste steget i CCS er lagring. Etter transport, blir CO<sub>2</sub> avlevert til en terminal, før det blir sendt videre ned i geologiske formasjoner for endelig lagring. For å forhindre CO<sub>2</sub>-lekkasjer til atmosfæren, er det noen viktige egenskaper som de geologiske lagringsplassene må ha. Bergartene i reservoarene må blant annet være tilstrekkelig porøse og permeable, samt være mettet med saltvann. Reservoarene må også være på tilstrekkelig dybde, rundt 800-2 500 m, og det må være en tett takbergart som hindrer CO<sub>2</sub>-lekkasje. Lagringsplassen må ha rikelig kapasitet, slik at det er stort nok volum til lagring [119]. Eksempler på steder som kan egne seg er gamle petroleumfelter eller saltvannsakviferer [120].

Karbondioksid holdes på plass i geologiske formasjoner ved bruk av en av fem fangstmekanismer. De dominerende fangstmekanismene er strukturelle eller stratigrafiske feller, som vist i Figur 10 [121].



Figur 10: Illustrasjon av hvordan strukturelle og stratigrafiske fangstmekanismer holder CO<sub>2</sub> på plass i reservoar [121].

Potensialet til CCS er stort både internasjonalt og i Norge. CCS kan iverksettes i sement- og stålindustrien som står for 14 % av verdens CO<sub>2</sub>-utslipp. CCS har potensial i energiindustrien, der ca. 80 % av verdens energiforsyning kommer fra fossilt brensel [122].

Den norske kontinentalsokkelen har stort potensial når det kommer til lagringskapasitet av CO<sub>2</sub>. Dette opplyses i Oljedirektoratets CO<sub>2</sub>-atlas, som viser at formasjonene med høyest lagringskapasitet er Utsiraformasjonen og Bryne/Sandnesformasjonen som har lagringskapasitet på henholdsvis 15,8 Gt og 13,6 Gt CO<sub>2</sub>. Totalt rapporteres det at Norskehavet har kapasitet til å lagre totalt 70 Gt CO<sub>2</sub> [120]. På verdensbasis er det lagringskapasitet til å lagre mellom 8 000-55 000 Gt CO<sub>2</sub>, noe som er langt større enn det som er nødvendig å lagre [123].

BECCS fanger i dag 2 Mt CO<sub>2</sub> årlig, men ifølge IPCC har BECCS potensial til å fange mellom 0,5-11 Gt CO<sub>2</sub> årlig mot slutten av århundret. Potensialet til BECCS er riktignok vanskelig å estimere, da potensialet er begrenset av tilgang på biomasse [106, 124].

#### 2.4.1.2 Fordeler og ulemper knyttet til CCS

CCS er teknologi som har flere fordeler. Teknologien kan bidra til å fange og redusere utslipp direkte fra utslippskilden i ulike industrier. For eksempel fra energi-, sement- og stålsektoren. Fangst av CO<sub>2</sub> ved CCS har også høy effektivitet. CCS før og etter forbrenning kan fange om lag 80-90 %. Oxy-fuel forbrenning har derimot høyere effektivitet, da det kan fange mer enn 90 % av utslippene som ellers ville blitt sluppet ut i atmosfæren [51]. I 2019 kom ca. 80 % av verdens energiforsyning fra fossilt brensel. Ved å bruke CCS i energiindustrien, kan dermed store utslipp forhindres [125]. CCS er også en enkel teknologi å implementere i eksisterende infrastruktur [51].

Ved bruk av CCUS, vil industri som er avhengig av CO<sub>2</sub>, kunne bruke «resirkulert CO<sub>2</sub>» og forhindre ytterligere utslipp. Som nevnt tidligere kan CO<sub>2</sub> benyttes i EOR. I EOR injiseres CO<sub>2</sub> i oljefelter for å opprettholde trykket. Dette bidrar til at mer olje og gass kan utvinnes. Dersom BECCS benyttes, vil CO<sub>2</sub> som gjenbrukes være karbonnøytralt. Salg av CO<sub>2</sub> vil kunne redusere kostnadene av CO<sub>2</sub>-fangst [114].

Utover fordelene med CCS-teknologi, følger det med noen ulemper. En utfordring er at prosessen er energikrevende og vil minske produsert utbytte. Dette kan føre til at prisen på produktene kan øke, og at det må benyttes mer brennstoff for å produsere like mye som prosessen ville gjort uten CCS. I dag har CCS høye kostnader, og teknologien krever store investeringer til både anlegg og drift [50, 51].

Selv om CCS vil spille en viktig rolle for å redusere utslipp, er det fortsatt flere industrier som ikke kan benytte seg av teknologien og vil ha vanskeligheter med å redusere utslippene. Andre ulemper er at CCS kan forlenge overgangen til fornybare energikilder. Dette kan forklares ved at oljesektoren og andre industrier benytter CCS, som fører til at oljesektoren forlenger sin levetid [126].

Andre utfordringer er knyttet til lagring. Selv om IEA rapporterer at teknologien for geologisk lagring er klar, vil det fortsatt være en viss usikkerhet rundt lekkasjer [127]. Dette skyldes naturlige årsaker som geologisk stabilitet, men kan også skyldes menneskelig aktivitet. Lagring av CO<sub>2</sub> i basalt, som er en porøs bergart og passer utmerket for lagring av CO<sub>2</sub>, er heller ikke problemfritt. For at CO<sub>2</sub> skal lagres i basalt, blir CO<sub>2</sub> først løst opp i vann før det pumpes ned i basaltformasjoner. Dette kan kreve opptil 27 tonn vann per tonn lagret CO<sub>2</sub> [128].

BECCS har ulemper knyttet til avhengighet av tilgang på biomasse. For å benytte seg av biomasse som fører til addisjonalitet kan BECCS være areal- og vannkrevende [106].

#### 2.4.1.3 Kostnadsbilde for anvendelsen av CCS

Det er variasjoner for anslått pris på karbonlagring ved CCS. Ifølge IEA varierer også kostnadene fra hvilken industri CO<sub>2</sub> fanges fra. Kostnadene for CCS ved kraftproduksjon er rundt 50-100 US\$/tonn CO<sub>2</sub>, ved sementproduksjon 60-120 US\$/tonn CO<sub>2</sub> og ved jern- og stålproduksjon 40-100 US\$/tonn CO<sub>2</sub>. Fangst i de nevnte industriene har lav konsentrasjon av CO<sub>2</sub> i avgassen. Dette fører til økte kostnader i forhold til annen industri med høyere konsentrasjon i avgassen. Kostnader knyttet til transport og lagring kommer utenom. Disse kostnadene varierer med mengde CO<sub>2</sub> og distansen det skal transporteres. Kostnaden for transport av CO<sub>2</sub> er estimert til 2-14 US\$/tonn CO<sub>2</sub> og lagring til 1-10 US\$/tonn CO<sub>2</sub> [115]. Dette samsvarer med tall fra IPCC-rapporter [51]. I en annen rapport fra 2015 er

kostnaden av å redusere utslipp av 1 tonn CO<sub>2</sub> estimert til 200-250 US\$. Det påpekes derimot at denne kostnaden er sensitiv for drivstoffpriser og andre faktorer [129]. For at kostnaden av CCS skal reduseres, er det nødvendig med ytterligere forskning og utvikling av CCS [130]. CO<sub>2</sub>- og kvoteavgiften blir historisk sett, høyere for hvert år. I 2021 ga disse avgiftene en samlet kostnad på rundt 1 100 NOK/tonn CO<sub>2</sub>. Denne prisen er også forventet å øke i årene fremover [131]. Kostnadsestimater for BECCS varierer fra 15-400 US\$ per tonn CO<sub>2</sub>. Dette skyldes at kostnaden varierer med type biomasse som benyttes [132].

#### 2.4.1.4 Klimapolitikk og initiativer relatert til CCS

Etter at de store klimaprotokollene ble inngått, har det vært mye oppmerksomhet rettet mot CCS. Det er flere prosjekter som har mottatt statsstøtte, og Langskip er et av disse prosjektene. Prosjektets første fase har et budsjett på 25,1 milliarder kroner, der staten dekker ca. 2/3 av kostnadene, mens industrien dekker resten [133]. Langskip skal demonstrere CCS-teknologien, gjennom fangst av CO<sub>2</sub> fra industri, og sikker transport og lagring. I første omgang skal det lagres 1,5 millioner tonn CO<sub>2</sub> årlig, men Northern Lights, som er den delen av prosjektet som er ansvarlig for transport og lagring, har planer om å øke kapasiteten til 5 millioner tonn årlig. Prosjektet har som mål å komme i gang innen 2024 [134].

For å redusere kostnadene av CCS vil det kreves investeringer til forskning og utvikling. CCS er som nevnt støttet av myndighetene og blir ansett som en viktig teknologi. Norge har satt seg mål om å redusere utslipp med 50-55 % fra referanseåret 1990, og CCS er en del av strategien for å oppnå dette [135]. Langskip bidrar med utvikling og er med på å skape løsninger for dagens klimautfordringer. Flere industrier som sementproduksjon og avfallsforbrenning er avhengig av CCS, da dette er eneste mulighet for å redusere klimagassutslipp. Tall fra IPCCs femte hovedrapport viser at uten CCS-teknologi, vil det koste dobbelt så mye å holde økningen av gjennomsnittstemperaturen under 2°C [136].

#### 2.4.2 Direct Air Capture and Carbon Storage (DACCS)

IPCC har anslått at innen 2050, må det fjernes mellom 2-20 Gt CO<sub>2</sub> fra atmosfæren årlig for å nå målene i Parisavtalen. Derfor er det nødvendig med løsninger som har evnen til å fjerne CO<sub>2</sub> fra atmosfæren, slike løsninger omtales ofte som Carbon Dioxide Removal (CDR) metoder [106]. DACCS er en teknologi som har evnen til dette, og blir av den grunn omtalt som en karbonnegativ metode. utfordringene

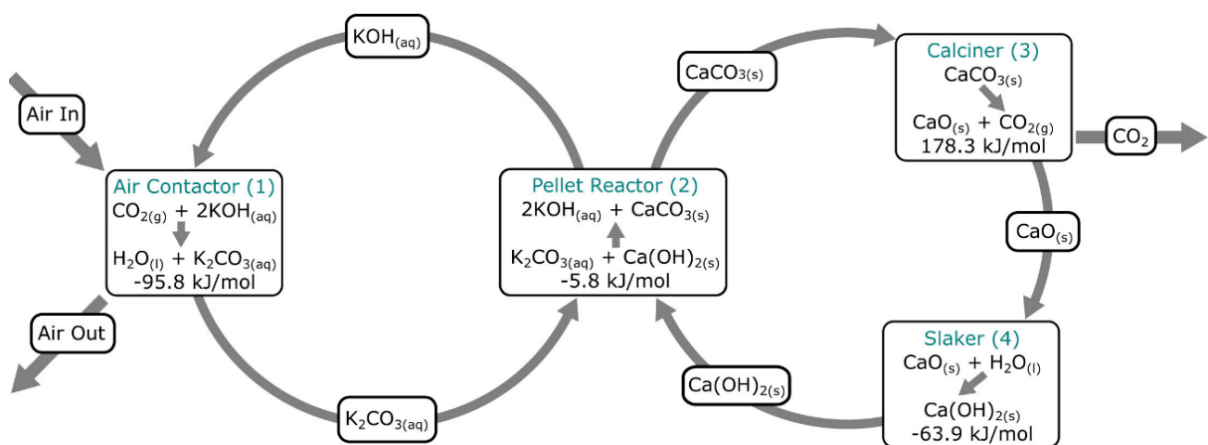
med teknologien er at det krever store mengder energi, som bør være ren energi for å øke effekten. Dette skyldes at effekten av DACCS er avhengig av karbonintensiteten til energikilden [137].

I dag er det 18 DACCS-anlegg i drift og det tas opp rundt 0,01 Mt CO<sub>2</sub> per år. Det sveitsiske selskapet Climeworks drifter verdens største DACCS-anlegg på Island, kalt Orca. Flere prosjekter er også under utvikling og planlegging. Ett av disse er Carbon Engineering, som er i gang med å konstruere et DACCS-anlegg med potensial til å ta opp 1 Mt CO<sub>2</sub> per år [138]. IEA har utviklet et scenario for hvordan verden kan oppnå klimanøytralitet innen 2050. I dette scenarioet skal DACCS i 2030 ta opp 85 Mt CO<sub>2</sub> og 980 Mt CO<sub>2</sub> i 2050, noe som krever en stor oppskalering fra i dag [139].

#### 2.4.2.1 Metoder for DACCS og potensialet det har til å lagre karbon

Det er flere metoder for hvordan CO<sub>2</sub> kan tas opp fra luften. De to metodene som dominerer, er Liquid DACCS (L-DACCS) og Solid DACCS (S-DACCS). Metodene er relativt like, men skiller seg på måten CO<sub>2</sub> fanges og løsrives på.

I L-DACCS blir CO<sub>2</sub> fanget av en basisk løsning, og det dannes et salt med en karbonatgruppe. Saltet reagerer videre med kalsiumhydroksid (Ca(OH)<sub>2</sub>) og danner kalsiumkarbonat (CaCO<sub>3</sub>). Kalsiumkarbonat blir deretter varmet opp til over 850°C, for å skille ut tilnærmet ren CO<sub>2</sub>-gass og fast kalsiumoksid (CaO) [140, 141]. Kalsiumoksidet blir gjenbrukt ved hydrering. Etter at CO<sub>2</sub> blir skilt ut blir den gjort om til væske før lagring eller bruk. Figur 11 viser hvordan CO<sub>2</sub> blir fanget ved bruk av L-DACCS.

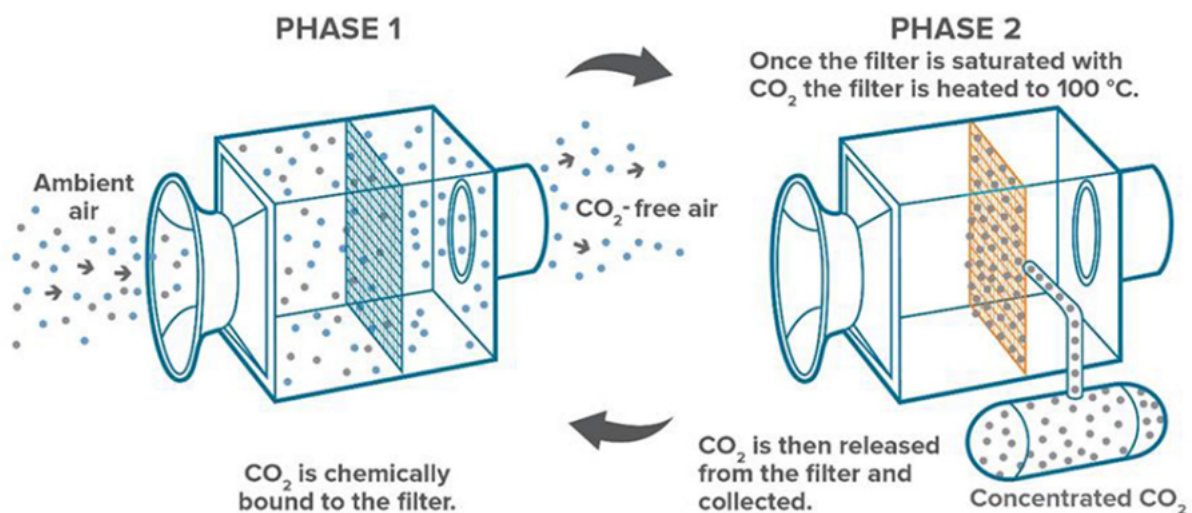


Figur 11: Illustrasjon av hvordan CO<sub>2</sub> fanges ved bruk av L-DACCS [141].



Det er flere muligheter for hvordan CO<sub>2</sub> kan tas opp ved S-DACCS. Metoden som beskrives her, er den teknologien Climeworks benytter på Orca [142].

S-DACCS består av to steg: adsorpsjonsfase og desorpsjonsfase. Luft blir ved hjelp av vifter dratt gjennom et adsorberende materiale som selektivt fanger CO<sub>2</sub>. Når adsorbenten er mettet med CO<sub>2</sub>, blir modulen varmet opp til 90-100°C. For å fremme desorpsjon av CO<sub>2</sub>, blir trykket senket til 50-60 mbar under denne prosessen. Etter at CO<sub>2</sub> er skilt ut, blir den komprimert før lagring [141]. Figur 12 illustrer hvordan CO<sub>2</sub> fanges ved S-DACCS.



Figur 12: Illustrasjon på hvordan Climeworks Orca-anlegg fanger opp CO<sub>2</sub> ved S-DACCS [142].

Etter at CO<sub>2</sub> er blitt tatt opp, kan den enten lagres på samme måte som CCS, eller bli utnyttet i industrien. Dersom CO<sub>2</sub> som fanges blir utnyttet fremfor lagret, brukes akronymet DACCU, som står for Direct Air Capture and Carbon Utilisation. [143]

Det er vanskelig å forutse fremtiden for DACCS, men det er forventet at DACCS kommer til å være et nøkkelelement for å nå målene i Parisavtalen. I en rapport fra IPCC er det forventet at DACCS ved slutten av århundret, skal kunne ta opp mellom 5-40 Gt per år. Dette er derimot kun teoretisk begrenset av tilgang på nok energi [106].

Technology Readiness Level (TRL) er en skala fra 1-9, som forteller hvor moden en teknologi er. Metoden ble utviklet av NASA, men brukes i dag av EU, Innovasjon Norge, DNV etc. [144-146]. DACCS er i dag på TRL 6, som betyr at det vil kreve mer forskning og utvikling for å redusere kostnadene og gjøre teknologien kommersielt tilgjengelig. [139]. Hvis DACCS-teknologien og andre CDR-teknologier når potensialet de er spådd, kan CDR-teknologi redusere atmosfærens CO<sub>2</sub>-nivå raskere enn jordens naturlige karbonsyklus [106].

Som nevnt skal DACCS i IEA sitt scenario ta opp 85 Mt CO<sub>2</sub> i 2030 og 980 Mt CO<sub>2</sub> i 2050. For at dette skal være mulig, må utviklingen og oppskaleringen av DACCS skje raskt. I samme scenario må det bygges åtte DACCS-anlegg med årlig kapasitet på 1 Mt CO<sub>2</sub> dette tiåret, 50 anlegg årlig fra 2030-2040 og 40 anlegg årlig mellom 2040 og 2050 [139].

Det er også forventet at DACCU skal spille en stor rolle mot 2050. I dag er det prosjekter som bruker resirkulert CO<sub>2</sub> for å produsere karbonnøytralt, syntetisk drivstoff. Ett eksempel på dette er Norsk e-Fuel, som har ambisjoner om å produsere 250 millioner liter drivstoff årlig innen 2030 [147]. Dette kan bidra til at flyindustrien reduserer sitt klimafotavtrykk. Andre prosjekter bruker resirkulert CO<sub>2</sub> til kjemikalier, materialer og drikkevarer. Dette bidrar til at disse industriene kan bli klimanøytrale, men fører til at lagringstiden av CO<sub>2</sub> ikke blir permanent [139]. Ved bruk i materialer kan CO<sub>2</sub> bli lagret i flere år, men ved bruk i drikkevarer og drivstoff er lagringstiden begrenset.

#### 2.4.2.2 Fordeler og ulemper ved DACCS

Selv om DACCS-teknologien har behov for ytterligere forskning, kan DACCS redusere store mengder CO<sub>2</sub> på lang sikt. Teknologien er fortsatt tidlig i utviklingsfasen, og det er forventet at kostnadene, både operasjons- og kapitalkostnadene, reduseres. Det er forventet at kostnadene fra pilot-anlegg til kommersielle anlegg vil bli billigere. Teknologitvklere estimerer at L-DACCS er forventet en kostnadsreduksjon på 27 %, og at S-DACCS er forventet en kostnad på mellom 3-6 ganger lavere enn i dag [139].

Fordelen med å utnytte CO<sub>2</sub> som tas opp ved DACCU, er at industrier som i dag benytter fossilt drivstoff, kan benytte syntetisk drivstoff som er karbonnøytralt. Ved å selge CO<sub>2</sub> som fanges, kan også kostnadene reduseres [141].

På grunn av evnen til å ta opp CO<sub>2</sub> direkte fra luften, kan DACCS-anlegg teoretisk plasseres hvor som helst der det er tilgang på lagringsplass og ren energi [148]. Av den grunn kan DACCS-anlegg plasseres

på steder hvor det ikke forstyrrer omgivelsene. Areal- og vannforbruket for teknologien er lavt i forhold til andre CDR-teknologier. I en rapport fra Ozkan, er det estimert at arealforbruket som trengs for å møte Parisavtalen, med dagens DACCS-teknologi er 1920 km<sup>2</sup> [149]. Dette illustrer at utfordringene med DACCS ikke er knyttet til arealforbruk, men energiforbruk.

Det er flere utfordringer med DACCS, og en av ulempene er den lave konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> i luften. Konsentrasjonen er 100-500 ganger lavere enn den er i industriell røykgass hvor CO<sub>2</sub>-fangst etter forbrenning brukes. Av den grunn må DACCS behandle større gassvolum per tonn CO<sub>2</sub> fanget [141]. Andre ulemper er at prosessen krever store mengder energi. I 2020 rapporteres om et forbruk på 8 GJ/tonn CO<sub>2</sub> ved S-DACCS og 10 GJ/tonn CO<sub>2</sub> ved L-DACCS. Dette forbruket er ifølge eksperter forventet til å gå ned til henholdsvis 6 GJ/tonn CO<sub>2</sub> og 8 GJ/tonn CO<sub>2</sub> innen 2050 [139]. For å illustrere dette, vil energiforbruket ved å fange 10 Gt CO<sub>2</sub> per år være mellom 40-100 EJ/år, som tilsvarer ca. én åttendedel av verdens årlige energiforsyning [106]. Andre utfordringer med DACCS er at teknologien er kostbar. Med en kostnad på mellom 600-1 000 US\$/tonn CO<sub>2</sub>, er det andre offset-metoder som er rimeligere [139].

Det er usikkert hvordan teknologien fungerer i ulike klimaer. Produktiviteten til CO<sub>2</sub>-opsamlerne fungerer best hvor det er lav luftfuktighet og lave temperaturer. Videre er produktiviteten noe lavere der det er høy luftfuktighet og lave temperaturer. I temperaturer lavere enn -15 °C, synker produktiviteten til opsamlerne raskt. Det adsorberende materiale er heller ikke testet og utviklet for å brukes i områder med slike temperaturer [141, 150].

En annen utfordring er at kjøp og salg av DACCS-kreditter innad i EU, for øyeblikket er drevet av det frivillige markedet. Dette skyldes at DACCS-kreditter ikke er en del av EU ETS, og ikke anerkjennes av UNFCCC [139]. Riktignok er EU-kommisjonen i gang med å utvikle en sertifiseringsordning for CDR-teknologier [151].

#### 2.4.2.3 Kostnadsbilde ved bruk av DACCS

Å fange CO<sub>2</sub> direkte fra luften er i dag kostbart. Dette skyldes som nevnt den lave konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> i luften, det store energibehovet, og at teknologien i dag er under utvikling. Variasjonen er stor når det kommer til kostnadsestimater for å fjerne CO<sub>2</sub> med DACCS. Kostnadsestimatene varierer fra 100-1 000 US\$ per tonn CO<sub>2</sub> [152]. I IPCC Climate Change rapport fra 2022, estimerer de at kostnaden for pilot-anlegg er 600-1 000 US\$/tonn CO<sub>2</sub> og for kommersielle anlegg 100-300 US\$/tonn CO<sub>2</sub> [106]. Pilot-estimatet, illustreres av Climeworks-anlegget på Island, Orca. Climeworks rapporterer om en

kostnad på 600 US\$ per tonn CO<sub>2</sub> i dag, men forventer at kostnadene skal minke til 300 US\$/tonn CO<sub>2</sub> innen 2025 og 100 US\$/tonn CO<sub>2</sub> innen 2030. Kostnadsreduksjonen skal oppnås gjennom gradvis oppskalering, forskning, utvikling og ved å lære av erfaringene [141].

Kostnaden ved DACCS varierer avhengig av lokasjon, hvilken metode som benyttes, lagringsmuligheter og energikostnad. L-DACCS krever større energimengder på grunn av den høye temperaturen for kalsinering, mens S-DACCS står for den største kapitalkostnaden [106]. For at kostnaden av DACCS skal nå målet om 100 US\$/tonn CO<sub>2</sub>, må kostnaden for energi være lavere enn 0,05 US\$ per kWh [141]. Orca-anlegget på Island er sett på som en ideell lokasjon. Dette skyldes tilgang på billig og ren geotermisk energi, og fordi det er kort vei til gode lagringsplasser. Island passer utmerket for lagring av CO<sub>2</sub>, da det består av 90 % basalt [128]. Dermed unngår Orca å bruke store kostnader for å transportere CO<sub>2</sub> til egnet lagringsplass.

Det er i dag mulig å kjøpe DACCS-kreditter, men disse er foreløpig dyrere enn andre alternativer. Dette skyldes at selskapene som selger kreditter er avhengig av finansiering for videre utvikling, men også at driftskostnadene er store. Climeworks selger kreditter for 1 000 euro per tonn CO<sub>2</sub>, Nordic DAC Group selger kreditter på vegne av andre operatører for 650 euro per tonn CO<sub>2</sub> [148, 153]. Carbon Engineering selger også kreditter, men prisen er ikke oppgitt [154].

#### 2.4.2.4 Klimapolitikk og initiativer knyttet til DACCS

Som nevnt kan ikke kreditter gjennom DACCS utnyttes i EU ETS. Men EU-kommisjonen er i gang med å utvikle sertifisering av CDR-kreditter. For at dette skal oppnås, påpeker kommisjonen på flere viktige faktorer. Det må etableres gode metoder for å kvantifisere mengden CO<sub>2</sub> fanget, CO<sub>2</sub> må lagres over lang tid, og at det er en tredjepart som verifiserer mengden karbon fjernet [151].

For at DACCS skal nå potensialet som er antatt fra IPCC og IEA, er teknologien avhengig av finansiering og statelig støtte. De siste årene har land som USA, Canada, Australia, Storbritannia og Japan opprettet ulike finansieringsinitiativer som skal brukes for å utvikle teknologi som kan redusere klimagasser [139, 141]. Et annet eksempel på slike initiativer er EUs Horizon Europe program. Horizon Europe er EUs største investeringsprogram, der kan bedrifter og institusjoner søke om finansiering til forskning og innovasjon [155]. I tillegg til at det er opprettet store finansieringsfond, har investeringsinteressen fra store internasjonale selskaper økt. Eksempler på slike selskaper er Microsoft, Meta og Shopify etc. [139].

I dag har ikke norske myndigheter gått inn i DACCS-markedet, men det er økende interesse for teknologien. I 2022 skrev SINTEF og konsulentfirmaet Vista Analyse en rapport om DACCS på oppdrag fra Miljødirektoratet. Hensikten med rapporten var å få oversikt over teknologien og samtidig se på mulighetene av å benytte teknologien i Norge. Konklusjonen var at teknologien kan benyttes, men at kostnaden foreløpig er høyere enn andre metoder [\[141\]](#).

Selv om staten foreløpig ikke har utredet en strategi for teknologier som fjerner CO<sub>2</sub>, er planlegging av Norges første DACCS-anlegg allerede i gang. Carbon Removal AS har lagt frem planer om å bygge et DACCS-anlegg, ved Øygarden Energipark. De har etablert et samarbeid med Carbon Engineering og skal benytte teknologien de har utviklet for å realisere planene. Anlegget skal ha kapasitet til å ta opp 0,5 Mt per år, men kan ha mulighet til å øke til 1 Mt per år. CO<sub>2</sub> som blir tatt opp skal etter planene bli permanent lagret under havbunnen, ved hjelp av Northern Lights-prosjektet. De har også etablert et samarbeid med Nordic DAC Group som skal tilby sertifiserte CDR-kreditter [\[156\]](#).

## 2.5 Andre teknologier som kan lagre karbon

Andre teknologier omfatter potensielle løsninger som kan brukes som karbon-offset, men som ikke nødvendigvis er like store som tidligere nevnte alternativer.

### 2.5.1 Karbonlagring ved økt forvitring

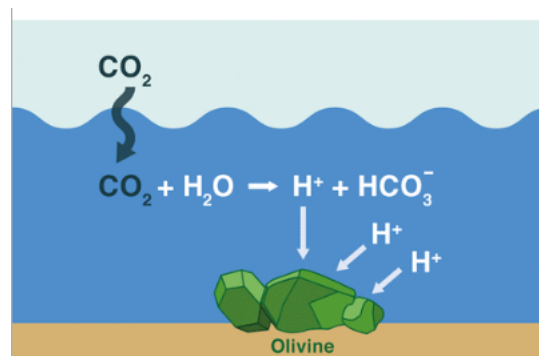
Forvitring er en naturlig prosess der bergarter, jordsmonn og mineraler brytes ned av fysiske og kjemiske prosesser. Dette gir større overflateareal som danner et bedre fundament for karbonfangst. Regnvann har evne til å absorbere CO<sub>2</sub> fra atmosfæren på vei ned mot bakken. Karbondioksidet i regnvannet vil i kontakt med enkelte materialer, reagere med disse og danne økt karboninnhold på jordoverflaten. Globalt absorberer naturlig forvitring 1,1 Gt CO<sub>2</sub> fra atmosfæren hvert år [\[157\]](#).

Dette er en naturlig mekanisme for karbonfangst, som de siste årene har blitt en del av en teknologisk utvikling. Prosessen kan akselereres industrielt ved å øke forvittringshastigheter av substanser som basalt, kalkstein og andre mineraler, og fordele dette utover jordoverflaten. Dersom avfallsmaterialer fra ulike industrier resirkuleres, eksempelvis betong- og gruveavfall, kan karbonopptak ved forvitring potensielt økes til 2,6-3,9 Gt CO<sub>2</sub> per år i 2050. Dette reduserer miljøpåvirkningene, og skaper en sirkulær økonomi [\[158\]](#). Metoden er derimot kostbar og energikrevende, da det kan kreves gruvedrift og utvinning av materialer. Disse må videre knuses, transporteres og spres over store områder for å

oppnå effekt. Kostnadene kan dermed overstige 550 US\$ per tonn CO<sub>2</sub>, avhengig av blant annet skala og bruk av resirkulerte materialer. Potente miljøgifter som tungmetaller finnes naturlig i disse materialene, og er dermed en trussel for miljøet. Det er da nødvendig med ytterligere spaltning av disse for å kunne ta materialene i bruk. Dette er industrielle prosesser og kan dermed bidra til CO<sub>2</sub>-utslipp. De nevnte problemer svekker denne mekanismen som en negativ utslippsteknologi [159].

### 2.5.2 Karbonfangst ved hjelp av havalkalisering

Som nevnt i Kapittel 2.2 er havet en viktig bidragsyter til opptak av antropogene karbonutslipp. Dette på bekostning av marine økosystemer, da blant annet surheten i havoverflaten har økt med 30 % siden førindustriell tid. Alkalisering øker havets pH og evne til å ta opp ytterligere CO<sub>2</sub> fra atmosfæren. Metoden kan dermed redusere atmosfærisk karbon, samtidig som den motvirker havforsuring [160]. Dette gjøres som ved metoden for økt forvitring, men her fordeles forvitrede bergarter og mineraler i havet. Ved denne metoden benyttes disse materialene for at havet skal absorbere mer karbondioksid fra luften. Dette er basiske substanser som for eksempel kalk og olivin [161]. Figur 13 illustrerer hvordan mineralet, olivin, i vann påvirker CO<sub>2</sub> opptaket. Olivin har et høyt innhold av metallene magnesium og jern. Disse metallene er avgjørende for karbonsekvistrering og dannelsen av karbonatmineraler, det vil si forbindelser som består av karbonationer, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> [162].



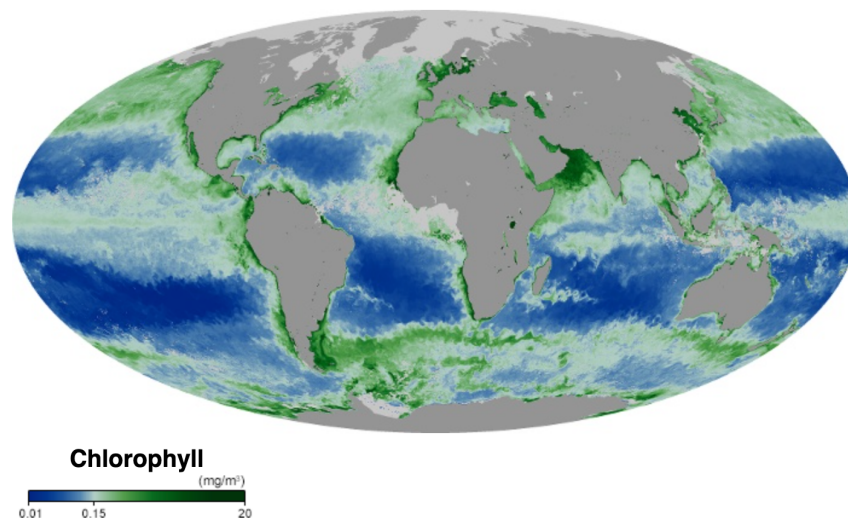
Figur 13: Illustrasjon av karbonfangst og alkalisering i hav ved hjelp av mineralet olivin [161].

Figuren viser at olivin omdanner CO<sub>2</sub> oppløst i vann til bikarbonat, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, en stabil basisk forbindelse. Dette stimulerer havet til å gjenopprette likevekten ved å absorbere ytterligere CO<sub>2</sub> fra luften. Illustrasjonen viser også at olivin binder hydrogenioner, H<sup>+</sup>. Når H<sup>+</sup>-aktiviteten i havet reduseres, vil også surheten i havet reduseres [163].

I teorien er det tilnærmet ubegrenset mengde karbon som kan sekvestreres permanent ved havalkalisering. En artikkel fra 2017 anslår at havet kan ta opp mer enn 800 Gt CO<sub>2</sub> innen slutten av århundret. Dette er avhengig av mengde olivin som er tilgjengelig og kornstørrelsen av disse. Ifølge artikkelen bør størrelsen ikke overskride 10 µm, da større korn har lite karbonbindingspotensial [163]. I likhet med økt forvitring, gjør dette metoden kostbar og energikrevende. Resirkulering av materialer kan derimot begrense dette, samt redusere CO<sub>2</sub>-utslipp fra annen industri [159]. En studie viser at det er behov for ytterligere eksperimentell forskning på karbonbindingseffekten, spesielt knyttet til potensielle sekundære reaksjoner, men også ulike andre utfordringer [161].

### 2.5.3 Havgjødsling som en metode for karbonlagring

Havgjødsling stammer fra en teori utviklet av John Martin. Hypotesen går ut på at variasjonen i CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i Sørishavet henger sammen med produktiviteten til planteplankton, og er relatert til bruk av næringsstoffer [164]. Planteplankton har klorofyll som fanger opp sollys, og bruker fotosyntesen til å omgjøre CO<sub>2</sub> til oksygen. CO<sub>2</sub>-opptaket er begrenset av viktige makronæringsstoffer, som fosfor og nitrogen, som planteplankton benytter seg av for å gjennomføre fotosyntesen. Det er diskutert om tilførselen av disse næringsstoffene i havet kan føre til økt effektivitet til planktonet, og dermed øke binding av atmosfærisk CO<sub>2</sub>. Makronæringsstoffene blir utnyttet effektivt i de fleste havområdene. Likevel er det 20 % av havoverflaten som ikke klarer å bruke opp næringsstoffene, og lav biomasse- og klorofyllkonsentrasjonen blir observert [165]. Disse områdene er vist i Figur 14, og omfatter deler av Sørishavet, det ekvatoriale Stillehavet, samt det nordlige Stillehavet. Felles for disse havene er lav konsentrasjon av jern, som er et mikronæringsstoff. Teorien til John Martin viser en sammenheng mellom jerntilgang og effektiv utnyttelse av makronæringsstoffer. For å katalysere reaksjonen bruker flere planktonarter nitrogenase, som er et enzym avhengig av mikronæringsstoffer, som jern [166]. Det viser seg at hypotesen om at planteplankton er begrenset av tilgjengeligheten på nitrogen stemmer, men utnyttelsen av tilgjengelig nitrogen er i tillegg begrenset av jern.



Figur 14: Konsentrasjon av klorofyll a i verdens hav i 2023 [167].

I teorien vil tilførsel av jern til disse jernfattige havområdene øke veksten av planteplankton, som vil binde en del av de menneskeskapt karbonutslippene. I praksis medfører dette en del ulemper og usikkerheter. Selv om havgjødning er en metode som raskt kan føre til lagring av karbonutslipp, er det ikke nok bevis på at fangsten holder seg lenge. I studien The Southern Ocean Iron RElease Experiment (SOIREE) er det funnet at i løpet av 13 dager med tilsetning av jern til et område på 50 km<sup>2</sup>, ble produktiviteten ti ganger så høy. Aktiviteten var fortsatt merkbar etter 40 dager etter at forskerne forlot studiestedet [168]. Men selv om aktiviteten øker, og atmosfærisk karbon synker i området, er det flere studier som antyder at karbonet ikke blir bundet, da det etter hvert kommer ut i atmosfæren igjen via blant annet dekomponering. En studie, The Southern Ocean Iron Experiment (SOFEX), kartlegger hvor mye karbon som kan tas opp ved hjelp av havgjødning. Resultatet viser at bundet karbon utgjør bare 10-25 % av eksportert karbon ved hjelp av havgjødning. Dette tilsvarer 0,1-0,25 Gt karbon hvert år [165, 169]. En studie fra 2008 estimerer at ved å gjødsle et havområde på 10<sup>8</sup> km<sup>2</sup>, vil ca. 3 % av årlig CO<sub>2</sub>-utslipp bli bundet [169]. Mange av disse modellene opererer på en 100 års tidsramme, og ekskluderer CO<sub>2</sub>-utslipp knyttet til utvinning av jern og andre prosesser koblet med havgjødning [170].

Utfordringer knyttet til havgjødning går primært ut på lite forskning i stor skala, og ukjente langtidsbieffekter på økosystemer i havet knyttet til dette. Det er blitt utført 13 små prosjekter i tidsrommet 1993-2009, men grunnet flere usikkerheter er det ikke utført noen eksperimenter i større skala [171][160]. Forstyrning av naturlige sykluser og økosystemer i havet kan skyldes blant annet algeoppblomstring av giftige arter, som fører til eutrofiering [12]. Disse artene vil produsere toksiner



som kan blant annet redusere oksygenivået i havet, og i verste fall drepe fisken og føre til «døde soner». Dette kan føre til reduksjon i biologisk mangfold, og deretter økonomiske utfordringer for fiskere. Anoksi i havet, som tilsvarer fullstendig mangel på oksygen, vil forandre økosystemer, og skyve dem mot organismer som produserer metan og nitrogenoksid, som kan være mer potente enn CO<sub>2</sub> [172].

Andre utfordringer med havgjødsling omfatter forandringer i pH og havforsuring grunnet høyere konsentrasjoner av CO<sub>2</sub>. Det er også satt fokus på at ethvert forsøk på å tilsette næringsstoffer til havet, vil resultere i en forstyrret balanse i næringsfordeling på global skala. En artikkel fra 2008 avkrefter denne teorien, og opplyser at jern raskt fjernes fra havoverflaten grunnet høy reaktivitet, og dermed ikke vil føre til noen skade [172]. Det er imidlertid en ulempe som fører til at store mengder jern må tilføres havet kontinuerlig for å holde konsentrasjonen oppe for algevekst. På grunn av utvinning og distribusjon av jern, er havgjødsling en energikrevende løsning for karbonfangst [165].

Kostnadene av havgjødsling med jern varierer med flere forskjellige faktorer. Tidsramme, størrelsen på tiltenkt havområdet, jernpriser og metode er for å nevne noen. Det er vanskelig å estimere kostnadene på slike prosjekter, grunnet at metoden blant annet ikke er allment praktisert. Prisen kan variere mellom hundre til flere tusen dollar per kubikkmeter sekvestrert karbon. Studier peker mot estimater mellom 5-457 US\$ per tonn CO<sub>2</sub> [173-175]. Disse sprikene i estimatene viser hvor utfordrende det er å lage et realistisk kostnadsbilde.

Havgjødsling er et omstridt tema da mange anser det som forurensning [172]. Om havgjødsling er lovlig er fortsatt uklart, og avhenger av faktorer som lokasjon og metode. Det er inngått flere internasjonale avtaler, deriblant London-protokollen [173]. Samtidig er det flere organisasjoner som arbeider for å unngå skade av det marine miljøet. Slike avtaler innhenter godkjenninger og tillatelser før et prosjekt blir satt i gang. London-protokollen forbyr havforurensning og avfallsdumping. Den tillater imidlertid eksperimenter som omhandler havgjødsling, under strenge krav og godkjenninger [55].

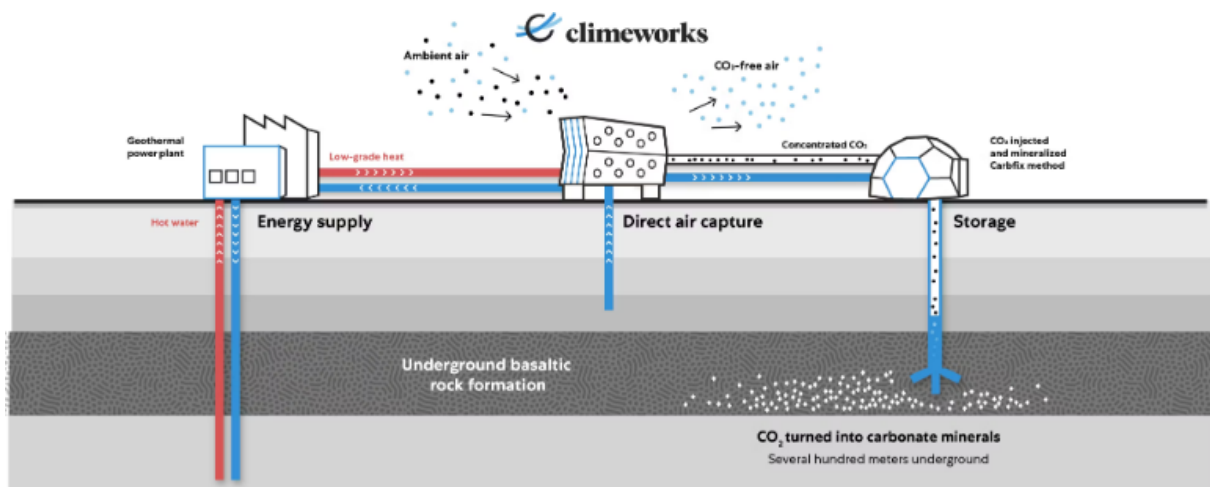
#### 2.5.4 CO<sub>2</sub>-mineralisering

Karbonmineralisering er en annen metode basert på samme prinsipp som forvitring. Denne sekvestrerer også CO<sub>2</sub> som er oppløst i vann, i bergarter og andre mineraler. Karbonopptak ved mineralisering i faste materialer er derimot mer krevende teknologisk. Da metoden fanger karbon fra avgass i energiproduksjon eller fra luften ved hjelp av DACCS-teknologi, for å videre binde dette ved mineralisering. Det skilles mellom *in situ* og *ex situ* CO<sub>2</sub>-mineralisering [176].

Ved *in situ*, injiseres CO<sub>2</sub> inn under bakken, eksempelvis i basaltiske bergarter. Der bindes det permanent i karbonatmineraler [176]. Til forskjell fra CCS, der CO<sub>2</sub> immobiliseres i slike mineraler i geologiske reservoarer, er sekvestringshastigheten ved *in situ* mineralisering mindre. Dette skyldes mangelen på mineraler med høyt innhold av metallene kalsium, magnesium og jern i disse reservoarene. Dette fordi disse metallene er avgjørende for karbonsekvestring og dannelsen av karbonatmineraler. I basalt derimot, er innholdet av disse metallene rundt 25 %, noe som gjør basalt reaktivt i kontakt med atmosfærisk CO<sub>2</sub> som er oppløst i vann [177].

Den alternative *ex situ* metoden går ut på å mineralisere CO<sub>2</sub> ved industrielle prosesser over bakken. Metoden bruker metallrike mineraler utvunnet fra gruvedrift eller resirkulert fra ulike industrier. Til forskjell fra metoden der økt forvitring binder CO<sub>2</sub> naturlig fra regnvann, sekvestreres CO<sub>2</sub> her til faste karbonatmineraler industrielt. Disse kunstige mineralene kan benyttes videre i andre industrier. *Ex situ* prosesser skaper dermed en sirkulær økonomi som bidrar til kommersiell bruk av CO<sub>2</sub>-baserte produkter [176].

Som nevnt i Kapittel 2.4.2.3 består Island av 90 % basalt, og er dermed gunstig for lagring av CO<sub>2</sub> i bakken. Selskapene Carbfix og Climeworks samarbeider på Orca-anlegget på Island. Der kombinerer de DACCS-teknologi og mineralisering av CO<sub>2</sub>. Metoden er derimot kostbar, men forventes å bli billigere med årene [141]. EU støtter og bistår finansielt til denne industrien på Island. I korte trekk fungerer anlegget ved at fornybar geotermisk energi driver DACCS-teknologien til Climeworks, som fanger CO<sub>2</sub> fra omgivende luft. Videre injiserer og lagrer Carbfix klimagassen som karbonatmineraler i den basaltiske berggrunnen. Dette er et eksempel på *in situ* CO<sub>2</sub>-mineralisering. En illustrasjon av karbonlagringen er vist i Figur 15 [178].



Figur 15: Lagring av CO<sub>2</sub> ved DACCS-teknologi og mineralisering under bakken [178].

Med dagens produksjon og lagringskapasitet kan disse metodene sekvestrere 1,5 Gt CO<sub>2</sub> globalt per år. I fremtiden kan det potensielt øke til over 3 Gt CO<sub>2</sub>. Disse estimatene er derimot også avhengig av mineraliserings hastigheten. Det følger begrensninger med denne teknologien i forbindelse med reaksjonshastighet, tilgjengelighet og lokasjon. De fleste slike reaktive bergarter som basalt, finnes for det meste bare på havbunnen eller i områder med vulkansk aktivitet [179]. Som nevnt i Kapittel 2.5.2 er olivin en annen forbindelse som kan mineralisere karbon. Dette mineralet finnes naturlig i Norge, som gjør det aktuelt for mineralogisk binding av CO<sub>2</sub> i norsk industri [162]. Ved *ex situ* mineralisering, er optimal partikkelstørrelse på mineralene estimert til å være 100 µm. Knusing av disse er dermed energi- og kostnadsintensive [179].

En studie fra 2019 estimerer kostnad ved å lagre CO<sub>2</sub> ved karbonmineralisering til å variere mellom 20-100 US\$ per tonn CO<sub>2</sub>. I tillegg kommer kostnader for fangst av CO<sub>2</sub>, som varierer basert på metoden som benyttes. Mineralisering av karbon under bakken er billigst, da det ikke innebærer kostnader til gruvedrift, knusing og spalting av bergarter og mineraler. CO<sub>2</sub>-fangst fra energiproduksjon, eksempelvis ved CCS eller BECCS, er også rimeligere enn å bruke DACCS-teknologi. Det forventes at karbonmineralisering vil bli benyttet i større grad i fremtiden, da metoden binder CO<sub>2</sub> permanent, og fordi dette er en ny teknologi der kostnadene etter hvert forventes å reduseres [179].

### 2.5.5 Indirect Ocean Capture

Indirect Ocean Capture (IOC) er en metode hvor CO<sub>2</sub> blir fanget rett fra sjøvann. Dette oppnås ved membranelektrodialyse av sjøvann og blir sett på som en hybrid mellom DACCS og havalkalisering [180].

I membranelektrodialyse av sjøvann, produseres det syre og base. I sjøvann er CO<sub>2</sub> løst opp som uorganisk karbon (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> og CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), og syren som produseres blir brukt for å gjøre sjøvannet surt, slik at oppløst karbon blir omgjort til CO<sub>2</sub>. Deretter blir CO<sub>2</sub> fjernet og basen som ble produsert blir tilført løsningen slik at naturlig pH og alkalitet blir gjenopprettet. Til slutt blir vannet sluppet ut igjen slik at vannet kan fortsette å ta opp CO<sub>2</sub> [181].

Utfordringene med IOC er at teknologien er lite utviklet, noe som synliggjøres av at teknologien er på TRL 2 og er kostbar. Foreløpig er kostnaden for IOC estimert til 1349 US\$ per tonn CO<sub>2</sub> som fanges. Kostnader for transport og lagring vil øke kostnadene ytterligere [182].

### 2.5.6 Karbonlagring i ørken

Karbonkretsløpet har hatt noen hull, som forskere arbeider med å finne ut av. Total mengde karbon målt, er ikke total mengde teoretisk karbon i verden. Lagret karbon, blant annet i hav og jord, forklarer differansen, men det er likevel en del karbon som er savnet. Ekspertene har foreslått at ørkener er en del av kretsløpet [183]. Forskning rundt dette fenomenet baserer seg på å måle hvor mye CO<sub>2</sub> som blir lagret, og hvordan. Foreløpig er det ikke utviklet metoder for å lagre CO<sub>2</sub> som en strategi for karbonkompensasjon.

### 2.5.7 Karbonlagring ved hjelp av nanoteknologi

Nanoteknologi er et fagområde hvor materialer blir manipulert, konstruert og anvendt på nanoskala. Nanomaterialer kan være nanokompositter, nanoporøse, nanokrystallinske og andre hule materialer av nanostruktur. Flere typer nanomembraner er under utvikling, som viser å ha høy sorpsjonsevne. Nanoteknologien vil øke effektiviteten og sorpsjonsevnen til ulike stoffer som blir brukt til å separere CO<sub>2</sub> fra luften, som for eksempel zeolitter [56]. I tillegg er det forsket på hvordan nanoteknologi kan omgjøre CO<sub>2</sub> fra luften til nyttige produkter. Nano-stoffer kan også bli brukt i bygninger, drivstoff, batterier, biler og fly for å øke effektiviteten, og på den måten redusere utslipp [184]. utfordringen med dette er den økonomiske delen av prosjekter [185].

## 2.6 Oversiktsbilde

Tabell 1 viser en oversikt over de viktigste faktorene ved de ulike løsningene. Hensikten med tabellen er å samle informasjonen på en sammenlignbar måte for å fremheve styrker og svakheter ved de ulike alternativene.

Tabell 1: Kort oppsummering av de ulike karbonkompensasjonsløsningene.

	Havgjødsling	Blue Carbon	Dyphavslagring	Skogbruk	Biokull	Karbonlandbruk	CCS	DACCS	Mineralisering	BECCS
Kostnad (US\$/tonn CO2) *karbonkreditter	5-457	6.50-50*	6.2-31.1	4-14	60-120	10-100	43-144	600-1000	298-528	15-400
Potensial	0.1-0.25 Gt C/år	5 Gt CO2/år	2000-12000 Gt C totalt	0.5-3.6 Gt CO2/år globalt i 2050	0.7-1.3 Gt CO2/år	2-5 Gt CO2/år globalt i 2050	Totalt 70 Gt CO2 i Norge	0.1 Mt CO2/år	1.5-3 Gt CO2/år globalt	2 Mt CO2/ år
Politikk	Ulovlig med praksis Godkjente forskningsprosjekter	Oppfordret	Ulovlig Regulerte forskningsprosjekter	Oppfordret	Blir fremmet	Initiativer iverksettes	Prosjekter gjennom myndighetene er i gang	Støtte fra ulike prosjekter i utlandet	Prosjekt på Island støttet og finansert av EU	Oppfordret
Utfordringer	Økosystemdestruksjon Forandringer i pH Ukjente bieffekter Få eksperimenter	Kapasitetsberegning Overvåking Sertifisering Reversibilitet	Forsuring Økosystemdestruksjon Havdumping Ukjent risiko	Usikkerhet rundt addisjonalitet Reversibilitet Lekkasjerisiko Overvåking Dobbelttelling	Energikrevende Ukjent risiko Tilgang på biomasse Mangelfull kunnskap om konsekvenser	Begrenset kapasitet Reversibilitet Overvåking Sertifisering	Kostbart	Kostbart Energikrevende	Kostbart Energikrevende Lokasjonsavhengig Må kombineres med teknologi for karbonfangst	Tilgang på biomasse Forbruk av vann og areal Tap av karbonlager ved biomasse som ikke er bærekraftig
Positive bieffekter	Ingen	Kystvannskvalitet Fiskebestander Husly, matkilde til havdyr Kystvern	Ingen	Vern av biologisk mangfold Jordkvalitet Økt matproduksjon Reduksjon i risiko for flom og erosjon	Jordhelse Reduksjon i bruk av gjødsel Redusert metangass utslipp Gjenbrukbare biprodukter	Jordkvalitet Inntektskilde for bønder	Generere mer energi	Kan plasseres fritt Renere luft Produserer vann (S DAC)	Ex situ mineralisering produserer kommersielle CO2 baserte produkter	Gir bioavfall et bruksområde
Tilgjengelighet i Norge	Ikke tilgjengelig Avhenger av mer forskning	Tilgjengelige prosjekter i andre deler av verden. Testprosjekter forventet i Norge neste år	Ikke tilgjengelig	Karbonsertifikat mulig å kjøpe	Karbonsertifikat mulig å kjøpe	Karbonsertifikat mulig å kjøpe i form av biokull	Tilgjengelig, tatt i bruk på flere plattformer	Ikke tilgjengelig, prosjekt under utvikling	Ikke tilgjengelig	Ikke tilgjengelig, prosjekter under utvikling
Varighet	Langvarig	Langvarig	Permanent	Langvarig	Langvarig	Medium/ Langvarig	Permanent	Permanent	Permanent	Permanent
Utviklingsstadium (TRL)	1-2	2-3	1-2	8-9	6-7	8-9	5-9 avhenger av metode	6-7	Ex-situ/forvitring 3-4	5-6
Grønnvasking risiko	Veldig høy	Høy	Høy	Høy	Middels	Høy	Lav	Lav	Lav	Lav-middels
Fremtidsperspektiv	Forventet mer forskning Lite håp for fremtiden	Forventet en større rolle allerede neste år	Forventet mer forskning	Forventer en mindre rolle når teknologiske løsninger blir billigere og mer tilgjengelig	Forventer noe større rolle mot 2050	Forventer noe større rolle mot 2050	Forventet en stor rolle mot 2050	Forventet en stor rolle mot 2050	Forventer en stor rolle mot 2050	Forventet en stor rolle mot 2050

## 2.7 Karbonkompensasjonsstrategien til andre bedrifter

Markedet er ofte styrt av etterspørselen. Derfor er det viktig å få et overblikk av hvordan markedet ser ut nå, og hvordan det vil se ut i fremtiden. En analyse av andre selskapers strategi kan gi en pekepinn på hva bedrifter bør satse på i fremtiden med tanke på lønnsomhet og tilgjengelighet. I dette kapitlet vil seks olje- og gasselskap på norsk sokkel bli presentert med deres karbonkompensasjonsstrategi.

### 2.7.1 Wintershall DEA

Wintershall DEA er et tysk selskap som ble grunnlagt i 1894. Selskapet har over 2 000 ansatte og prosjekter i 11 forskjellige land [186, 187]. I Norge har Wintershall vært opp mot 50 år, og har omtrent 100 lisenser og opererer på 3 produksjonsfelt kalt Vega, Maria og Nova. Selskapet produserer 160 000 foepd [188].

Selskapet setter søkelys på å redusere klimagassutslipp ved hjelp av ulike løsninger, som elektrifisering. Uunngåelige utslipp blir behandlet av en karbonkompensasjonsstrategi som baserer seg først og fremst på CCS, men også naturbaserte løsninger som skogplanting og bevaringsprosjekter. Bevaring av regnskoger i Latin Amerika er en av mange prosjekter til Wintershall. I tillegg har de en satsing på gjenplantingsprosjekter, slik at flere skoger bidrar til å sekvestrere CO<sub>2</sub>-utslipp, samt lage nye habitater for det biologiske mangfoldet [187].

Wintershall er den største aktøren på norsk sokkel innen CCS. Selskapet har to lisenser for lagring i Nordsjøen, Havstjerne-lisensen og Luna-lisensen. Havstjerne har en lagringskapasitet på syv millioner tonn årlig, og målet er å injisere CO<sub>2</sub> før 2030 [189]. Denne satsingen gjenspeiler en stor ambisjon for selskapets arbeid for å nå målene om nullutslipp innen århundret er over. Utenfor Norge har bedriften et prosjekt som blir kalt Greensand. Dette skal være Europas største grensekryssende verdikjede for CCS [190]. Prosjektet er startet i Danmark og har som mål å lagre opptil åtte millioner tonn CO<sub>2</sub> hvert år fra 2030. Formålet med Greensand er å frakte CO<sub>2</sub>-utslipp over landegrenser og lagret i havbunnen i et annet land. I 2023 blir 15 000 tonn CO<sub>2</sub>-utslipp fra Belgia fraktet til det tomme Nini West feltet i Nordsjøen for å demonstrere prosjektet. Wintershall skal også, i samarbeid med Equinor, legge en 900 km lang CO<sub>2</sub>-rørledning fra Tyskland til Norge, og dermed danne en ny CCS-verdikjede [189].

### 2.7.2 Norske Shell

Norske Shell ble etablert i Norge i 1912 under navnet Norsk-Engelsk Mineralolie Aktieselskab (NEMAK), og har siden da vært en av aktørene på norsk sokkel. I dag er Shell operatør på Ormen Lange og medeier i Troll [\[191\]](#). I 2021 produserte Norske Shell 96 000 foepd [\[192\]](#).

Norske Shell har mål om å redusere utslippene med 50 % innen 2030, fra referanseåret 2016. Innen 2050 har Shell ambisjoner om å bli karbonnøytrale. Dette skal de oppnå gjennom elektrifisering, redusere karbonintensiteten, øke lav-karbon produkter, CCS og naturbaserte løsninger som skogplanting [\[193\]](#).

I sin strategi for karbonkompensasjon har Norske Shell fokusert på skogplanting, CCS og elektrifisering. Mellom 2019 og 2020 brukte Shell ressurser på skogplanting i Canada, Spania, Storbritannia, Nederland, Tyskland og Australia [\[194\]](#). I 2020 investerte Shell, sammen med Equinor og TotalEnergies, i Northern Lights-prosjektet [\[195\]](#). Andre tiltak Shell har gjort er å elektrifisere Ormen Lange. I 2021 fikk Shell tillatelse av NVE til å installere to 120 km lange sjøkabler på 45 kV ut til feltet [\[196\]](#).

### 2.7.3 Repsol Norge

Repsol Norge har operert på norsk sokkel siden 2003 og produserer i dag 30 000 foepd. Repsol Norge er operatør på feltene Blane, Yme og Rev, men har også eiendeler i flere andre felter. Repsol var også operatør på Gyda, men der opphørte produksjonen i 2020 og innretningen ble fjernet i 2022 [\[197\]](#).

Repsol Norge har mål om å oppnå karbonnøytralitet innen 2050. Ifølge Repsol's bærekraftsrapport for 2023 vil teknologi og digitalisering spille en stor rolle for å bli karbonnøytral innen 2050. For å redusere utslippene fokuserer de på energieffektivisering, elektrifisering, fornybare drivstoff og CCUS [\[198\]](#).

På Yme plattformen skal Repsol i 2023 redusere klimagassutslipp, gjennom å se på hvordan utslipp reduseres på de andre plattformene Repsol har eiendeler i. Repsol skal også forbedre rutineene rundt fakling og undersøke effekten til turbinene, for å se om det er mulig å redusere fra to til én turbiner [\[198\]](#).

Ifølge Repsol Norges bærekraftsplan for 2022, forventer de at naturbaserte løsninger vil bli en del av deres karbonkompensasjonsstrategi, med mindre det skjer en større utvikling innen teknologibaserte løsninger. I 2022 ble det også gjort en studie for å se om reservoaret på Gyda-feltet egner seg for CCS-injeksjoner, men det resulterte i at prosjektet ble utsatt [\[199\]](#).

Utenom natur- og teknologibaserte karbonløsninger har Repsol stort fokus på forskning og utvikling. Repsol Technology Lab i Spania forsker på ulike muligheter som Repsol kan benytte for å redusere utslippene. I tillegg har de etablert et fond der investeringer går til forskning og utvikling av karbonreducerende teknologier. De deltar også i olje- og gassektorens Oil and Gas Climate Initiative (OGCI), hvor over 1 milliard US\$ vil gå til nyoppstartede selskaper med mål om å bekjempe klimaendringer [198].

#### 2.7.4 Neptune Energy Norge

Neptune Energy ble opprettet i 2015 av Sam Laidlaw og produserer 135 000 foepd på land og hav i Nordsjøen, Nord-Afrika og Stillehavet i Asia. Selskapet har i overkant av 300 ansatte i Norge og er operatør på Gjøa-feltet i Nordsjøen. I tillegg er de partner i felt som Snøhvit, Njord og Gudrun. På norsk sokkel har Neptune Energy 81 lisenser [200].

Selskapet har fokus på CCS for å redusere karbonutslipp, i tillegg til å redusere utslipp via elektrifisering. De er i startgropen når det gjelder karbonlagring. I 2022 ble det sendt ut søknader om CCS-lisenser i Storbritannias del av Nordsjøen, samt signert en avtale med Horisont Energi for et CCS-prosjekt i Norge [201]. Et CCS-prosjekt i Nederland er under utvikling, med en total kapasitet på 120-150 millioner tonn lagret CO<sub>2</sub> [202]. Målet med dette prosjektet er å injisere mellom 4-9 millioner tonn CO<sub>2</sub> hvert år i tomme oljefelt [203].

#### 2.7.5 TotalEnergies EP Norge

TotalEnergies EP Norge (TEPN) er et datterselskap av det franske energiselskapet TotalEnergies SE (TSE). Selskapet har deltatt i leting og produksjon av olje og gass utenfor norskekysten siden 1965. TEPN har i dag rundt 100 ansatte og over 60 lisenser på norsk sokkel. I 2022 hadde selskapet en produksjon på over 215 000 foepd [204].

TEPN arbeider med å redusere klimagassutslipp fra sin aktivitet på norsk kontinentalsokkel. Dette inkluderer blant annet elektrifisering av offshore installasjoner. Selskapet deltar også, sammen med Equinor og Shell, i Northern Lights-prosjektet for transport og lagring av CO<sub>2</sub>. Dette CCS-prosjektet tilbyr europeiske bedrifter å redusere klimafotavtrykk, ved å lagre karbon permanent i egnede reservoarer på norsk sokkel [205].



TotalEnergies SE har, sammen med sine datterselskap, mål om å nå netto null i 2050. Dette skal først gjøres ved CCS og annen reduksjon av egne utslipp. Resterende utslipp skal kompenseres. For å redusere klimafotavtrykket til sine øvrige aktiviteter, har TSE ønske om å produsere bærekraftige produkter som hydrogengass, biodrivstoff og e-drivstoff (dannet av H<sub>2</sub> og CO<sub>2</sub>) [206].

Kompensering av resterende utslipp skal blant annet gjøres ved hjelp av naturbaserte løsninger. Selskapet investerer i prosjekter innen skogbruk, karbonlandbruk og restaurering av våtmark. Selskapet har eksempelvis prosjekter som forhindrer avskoging i Peru og skogplanting i Republikken Kongo, tilsvarende henholdsvis 15 og 10 Mt CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. Ifølge TSE sertifiseres disse prosjektene etter standarder som Verra VCS og CCB [206].

### 2.7.6 Sval Energi

Sval Energi er et norsk energiselskap etablert i 2019. Selskapet deltar i leting og produksjon av olje og gass på norsk sokkel, samt produksjon av vindenergi i Finland. Sval har i dag rundt 170 ansatte og over 60 lisenser på norsk sokkel. I 2022 hadde selskapet en produksjon på over 70 000 foepd [207].

Sval Energi arbeider med å redusere klimagassutslipp fra sin aktivitet på norsk kontinentalsokkel. Dette inkluderer blant annet elektrifisering av offshore installasjoner. Andre strategier for dekarbonisering, er å optimalisere energieffektiviteten og produksjonen på sine anlegg. Selskapet har som mål å redusere egne utslipp med 50 % innen 2030. For utslipp de ikke kan unngå, vurderes bruk av kompensasjonsløsninger av høy kvalitet. Dette er derimot ikke iverksatt i dag, ifølge Sval's bærekraftsrapport for 2022 [207].

I 2023 har Sval, sammen med Storegga og Neptune Energy, søkt om CCS-lisensen Trudvang. Dersom søknaden blir innvilget, er målet å starte med CO<sub>2</sub>-injeksjon innen 2030. Trudvang har potensial til å lagre 9 Mt CO<sub>2</sub> per år, og forventer å lagre karbon i 25 år. For å nå netto null, vurderes også teknologiene BECCS og DACCS som aktuelle i fremtiden [207].

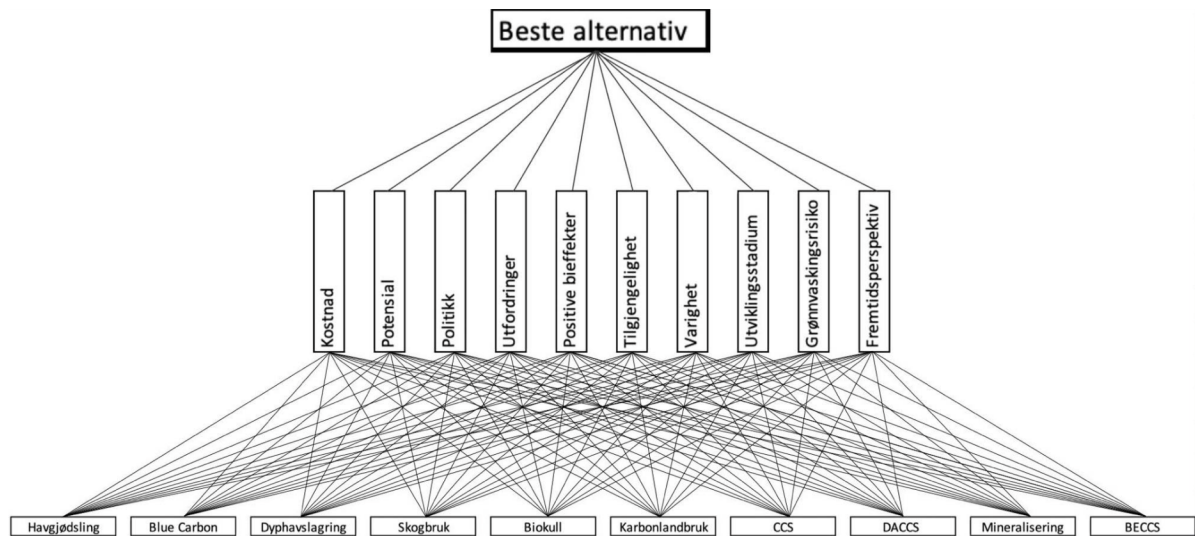
### 3. Metode og resultat

I metode og resultat blir karbonkompensasjonsløsningene fra teorien sammenlignet ved bruk av Analytical Hierarchy Process (AHP) modellen. Resultatet blir presentert i en tabell og i et diagram.

#### 3.1 Metode

AHP-modellen ble tatt fra boken Praktisk prosjektledelse: fra idé til gevinst [208]. Modellen er utviklet av Thomas L. Saaty, og har som formål å analysere komplekse beslutninger. I denne sammenheng ble metoden brukt for å sammenligne de ulike løsningene på karbonlagring presentert tidligere i rapporten, og deretter beregne hvilke av alternativene som bør prioriteres. Den skal være et hjelpemiddel for å løse problemstillingen, og blir brukt i utarbeidelse av anbefaling av karbonkompensasjonsstrategi for OKEA.

Evalueringsmetoden er basert på et hierarki av kriterier, som et antall alternativer skal vurderes opp mot. Her ble kriteriene veid etter vurderingsskala ved hjelp av parvis sammenligning, for å beregne en prioritetsvektor. Deretter ble alternativene vurdert mot kriteriene for å finne prioriteringen. Til slutt beregnes total prioritet av alternativene ved å summere produktet av prioritetsvektoren til kriteriet og prioriteten av alternativet for kriteriet. Det beste alternativet får høyest sum. Figur 16 forestiller et hierarki av mål som de ulike alternativene vurderes opp mot. Her er hierarkiet delt i tre nivåer. Det øverste nivået er målet med metoden. Andre nivå er kriterier for hva som er det beste alternativet. Det siste nivået angir alternative løsninger.



Figur 16: Hierarki for valg av beste alternativ for karbonkompensasjonsstrategi basert på AHP-metoden.

Første steget i metoden var å finne prioriteringsvektorer for de ulike kriteriene. Faktorene alternativene ble vurdert etter er beskrevet i Tabell 2 og hentes fra oversiktstabellen (Tabell 1). Kriteriene skal representere den viktigste informasjonen som ble presentert i teoridelen av denne rapporten.

Tabell 2: Oversikt og forklaring av kriterier de ulike løsningene vurderes mot i AHP-metoden.

Kriterier	Forklaring
Kostnad	Kostnad per tonn lagret CO <sub>2</sub> i dag.
Potensial	Potensialet en løsning har til å lagre CO <sub>2</sub> i dag. Tallene skal representere total årlig global kapasitet.
Politikk	Hvorvidt det er juridiske problemer knyttet til alternativet, eller om det er politisk støtte knyttet til prosjekter.
Utfordringer	Primære utfordringer knyttet til alternativer. Eksempelvis opposisjoner, ødeleggelse av økosystemer, vanskeligheter med gjennomføring, energikrevende etc.
Positive bieffekter	Primære positive bieffekter knyttet til å gjennomføre prosjekter, utenom selve karbonlagringen. Eksempelvis nye habitater for dyr, større biologisk mangfold, renere vann, etc.
Tilgjengelighet i Norge	Tilgjengelighet på markedet i Norge. Hvor enkelt det er å starte opp prosjekter.
Varighet	Hvor lenge CO <sub>2</sub> er lagret.
Grønnvaskingsrisiko	Risiko for grønnvasking ved gjennomføring av prosjekter, eller kjøp av kreditter.
Utviklingsstadium	Utviklingsstadium i henhold til <i>Technology Readiness Level</i> .
Fremtidsperspektiv	Hvor stor andel av markedet alternativet vil forventes å ha i 2050.

Vurderingene ble gjort på en skala fra 1-9, og blir presentert i Tabell 3. Basert på denne skalaen ble både alternativer, og kriterier parvis sammenlignet med hverandre.

Tabell 3: Vurderingsskala for alternativer og kriterier benyttet i AHP.

Vurderingsskala for AHP	
1	Like viktig
2	
3	Noe viktigere
4	
5	Mye viktigere
6	
7	Svært mye viktigere
8	
9	Absolutt dominans

Parvis sammenligning av kriteriene ble utarbeidet i samarbeid med ekstern veileder, basert på de viktigste verdiene til OKEA, og er presentert i Tabell 4. Verdiene som kommer frem i tabellen er basert på skjønn i forhold til vurderingsskala for AHP (Tabell 3). Her skal tabellen leses horisontalt nedover. Eksempelvis skal første raden (kostnad) og andre kolonnen (potensial) leses av som «kriteriet kostnad er 6 ganger viktigere enn kriteriet *potensial*». På samme vis skal tredje raden (politikk) og fjerde kolonnen (utfordringer) leses av som «politikk er mye viktigere enn utfordringer», ifølge vurderingsskalaen for AHP. Matrisen ble deretter normalisert, og prioriteringsvektorer ble beregnet ved å summere de ulike radene, for å deretter dele summene på antall kriterier. Prioriteringsvektorer er gitt i prosent og gjenspeiler hvor viktig kriteriet er, og hvor mye det teller videre i prosessen.

Tabell 4: Parvis sammenligning av kriterier, og beregnet tilhørende prioritetsvektor.

	Kostnad	Potensial	Politikk	Utfordringer	Positive bieffekter	Tilgjengelighet	Varighet	Utviklingsstadium	Grønnvaskingsrisiko	Fremtidsperspektiv	Prioritetsvektor
Kostnad	1	6	2	6	7	2	3	3	3	4	23,8%
Potensial	1/6	1	1/5	1	2	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	2,9%
Politikk	1/2	5	1	5	6	1	2	2	2	3	15,5%
Utfordringer	1/6	1	1/5	1	2	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	2,9%
Positive bieffekter	1/7	1/2	1/6	1/2	1	1/6	1/5	1/5	1/5	1/4	2,1%
Tilgjengelighet	1/2	5	1	5	6	1	2	2	2	3	15,5%
Varighet	1/3	4	1/2	4	5	1/2	1	1	1	2	9,6%
Utviklingsstadium	1/3	4	1/2	4	5	1/2	2	1	1	2	10,4%
Grønnvaskingsrisiko	1/3	4	1/2	4	5	1/2	2	2	1	2	11,2%
Fremtidsperspektiv	1/4	3	1/3	3	4	1/3	1/2	1/2	1/2	1	6,8%
<b>Sum</b>	<b>3,73</b>	<b>33,50</b>	<b>6,40</b>	<b>33,50</b>	<b>43,00</b>	<b>6,40</b>	<b>13,20</b>	<b>12,20</b>	<b>11,20</b>	<b>17,92</b>	<b>≈ 100%</b>

Neste steg i metoden var å sammenligne de ulike løsningene med hverandre for hvert kriterium. Målet med dette er å finne prioriteten til alternativene for de ulike kriteriene. Parvis sammenligning av alternativene i forhold til kriteriene er vurdert basert på skjønn og gitte opplysninger i Kapittel 2. I Tabell 55 er det fremvist en vurdering av alternativene basert på kriteriet *kostnad*. For ytterligere beregninger av andre kriterier, se Vedlegg A.

Tabell 5 skal leses av horisontalt nedover. Denne tabellen forteller hvor gode alternativene er i forhold til hverandre når det gjelder kostnad. Eksempelvis er blue carbon «mye viktigere» enn havgjødsling. Dette tolkes som at blue carbon har mye lavere kostnader enn havgjødsling, og bør derfor prioriteres 5 ganger mer (rad 2, kolonne 1). Samme type prosess ble gjennomført for alle kriterier og finnes i Vedlegg A. Deretter ble alle matrisene normalisert, og prioriteten ble funnet ved å dele summen av de ulike radene på antall alternativer.

Tabell 5: Parvis sammenligning av alternative løsninger basert på kostnadskriteriet i AHP-metoden.

Potensial	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavs-lagring	Skogbruk	Biokull	Karbonlandbruk	CCS	DACCS	Mineralisering	BECCS	Prioritet
Hav-gjødsling	1	1/5	1	1/3	1/2	1/4	1/9	1/8	1/3	1/5	4%
Blue carbon	5	1	5	3	4	2	1/5	1/4	3	1	15%
Dyphavslagring	1	1/5	1	1/3	1/2	1/4	1/9	1/8	1/3	1/5	22%
Skogbruk	3	1/3	3	1	2	1/2	1/7	1/6	1	1/3	22%
Biokull	2	1/4	2	1/2	1	1/3	1/8	1/7	1/2	1/4	7%
Karbonlandbruk	4	1/2	4	2	3	1	1/6	1/5	2	1/2	15%
CCS	9	5	9	7	8	6	1	2	7	5	7%
DACCS	8	4	8	6	7	5	1/2	1	6	4	2%
Mineralisering	3	1/3	3	1	2	1/2	1/7	1/6	1	1/3	2%
BECCS	5	1	5	3	4	2	1/5	1/4	3	1	4%

Beregning av total prioritet for alternativene ble gjort ved hjelp av Excel. Tabell 6 viser et beregningseksempel av havgjødsling. Her ble prioritetene av havgjødsling ved de ulike kriteriene multiplisert med tilhørende prioritetsvektor for kriteriet. Verdiene ble deretter summert. Samme type beregninger ble gjort for samtlige løsninger i Vedlegg A.

Tabell 6: Beregning av total prioritet for alternativet A i AHP-metoden.

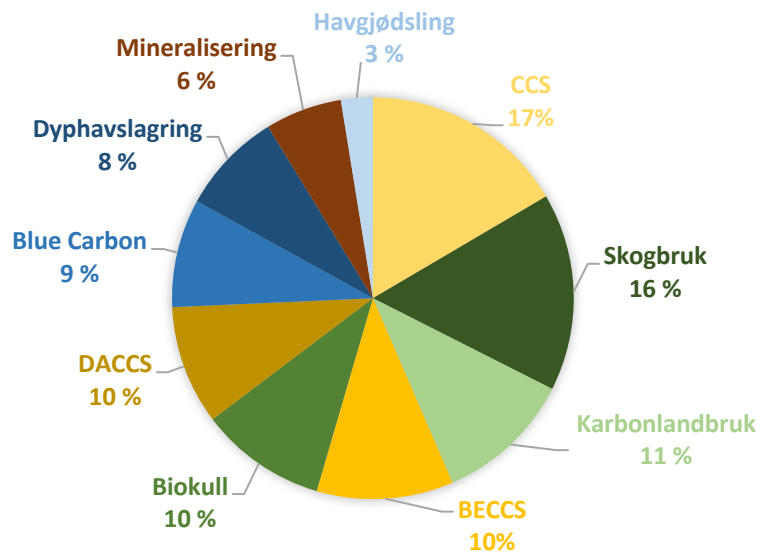
Alternativ	Beregning	Prioritet	Prioritet i prosent
Havgjødsling	$(0.038 \cdot 0.238) + (0.021 \cdot 0.029) + (0.022 \cdot 0.155) + (0.017 \cdot 0.029)$ $+ (0.024 \cdot 0.021) + (0.022 \cdot 0.155) + (0.035 \cdot 0.096)$ $+ (0.018 \cdot 0.104) + (0.016 \cdot 0.112) + (0.017 \cdot 0.068)$	0.0257	2.6 %

### 3.2 Resultat

Resultatet av AHP blir presentert i Tabell 7, hvor de ulike alternativene er prioritert med tilhørende prosenter. Figur 17 viser utfallet i form av et diagram. Prioritert rekkefølge av de tre beste alternativene for karbonkompensasjonsstrategi er CCS på første plass, skogbruk på andre plass og karbonlandbruk på tredje plass.

Tabell 7: Prioritert rekkefølge av alternative karbonkompensasjonsløsninger basert på AHP.

#	Alternativer	Prioritet	Prioritet i %
1	CCS	0,1706	17,1%
2	Skogbruk	0,1602	16,0%
3	Karbonlandbruk	0,1115	11,2%
4	Biokull	0,1037	10,4%
5	DACCS	0,1007	10,1%
6	BECCS	0,0972	9,7%
7	Blue Carbon	0,088	8,8%
8	Dyphavslagring	0,0831	8,3%
9	Mineralisering	0,0646	6,5%
10	Havgjødsling	0,0258	2,6%



Figur 17: Alternative karbonkompensasjonsløsninger, og tilhørende prioritetsprosent basert på AHP.

## 4. Diskusjon

Rapporten, som tar for seg ulike karbonkompensasjonsløsninger i olje- og gasssektoren, presenterer de fremste mekanismene som kan være relevante for OKEA ASA. Aktuelle løsninger blir fremvist i en oversiktstabell, Tabell 1. Disse er, ved hjelp av AHP-metoden, rangert etter beste alternativ basert på en rekke kriterier, vist i Tabell 7. Grunnet flere årsaker er det avvik fra AHP-resultatet og vår anbefaling. Innledningsvis blir disse drøftet i dette kapittelet. Vår anbefalte karbonkompensasjonsstrategi blir presentert til slutt.

### 4.1 Vurdering av karbonmarkedet

I lys av ulike klimaprotokoller, internasjonale og nasjonale krav er det stadig flere bedrifter som setter seg mål om å bli klimanøytrale. Som følge av dette har interessen for karbonkreditter fra det frivillige markedet økt raskt [9]. Økt søkelys på klimanøytralitet og karbonkreditter er i utgangspunktet positivt, men fører med seg risiko for grønnvasking. For at selskaper skal kunne rapportere om klimanøytralitet, er det viktig at karbonkredittene som benyttes er av god kvalitet. Dette oppnås når en karbonkreditt fører til addisjonalitet, langvarig lagring og eksklusivitet [9]. Ved å benytte karbonkreditter som er verifisert av ledende standarder, som Gold Standard og Verra, øker sannsynligheten for at kreditten er av god kvalitet. Selv om det brukes kreditter gjennom standardene, vil det fortsatt være en viss fare for grønnvasking. Dette skyldes at det for noen offset-metoder er vanskelig å nøyaktig måle mengden CO<sub>2</sub> som tas opp, hvor lang lagringstiden er og faren for lekkasjer.

I dag er det knyttet stor usikkerhet rundt det frivillige markedet. Dette skyldes at etter oppstart av fjerde fase av EU ETS, kan ikke karbonkreditter fra det frivillige markedet lenger benyttes for å kompensere for utslipp i det regulerte markedet [10]. Utfasingen av karbonkreditter skyldes at målene til EU ETS ikke oppnås ved kompensering av utslipp, men gjennom interne utslippsreduksjoner. Sammen med at karbonkreditter ikke lenger kan benyttes, er årlig reduksjon av kvoter et tiltak EU ETS benytter. I fase fire blir tilgjengelige kvoter redusert med 2,2 % hvert år [10]. Dette vil føre til at kvotekostnaden fremover vil øke, i takt med at færre kvoter er tilgjengelig. Dette tiltaket vil tvinge industrien til å redusere utslipp, ettersom kostnadene av kvoter og kvoteavgifter vil bli. Et problem som kan oppstå med økte kvotepriser er at bedrifter, som ikke klarer å redusere utslippene, kan få økonomiske problemer. For å hindre dette er det viktig at industrien tidlig innfører metoder for å redusere utslipp. CCS er en metode som enkelt kan benyttes i eksisterende infrastruktur og er lovende



for mange industrier [51]. Som nevnt produseres rundt 80 % av verdens energi med fossilt brensel, og ved å benytte seg av CCS, vil kostnader knyttet til kvoter reduseres [125].

Karbonkreditter kan som nevnt ikke benyttes i EUs kvotesystem [10]. Dersom det hadde vært tillat å benytte billige karbonkreditter i det regulerte markedet, ville det vært mer lønnsomt for industrien å betale for karbonkreditter istedenfor å betale for dyre kvoteavgifter. Da ville det også bli mindre aktuelt for industrien å investere i dyre karbonfangstteknologier, som de nå på mange måter blir tvunget til. Da karbonkreditter kun går på frivillighet, kan det også føre til at mange selskaper velger vekk karbonkreditter, da dette blir en ekstra kostnad. Dette kan føre til at bedrifter oppnår klimanøytralitet senere enn de ellers ville gjort dersom karbonkreditter var tillat i det regulerte markedet. Av den grunn er det mulig at det en gang i fremtiden vil åpnes for karbonkreditter igjen i det regulerte markedet. Dette støttes opp i rapporten fra PwC, som påpeker at skillet mellom det regulerte og det frivillige markedet i fremtiden kan bli mer utydelig [9].

## 4.2 Sammenligning av alternativer på bakgrunn av ulike faktorer

Metodene brukt til å offsette utslipp blir sammenlignet på grunnlag av flere kriterier. Utvalgte kriterier skal dekke alle aspekter av alternativene og gi et helhetlig inntrykk av å implementere de i en eventuell strategi. Funnene i Kapittel 2 av rapporten blir nå sammenlignet på bakgrunn av OKEAs beste interesse.

### 4.2.1 Vurdering av alternativer på bakgrunn av kostnad

Det er stor variasjon i kostnad mellom de ulike løsningene vist i Tabell 1 **Feil! Fant ikke referanse kilden..** Det er en tydelig trend at naturbaserte alternativer er foreløpig billigere enn teknologibaserte løsninger. Hybrider mellom natur- og teknologibaserte metoder plasseres derfor mot midten av kostnadskalaen. Prisen varierer fra 4 US\$ for skogkreditter til så mye som 1000 US\$ per tonn CO<sub>2</sub> ved bruk av DACCS-teknologi [71, 152]. Grunnen til dette kan være at naturbaserte løsninger er allment tilgjengelige og krever mindre utstyr enn de teknologiske alternativene. Da naturbaserte løsninger, som blue carbon og skog, vil utnytte fotosyntesen og på den måten være selvforsynt. De teknologibaserte løsningene vil derimot kreve energi ved produksjon, samt transport og lagring av CO<sub>2</sub> [106]. I tillegg vil bruken av blant annet DACCS være kostbart grunnet avhengighet av konstant energiforsyning [139]. Kostnaden tilknyttet vedlikehold er også noe bedrifter må regne med, da det ikke er inkludert i funnet pris. En annen grunn til at de naturbaserte alternativene ofte er billigere, er fordi de er lett tilgjengelig globalt.

fordi de er lett tilgjengelig globalt. Teknologien til CCS er ikke praktisert i like stor grad som eksempelvis skogbruk. Dette kan forandre seg i fremtiden, om teknologiske løsninger blir veletablerte i markedet, og dermed billigere å ta i bruk.

Når det gjelder dyphavslagring og havgjødsling er kostnadene bare teoretiske, da disse metodene ikke har blitt tatt i bruk. Den reelle kostnaden av drift, eller eventuelle kreditter, er dermed ukjent. IPCC estimerte dyphavslagring på den lavere kostnads skalaen, noe som fører til at løsningen kan være lønnsom om teknologien er på plass [51]. Blue carbon-kreditter er lite utviklet, og er derfor ikke på markedet i Norge. I likhet med skogkreditter er det utfordringer med å estimere omfanget av lagret CO<sub>2</sub>, og dermed blir det også problematisk å verdsette arbeidet [35]. Det som er verdt å tenke på når det gjelder priser for karbonkreditter er kvaliteten av dem. Skogbruk er kjent for grønnvasking, noe som kan presse prisene ned, og gjøre det rimeligere for bedrifter å engasjere seg i prosjekter de ikke har oversikt over [69]. I dagens marked er det derimot konkurranse om høykvalitetskreditter, noe som presser både prisene og kvaliteten opp. Dette gjelder også karbonlandbruk. Teknologibaserte løsninger som DACCS og BECCS er også tilgjengelige på karbonkredittmarkedet, men grunnet avhengighet av utvikling og driftskostnader er de dyrere enn andre alternativer [148]. Disse høye kostnadene ser vi også ved andre, mindre utviklede teknologier, som IOC og bruk av nanoteknologi [182]. Kostnadene ved disse teknologiene fører til at de foreløpig ikke er lønnsomme nok til å implementeres i en strategi for karbonkompensasjon.

#### 4.2.2 Vurdering av potensial og varighet ved ulike alternativer

Potensial referer til mengde CO<sub>2</sub> som kan bli lagret ved hjelp av de ulike metodene. I de fleste tilfellene er det bare estimater ved hjelp av ulike metoder og matematiske modeller. Det er mer utfordrende å estimere potensialet ved de naturbaserte løsningene enn de teknologiske alternativene. Grunnen til dette er et omfattende karbonkretsløp i naturen, som gjør det vanskelig å overvåke CO<sub>2</sub>. Det er i tillegg utfordrende å estimere kapasiteten av de ulike løsningene, grunnet lekkasje av karbon ut i atmosfæren, som vist i Figur 1 og Figur 6. Dette er en merkbar feilkilde som fører til feilberegninger av den reelle langtidssekvestreringen. I oversiktstabellen, Tabell 1, er det fremvist ulike enheter av kapasitet mellom de ulike løsningene. Funnene varierer fra globalt til nasjonalt i Norge, og fra kapasitet i dag, i 2050, og total kapasitet. Dette skyldes utfordringene nevnt over.

Potensialet, i likhet med kostnad, bærer preg av store gap. Dyphavslagring har en total kapasitet til å lagre karbon på mellom 2 000-12 000 Gt [51]. Da dyphavslagring i praksis er ulovlig er det ikke mulig å bedømme hvor mye CO<sub>2</sub> som kan lagres årlig uten at det får en negativ effekt på havmiljøet [45]. For

en god utnyttelse av havet er det viktig med grundig forskning og overvåking av dyphavslagring. Potensialet for CCS, BECCS og DACCS er også stort. På norsk sokkel er det kapasitet til å lagre 70 Gt CO<sub>2</sub>, mens det på verdens basis er estimert en lagringskapasitet på mellom 8 000-55 000 Gt CO<sub>2</sub> [120]. CCS, BECCS og DACCS har dermed stort potensial, men er i dag begrenset av teknologiens tilgjengelighet og utbredelse. CCS er tatt i bruk verden over, og kapasiteten til en tom oljebrønn kan deles av flere selskaper [133, 189]. Spesielt DACCS og BECCS er lite utbredt da de i dag tar opp mellom 0,1-2 Mt CO<sub>2</sub> årlig. Teknologiene er fortsatt under utvikling, men er antatt en større rolle mot 2050.

De naturbaserte kildene til karbonfangst har en relativt lik kapasitet. Karbonlandbruk og blue carbon kan lagre opp mot 5 Gt karbon årlig, mens skog har litt mindre kapasitet på 3,6 Gt karbon årlig [30, 62]. Utfordringen når det gjelder kapasitet ved disse alternativene er reversibiliteten knyttet til karbonkretsløpet. Degradering av skoger, både grønne og blå, fører til at lagret CO<sub>2</sub> slippes ut igjen [19]. Det er derimot en kapasitet som kan vokse seg stor ved riktig behandling og utnyttelse av ressursene. Biokull og mineralisering har en estimert kapasitet på opp mot henholdsvis 1,3 Gt og 3 Gt CO<sub>2</sub> årlig, globalt [85, 179]. Biokull er avhengig av biomasse, på samme måte som mineralisering er avhengig av reaktive bergarter [84, 177]. Dette gjør at begge metodene er begrenset.

Når det gjelder varigheten til lagret CO<sub>2</sub>, stiller de fleste omtalte løsninger tilnærmet likt. Alle teknologibaserte løsninger lagrer CO<sub>2</sub> på permanent basis [180]. I tillegg til CCS, DACCS og BECCS vil mineralisering bidra til å lagre karbon permanent [176]. I teorien kan dyphavslagring også lagre CO<sub>2</sub> permanent i havet. Grunnet lite forskning på åpent hav er det risiko for at dette ikke stemmer [48]. Forskning på langsiktige konsekvenser er nødvendig for å få full forståelse for hvordan CO<sub>2</sub> kan lagres på dypet. Løsninger som bruker fotosyntese til å lagre karbon har potensialet til langtidslagring. Langtidslagring refererer til lagring over 100 år. Disse løsningene har derimot en risiko for reversering og må derfor overvåkes kontinuerlig [74]. Biokull sees på som langvarig lagring, da karbon i biokull kan holdes stabilt i flere hundre år. [80]

#### 4.2.3 Vurdering av tilgjengelighet og utviklingsstadium ved ulike alternativer

De minst utviklede alternativene er havløsninger, da de vurderes til 1-3 på TRL skala [106]. På bakgrunn av dette, og tilhørende utfordringer, er ikke dyphavslagring og havgjødsling tilgjengelig i verken Norge eller verden. Blue carbon derimot er i stadig utvikling og er forventet å komme på markedet i Norge. Wathne, nevnt i Kapittel 2.2.1.4, mener at allerede neste år vil det komme flere testprosjekter knyttet til norsk tareskog [23]. Med et stort potensial og mange fordeler, er det ikke utenkelig at blå skog på sikt tar igjen grønn skog på kredittmarkedet.

Karbonmineralisering vurderes til 3-4 på TRL og er dermed noe mer utviklet enn havløsninger [106]. *Ex situ* mineralisering kan produsere kommersielle CO<sub>2</sub>-baserte produkter, og kan bli mulig i Norge, da landet er rikt på det CO<sub>2</sub>-reaktive mineralet olivin [162, 176]. BECCS og DACCS er teknologier som er mer utviklet, men er likevel ikke tilgjengelig i Norge. Både BECCS og DACCS har prosjekter under utvikling, men DACCS er foreløpig for kostbart og energikrevende til å være lønnsomt [139]. Det er derimot tilgjengelig å kjøpe karbonsertifikater [148, 153].

De mest utviklede teknologiene, som vurderes til 8-9 på TRL skala er skogbruk, karbonlandbruk og CCS [106]. Skogbruk, som er tilgjengelig for allmennheten, og CCS er de løsningene som blir mest brukt av store selskaper til å redusere sine utslipp [187, 194, 206]. De siste årene har det vært større fokus på CCS-prosjekter. Dette er lovende for norsk klimapolitikk, da det er stort potensial på norsk sokkel [108]. Det finnes allerede plattformer som bruker denne teknologien, og flere prosjekter er i oppstartsfasen. [119] Selv om biokull ikke er på samme utviklingsnivå som øvrig nevnte løsninger, er det likevel tilgjengelig på det norske markedet, noe som gjør alternativet til en mulighet for OKEA [94].

#### 4.2.4 Vurdering av fordeler og ulemper ved alternativene

Ulempene ved havgjødsling fører til at teknologien ikke er et gunstig valg sammenlignet med andre alternativer. Løsningen har ingen fordeler annet enn lagring av små mengder CO<sub>2</sub> [165]. utfordringer med økosystemer, forsuring, samt ukjente langtidseffekter, fører til at løsningen ikke er lovlig. Satt i sammenheng med komplekse og kostbare metoder er det ikke lønnsomt å investere i alternativet [172]. Dyphavslagring, som sliter med de samme ulempene, har derimot stor kapasitet og lave kostnader som gjør det verdt å overvåke fremgangen til teknologien [51]. Lavt utviklingsstadium av løsningen indikerer at teknologien er avhengig av flere år med forskning, noe som fører til at den ikke er aktuell for OKEA i dag [106]. I tillegg kan påvirkning på det biologiske mangfoldet føre til motstand til dette konseptet.

Bærekraftig skogbruk, blue carbon, samt karbonlandbruk har forholdsvis like fordeler og ulemper. Begge skogene er en kilde til husly og mat for ulike dyrearter, og gir dermed vern av biologisk mangfold [21, 33]. Skogene gir vern for forskjellige miljøpåvirkninger, som storm, flom og erosjon. Videre vil de gi bedre kvalitet av både jord og vann [67], [33]. Karbonlandbruk åpner muligheten for en potensiell inntektskilde for bønder [101, 102]. Ulempen med de naturbaserte løsningene er derimot utfordringer med kapasitetsberegninger, fare for lekkasje og grønnvasking. Reversibilitet og

overvåkningsproblematikk er også noe som gjør at prosjekter kan være vanskelig å sertifisere. Karbonlandbruk har i tillegg en begrenset kapasitet da den er avhengig av umettet jord [101].

De teknologibaserte løsningene har verken fordeler eller ulemper direkte knyttet til jordas økosystemer. Dette i seg selv er en fordel, da naturbalansen ikke blir forstyrret. Løsningene som CCS, DACCS og BECCS har ingen fellesnevner for fordeler og ulemper, annet enn at de er få. DACCS sine fordeler, som omfatter renere luft og enkel plassering, gjør ikke opp for dagens ulemper med kostnader og energiforsyning [139, 148]. Langsiktigheten av teknologien gjør den likevel attraktiv for fremtiden, når det er kommet bedre løsninger for å håndtere ulempen. BECCS-teknologien er avhengig av biomasse, vann og areal [106]. Dette kan være en fordel, men også en ulempe. BECCS bidrar til å danne et bruksområde for bioavfall. Det kan likevel tenkes at biomasse som allerede er et karbonlager, blir brukt som biomasse for BECCS, og dermed nullstille faktisk lagret karbon. CCS, som er kostbart, er på den andre siden tidseffektivt. Selv om teknologien ikke kan benyttes i all industri, er ikke dette et problem for OKEA. Det skal sies at CCS kan forlenge overgangen til fornybare energikilder, noe som kan være positivt for olje- og gassvirksomheten. I tillegg er CCS enkelt å implementere i eksisterende infrastruktur [51].

Mineralisering er, i likhet med DACCS, en kostbar og energikrevende teknologi. I tillegg er den avhengig av lokasjon og andre karbonfangstteknologier, eksempelvis DACCS [179]. Dette er faktorer som gjør at teknologien foreløpig er uaktuell for OKEA. Biokull er også energikrevende, og som BECCS er den avhengig av biomasse, som igjen kan misbrukes til grønnvasking [83]. Ved riktig ressursbruk, kan løsningen imidlertid benytte bioavfall og på denne måten forbedre kompostering. Teknologien har noe mangelfull kunnskap om langtidsvirkninger på økosystemer i blant annet jord [84]. Det er likevel noen positive bieffekter ved bruk av denne metoden. Biokull forbedrer jordhelsen, noe som gjør forsyning av vann og næringsstoffer mer effektivt [81]. Dette fører til mindre bruk av gjødsel. I tillegg vil bruken begrense utslipp av nitrøse klimagasser og metangass [89]. Teknologien frembringer gjenbrukbare biprodukter som kan brukes til energiproduksjon, og kan bidra i produksjon av biokull [83].

#### 4.2.5 Vurdering av alternativene på bakgrunn av grønnvaskingsrisiko

Det er et tydelig skille mellom teknologibaserte løsninger og naturbaserte løsninger. I oversiktstabellen (Tabell 1) er det mulig å se at grønnvaskingsrisikoen er mindre for alternativer som CCS, DACCS og mineralisering, dette skyldes blant annet gode metoder for sporing av lagret CO<sub>2</sub>. Det gjør at risikoen for dobbelttelling reduseres. For DACCS er det mulig å beregne mengde CO<sub>2</sub> teknologien faktisk fanger [139]. For naturbaserte løsninger er det derimot vanskelig å nøyaktig måle mengde CO<sub>2</sub> som tas opp.

Dette fører til økt risiko for grønnvasking. Skoger, både grønne og blå, samt karbonlandbruk er utsatt for dette. Grunnet risiko for reversering er det utfordrende å måle mengden CO<sub>2</sub> lagret. Risiko for grønnvasking for havgjødsling er satt høyt grunnet lite utviklet teknologi, svak kunnskap om metoden, samt bruk av fotosyntese til lagring. Biokull og BECCS har mindre risiko enn skog, men høyere risiko enn CCS. Dette skyldes primært bruk av biomasse, som kan føre til avskoging. [116]

Grønnvaskingsrisiko varierer med teknologiene. Likevel trenger ikke det å føre til at noen av løsningene forkastes. Ved bruk av kreditter av høykvalitet er det mulig å benytte alle mekanismene, og likevel oppnå et rent resultat. Det er imidlertid risiko for å erverve et dårlig rykte ved å anvende løsninger med høy grønnvaskingsrisiko.

#### 4.2.6 Vurdering av andre teknologier

Teknologier som ikke er like utviklet, eller allment praktisert, er IOC, havalkalisering, økt forvitring og nanoteknologier. Ørken som et karbonlager er også nevnt i Kapittel 2.5.6, fortrinnsvis grunnet interessant forskning. Denne teknologien er likevel nylig oppdaget, og bærer preg av minimal kunnskap. Felles for de andre teknologiene er at de er kostbare, noe som automatisk ekskluderer de som mulige alternativer for OKEA. I tillegg har blant annet økt forvitring og havalkalisering flere ulemper, som eksempelvis at de er energikrevende og kan være en trussel for miljøet [159, 161]. Nanoteknologi kan brukes for å effektivisere de ulike teknologiene, om de i fremtiden vil bli lønnsomme.

#### 4.3 Analyse av AHP resultatet

AHP-metoden ble utarbeidet i samarbeid med OKEA. De viktigste kriteriene fikk en høy prioritetsvektor og er vist i Tabell 9 og 10. Gruppen prioriterte først og fremst kriteriet *kostnad* som en av de viktigste faktorene. En høy kostnad av en løsning vil automatisk føre til at den må forkastes. *Politikk* og *tilgjengelighet* ble prioritert like under, med lik poengsum. Grunnen til dette er at en metode som er tilgjengelig, men ikke lovlig, stiller like sterkt som en lovlig metode som ikke er tilgjengelig for OKEA. Hver av disse tre kriteriene kan føre til at et alternativ må forkastes. Videre er risiko for *grønnvasking* rangert rett over *utviklingsstadium* og *varighet*. Grønnvasking kan svekke omdømmet til selskapet, og er dermed en viktig faktor i vurderingen. Utviklingsstadium og varighet vil gi en pekepinn på hvor i strategien et alternativ bør forekomme. *Fremtidsperspektiv* bidrar også med til denne vurderingen,

men får en lavere poengsum på grunn av at strategien fokuserer på nærmeste fremtid. Nederst i rangen er *potensial og utfordring over positive bieffekter*.

Resultatene til AHP er i favør CCS og skogbruk, som begge vurderes til henholdsvis 17 og 16 % på prioritetskalaen. Satt i sammenheng med kriteriene er det rimelig at det er disse to som havner øverst i Tabell 7. Den svake siden ved CCS er kostnad (Tabell 21), mens ved skogbruk er den største ulempen grønnvasking (Tabell 29). Grunnet noen forskjeller i tilgjengelighet (Tabell 26) og politikk (Tabell 23), blir summen av begge alternativene omtrent de samme. CCS havner likevel over skogbruk grunnet bedre poengsum på grønnvasking, varighet og politikk. Videre i tabellen stiller karbonlandbruk med 11 %, etterfulgt av biokull, DACCS og BECCS med omtrent 10 %. Karbonlandbruk kommer relativt høyt opp på listen grunnet lave kostnader, stor tilgjengelighet og høyt utviklingsstadium (Tabell 28). Biokull, DACCS og BECCS har spredte fordeler og ulemper, men havner likevel på samme nivå. Dette tyder på at noe av fordelene veier opp for andre ulemper. Et eksempel på det er at DACCS har høye kostnader, men minimal risiko for grønnvasking. I motsetning har karbonlandbruk lave kostnader, men en stor grønnvaskingsrisiko. Ut ifra prioriteringen vil det si at disse metodene stiller likt. Grunnet lavt utviklingsnivå og stor grønnvaskingsrisiko havner blue carbon på 9 %. AHP rangerer dyphavslagring høyere enn mineralisering, noe som er overraskende. Dette kan skyldes et større potensial, samt lavere kostnader med teknologien. Mineralisering rangeres svakt på både politikk og grønnvasking, og stiller derfor lavere på prioriteringen. Ingen av løsningene er tilgjengelige i Norge. Resultatet av AHP hadde mulig blitt annerledes om kostnadene til dyphavslagring var høyere. Dette er ikke et utenkelig scenario, da kostnadsbildet omtalt i Kapittel 2.2.2.3, ikke inneholder kostnaden knyttet til fangst av CO<sub>2</sub>. Dette er en faktor som bør tas hensyn til. Mineralisering hadde derfor trolig havnet over dyphavslagring i rangeringen til AHP. Havgjødning havner nederst på tabellen med 2,6 %, noe som ikke er overraskende med tanke på alle utfordringene knyttet til løsningen.

#### 4.4 Vurdering av dagens karbonmarked

Flere virksomheter i Norge fokuserer i økende grad på bærekraftige løsninger og redusert karbonavtrykk. Petroleumsvirksomheten er blant dem. De seks olje- og gasselskapene som nevnt i Kapittel 2.7, utfører flere tiltak for dekarbonisering. Disse har, i likhet med OKEA, tilrettelagt for eller iverksatt løsninger, som energieffektivisering og elektrifisering av offshore installasjoner. Hvilke tiltak og hvordan tiltakene utføres varierer.

Samtlige selskaper nevner CCS i sin strategi for karbonreduksjon. Av de seks selskapene i Kapittel 2.7, har Wintershall DEA, Norske Shell, Neptune Energy og TotalEnergies EP Norge allerede fått innvilget eller iverksatt CCS-lisenser og -prosjekter på norsk sokkel. Disse selskapene har derimot drevet med petroleumsvirksomhet i Norge lengre enn OKEA, og har høyere produksjon av olje og gass [189, 195, 201, 205]. De to siste selskapene er i dag ikke kommet like langt. Repsol har satt et CCS-prosjekt på Gyda-feltet på vent, som følge av komplikasjoner med CO<sub>2</sub>-injeksjon i reservoaret [199]. Sval er sammen med Neptune Energy, i søknadsprosessen om CCS-lisensen Trudvang [207]. Som nevnt i Kapittel 2.4.1.4, er CCS lenge blitt støttet og forsket på som en viktig teknologi i Norge for å nå nasjonale klimamål. Norge er også en av de fremste nasjonene innen offshore CCS-teknologi [108]. Dermed kan det forventes flere CCS-lisenser i olje- og gassektoren i Norge.

På bakgrunn av disse selskapenes tiltak, er CCS foreløpig den karbonfangstmekanismen som har kommet lengst i Norge. Å benytte teknologien i egen virksomhet bidrar derimot bare til reduserte CO<sub>2</sub>-utslipp, og den fjerner dermed ikke CO<sub>2</sub> fra atmosfæren [51]. Utslipp som ikke kan fjernes må dermed kompenseres ved hjelp av andre løsninger. Fra de nevnte selskapene i Kapittel 2.7, er det i dag bare Wintershall DEA, Norske Shell og TotalEnergies SE som bidrar til tiltak for CO<sub>2</sub>-opptak fra atmosfæren. Samtlige tiltak er naturbaserte. De har alle skogbruksprosjekter i ulike verdensdeler, i form av skogplanting og bevaring av skog [187, 194, 206]. Som forklart i Kapittel 2.3.1.2, anses dette problematisk da disse løsningene har høy grønnvaskingsrisiko. Det kan derimot tenkes at disse løsningene prioriteres, da de foreløpig er rimeligst og har høy tilgjengelighet, se Tabell 1 [69]. I bærekraftsrapporten for 2022 til TotalEnergies SE, moderselskapet til TEPN, opplyses det at selskapets naturbaserte karbonfangstprosjekter sertifiseres av anerkjente standarder [206]. Disse standardene styrker dermed kvaliteten til sertifiseringen, og senker grønnvaskingsrisikoen.

#### 4.5 Vurdering av referanser og feilkilder

I denne rapporten er det brukt over 200 ulike kilder. Utvalget av referanser kan føre til et subjektivt syn på alternativene og kan prege resultatet. Kildene underbygger og utfyller hverandre i de fleste tilfellene. Motstridende informasjon kommer frem ved kostnads- og kapasitetsestimater. Dette kan skyldes ulike beregninger og utdaterte kilder, noe som gjør områdene utfordrende å analysere. Kildene er mange og i utgangspunktet dekker de et bredt spekter av informasjon rundt løsninger for karbonkompensasjon. For å øke troverdigheten av funnene ble flere fagfelleverderte artikler brukt for samme informasjon. Fagpersoner ble kontaktet i forbindelse med oppgaven, noe som også styrker



troverdigheten. Dette kan derimot føre til at løsningene ble fremstilt subjektivt, og kan bidra til å forme resultatet.

AHP er et godt hjelpemiddel til å sammenligne forskjellige alternativer. Likevel er den basert på den teorien som ble funnet ved hjelp av litteratursøk, og baserer seg på skjønn. Dette vil være en svakhet ved mangelfull informasjon eller feilaktig vurdering. Det er verdt å legge merke til at kriteriene i AHP-vurderingen er vektlagt på bakgrunn av dagens opplysninger undersøkt og presentert i Kapittel 2. Resultatet vil gjenspeile den subjektive vurderingen, og denne risikoen bør tas i betraktning ved videre vurderinger.

#### 4.6 Vår anbefalte karbonkompensasjonsstrategi for OKEA ASA

Vår anbefaling skiller seg fra resultatene fra AHP. Dette skyldes at OKEA må bruke kreditter av god kvalitet for at omdømme ikke skal svekkes. En del av metodene som er vurdert vil ikke bli med på anbefalingen. Dette skyldes at noen av metodene er for kostbare, har risiko for grønnvasking, og at metodene i dag ikke er tilgjengelige. Vi anbefaler OKEA å implementere flere ulike tiltak som en del av sin strategi. Vår anbefalte strategi presenteres i Tabell 8.

*Tabell 8: Vår anbefalte strategi for hvilke metoder som kan brukes for å kompensere for OKEA's utslipp.*

Prioritering	Karbonfangst metode	Tilgjengelighet
1	Karbonfangst og -lagring (CCS)	Modne metoder som er tilgjengelig i Norge.
2	Biokull	
3	Skogbruk	
4	Blue Carbon	Fremtidsrettet, bør følge med på utviklingen.
5	DACCS og BECCS	
6	CO <sub>2</sub> -mineralisering	
7	Dyphavslagring	

#### 4.6.1 Fremstilling av vår anbefalte karbonkompensasjonsstrategi

CCS vil, i likhet med AHP, være øverst på vår prioriteringsliste. Dette er en teknologi for en permanent og trygg karbonlagring for olje- og gasselskaper. Selv om metoden ikke har noen positive bieffekter, er det heller ingen store utfordringer ved løsningen. Denne teknologien blir støttet av myndigheter, og er allerede tatt i bruk på norsk sokkel. Derav er det mye erfaring å hente fra andre selskaper, samt muligheter for samarbeid. I tillegg er dette en løsning som utelukker grønnvasking, og har et stort potensial når det gjelder lagringskapasitet. Den største utfordringen er kostnadene, men de vil sannsynligvis reduseres med tiden.

Biokull og skogbruk er to løsninger som er tilgjengelige på markedet i Norge i dag. Dette gjør at disse løsningene rangeres høyt. Til forskjell fra AHP, vurderer vi biokull over skogbruk. Dette er blant annet fordi biokull har lavere grønnvaskingsrisiko. Karbonet i biokull kan være stabilt i flere hundre år, og er mindre utsatt for naturlige og antropogene forstyrrelser [81]. En annen faktor er at biokull har flere bruksområder, som i sementproduksjon og landbruk. Biokull i landbruket har flere fordeler. I tillegg til bedret husdyr- og jordhelse, kan biokull kutte store mengder utslipp av klimagasser, som nitrøse gasser og metangass [84, 87]. Dette er faktorer som gjør at biokull rangeres høyere enn andre løsninger, men også at det er tilgjengelig i det norske markedet. Den største ulempen er at biokull er energikrevende, noe som fører til høyere kostnader enn for eksempel skogbruk [83]. Som nevnt i Kapittel 2.3.2.3, er kjøp av biokullkreditter i utlandet, for eksempel fra Sverige og USA, et rimeligere alternativ [94].

Biokull og karbonlandbruk er to løsninger som overlapper hverandre. Dette fordi biokull både er tilgjengelig som kreditt og kan brukes i landbruket, mens karbonlandbrukskreditter er i dag bare tilgjengelig i form av biokull. Andre løsninger for opptak av karbon i landbruk er vanskeligere å verifisere og mindre stabile, noe som øker risiko for reversering av karbonfangst i jorda [101]. Det gir en høyere grønnvaskingsrisiko ved karbonlandbruk. Derfor er biokull den eneste tilgjengelige løsningen for karbonkompensasjon, vi kan anbefale innen karbonlandbruk i dag.

Når det gjelder bærekraftig skogbruk, som er høyt oppe på prioritetsskalaen i AHP, mener vi at metoden ikke er den beste strategien for selskapet. Likevel er det et alternativ som foreløpig virker bedre enn andre løsninger. Bærekraftig skogbruk er en kjent løsning, og bærer preg av mange års erfaring. I tillegg vil det gi flere positive bieffekter som kan motvirke global oppvarming på et sekundært nivå, ved å blant annet øke biologisk mangfold. Grunnet viktige fordeler, lave kostnader og stor tilgjengelighet er skog også på anbefalingen vår. Det bør dog ikke være den primære strategien til OKEA, men heller et supplement. Det kan imidlertid skade omdømmet til selskapet om ikke kreditter

er nøye utvalgt. God kvalitet på kredittene er derfor avgjørende hvis bærekraftig skogbruk skal benyttes.

Blue Carbon, i likhet med skog, gir store fordeler i tillegg til karbonfangst. Økte fiskebestander og kystvern kan bidra til å redusere klimaavtrykket ved å verne biologisk mangfold. Norge har store arealer med taeskooger ved kysten, og har av den grunn stort potensial når det gjelder blue carbon lagring. Teknologien er imidlertid i utviklingsfase, og er ikke tilgjengelig i Norge enda. Det er likevel mye forskning, og utviklingen som går på hurtig, noe som gjør løsningen aktuell i fremtiden. Vi vil anbefale OKEA å bytte ut skogkreditter til blue carbon-kreditter hvis dette blir mulig. Dette skyldes at OKEA har en større påvirkning og tilknytting til det marine økosystemet, ovenfor skog og karbonlandbruk.

På samme måte som blue carbon er metoder som DACCS og BECCS lite tilgjengelige i Norge. Og selv om det er kostbare alternativer, er dette metoder som bør overvåkes. Dette skyldes at de er karbonnegative metoder, som er spådd en viktig rolle i kampen mot global oppvarming. Potensialet for DACCS er teoretisk kun begrenset av tilgang på energi, og ved utbygging av fornybar energi kan DACCS bli en attraktiv metode [\[149\]](#).

CO<sub>2</sub>-mineralisering er også en lovende metode, men er foreløpig ikke en tilgjengelig løsning for utslippskompensasjon i Norge. Dette er nødvendigvis ikke tilfellet på lang sikt. Norge har potensiale for mineralisering, da landet er rikt på olivin, som kan mineralisere karbon [\[162\]](#). Metoden er avhengig av en karbonfangstteknologi, og kan derfor bli aktuelt parallelt med metodene DACCS eller BECCS. På grunn av kostnadene, anses *in situ* mineralisering mer attraktiv fremfor *ex situ* [\[179\]](#).

Dyphavslagring er også en teknologi det er verdt å følge med på. Metoden har stort potensial og rimelige kostnader, men er i dag ulovlig på grunn av London-protokollen [\[55\]](#). Dersom teorien til dyphavslagring blir testet ut og på sikt blir en valid og lovlig metode, vil metoden forenkle CO<sub>2</sub>-lagring.

Nanoteknologi, som fortsatt er kostbart, kan i fremtiden effektivisere flere av løsningene [\[185\]](#). Det kan dermed være et støtteverktøy i strategien, og bør av den grunn holdes øye til.

#### 4.6.2 Vurdering av alternativer vi utelukker

Det er flere metoder som i teorien kan være gode løsninger, men likevel ikke egner seg for strategien til OKEA. Havgjødsling er en av de alternativene som ikke er gjennomførbart grunnet politikk. I tilfelle politisk støtte er løsningen likevel ikke noe å satse på. Dette skyldes dårlig kapasitet for lagring, samt kostnader knyttet til kontinuerlig vedlikehold av metoden.

Andre teknologier som utelukkes er økt forvitring, havalkalisering og Indirect Ocean Capture. Disse metodene er kostbare og lite utviklet, og vil dermed ikke være tilgjengelig med det første. Karbonlagring i ørken er fortsatt på hypotesestadiet, og er ikke en strategi i seg selv.

## 5. Konklusjon

Karbonkompensasjonsløsninger deles i naturbaserte- og teknologibasert alternativer. Naturbaserte løsninger omfatter bærekraftig skogbruk, karbonlandbruk, biokullproduksjon og restaurering av blå hav. De største teknologibaserte løsningene er Carbon Capture and Storage, Direct Air Capture and Carbon Storage, og Bioenergy with Carbon Capture and Storage. I tillegg er det flere mindre utviklede teknologier som er mer kostbare. Dette omfatter Indirect Ocean Capture, havalkalisering, havgjødsling, karbonlagring i ørken og økt forvitring.

Andre olje- og gasselskap på norsk sokkel inkluderer CCS-teknologien i sin strategi mot klimagassutslipp. I tillegg er det flere som inkluderer bærekraftig skogbruk og karbonlandbruk.

AHP er en metode som rangerer løsningene basert på kriterier som blant annet kostnad, potensial, grønnvasking og tilgjengelighet. Resultatet prioriterer CCS etterfulgt av bærekraftig skogbruk og karbonlandbruk. Biokull, DACCS og BECCS stiller omtrent likt i rangeringen. Deretter blir blue carbon prioritert over dyphavslagring. CO<sub>2</sub>-mineralisering og havgjødsling er lavt rangert.

Vår anbefaling til OKEA ASA skiller seg fra AHP-anbefalingen. I strategien ble CCS vurdert til det beste alternativet, supplert av biokull og skogbruk. Bærekraftig skogbruk kan benyttes frem til blue carbon blir tilgjengelig i Norge. Biokull er en løsning som er verdt å satse på, og kan brukes innen karbonlandbruk. DACCS, BECCS, CO<sub>2</sub>-mineralisering og dyphavslagring er mindre utviklede teknologier som kan ha større betydning i fremtiden. Nanoteknologi kan brukes som en effektiviserende metode for løsningene når dette blir tilgjengelig, og er mindre kostbart.

## Referanseliste

1. OKEA ASA. Assets: OKEA ASA; 2023 [Available from: <https://www.okea.no/assets/>].
2. OKEA ASA. Q4, Quarterly Report: OKEA ASA; 2022 [Available from: <https://mb.cision.com/Public/18168/3705901/a14f1ca6e474eff4.pdf>]
3. Agreement P, editor Paris agreement. Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (21st Session, 2015: Paris) Retrieved December; 2015: HeinOnline.
4. ASA O. ESG report OKEA ASA 2022: OKEA ASA; 2023 [Available from: <https://www.okea.no/wp-content/uploads/2023/03/okea-esg-report-2022.pdf>].
5. Konkraft. The energy industry of tomorrow on the Norwegian continental shelf: Konkraft; 2021 [Available from: <https://konkraft.no/contentassets/d5669caef6704c92920bb33113fb82a7/the-energy-industry-of-tomorrow-on-the-ncs-konkraft-report-2021-2-final.pdf>].
6. OKEA ASA. ESG Report OKEA ASA: OKEA ASA; 2021 [Available from: <https://www.okea.no/wp-content/uploads/2022/04/okea-esg-report-2021pdf.pdf>].
7. United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies. Nairobi; 2022.
8. Regjeringen. Dette er klimakvoter. Regjering.no. 2020.
9. Schølset S, Jewett SB, Bjørklund E. Jakten på klimanøytralitet og ansvarlig bruk av klimakreditter: PwC; 2022 [Available from: [https://www.pwc.no/no/nyheter/zero-rapporten/jakten-paa-klimanoytralitet-rapport-2022.pdf?fbclid=IwAR0IOV4U\\_c\\_d1EnlpcEM\\_WY5hBR8SbhcN6OKQ9QpbhZGa1GSfowL8aGU-Q](https://www.pwc.no/no/nyheter/zero-rapporten/jakten-paa-klimanoytralitet-rapport-2022.pdf?fbclid=IwAR0IOV4U_c_d1EnlpcEM_WY5hBR8SbhcN6OKQ9QpbhZGa1GSfowL8aGU-Q)].
10. Commission E. EU Emissions Trading System (EU ETS) [Available from: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en)].
11. Bjartnes J. Naturlig karbonlagring: WWF; [Available from: <https://www.wwf.no/dyr-og-natur/naturlig-karbonlagring>].
12. Hallegraef GM. OCEAN CLIMATE CHANGE, PHYTOPLANKTON COMMUNITY RESPONSES, AND HARMFUL ALGAL BLOOMS: A FORMIDABLE PREDICTIVE CHALLENGE<sup>1</sup>. Journal of Phycology. 2010;46(2):220-35.
13. Galtieri F, Liang Q, Duarte LP, Recinos D, Stroemsheim B, Yamagata H. How Can Carbon Sinks be Used to Offset Emissions from Equinor's Production And Products? : Columbia SIPA; 2021.

14. Bartlett J, Rusch GM, Kyrkjeeide MO, Sandvik H, Norden J. Carbon storage in Norwegian ecosystems (revised edition). Trondheim: Norwegian Institute for Nature Research; 2020.
15. the School of International Service at American University. Carbon Removal Fact Sheet: The Institute for Carbon Removal Law and Policy; 2020 [Available from: [https://www.american.edu/sis/centers/carbon-removal/upload/icrlp\\_fact\\_sheet\\_blue\\_carbon\\_2020\\_update.pdf](https://www.american.edu/sis/centers/carbon-removal/upload/icrlp_fact_sheet_blue_carbon_2020_update.pdf)].
16. Tibe T. In: klimasystemet Hri, editor.: Miljødirektoratet; 2019.
17. Miljødirektoratet. Havets rolle i klimasystemet. Miljødirektoratet; 2019.
18. Albertsen J, Arneberg P, Assmann K, Assmy P, Bohlin-Nizzetto P, Børsheim KY, et al. STATUS FOR MILJØET I NORSKE HAVOMRÅDER. 15165 2023 [cited 2023 28. april]. Available from: <https://www.hi.no/templates/reporteditor/report-pdf?id=67516&46690431=>.
19. Macreadie PI, Anton A, Raven JA, Beaumont N, Connolly RM, Friess DA, et al. The future of Blue Carbon science. Nature communications. 2019;10(1):3998.
20. Wathne C, Norderhaug K-M, Sander G, Gundersen H, Lutz S, Bryan T. Blå skog – en viktig del av grunnlaget for livet langs kysten Havforskningsintituttet2021 [Available from: <https://www.hi.no/hi/nyheter/2021/juli/arets-sommerferie-snorkle-blant-norges-mangfoldige-tang-og-tareskog>].
21. The Blue Carbon Initiative. Mitigatin climate change through coastal ecosystem management The Blue Carbon Initiative [Available from: <https://www.thebluecarboninitiative.org/>].
22. Bryan T, Wathne C, Martinez-Swatson KA, Polkinghorne O, Lutz SJ. Norsk Nettverk for Blå Skog: topp 10 trender fra 2022. 2023.
23. Wathne CL. In: Jagiello N, editor. 2023.
24. Frigstad H, Gundersen H, Andersen GS, Borgersen G, Kvile KØ, Krause-Jensen D, et al. Blue Carbon–climate adaptation, CO2 uptake and sequestration of carbon in Nordic blue forests: Results from the Nordic Blue Carbon Project: Nordic Council of Ministers; 2021.
25. Macreadie PI, Nielsen DA, Kelleway JJ, Atwood TB, Seymour JR, Petrou K, et al. Can we manage coastal ecosystems to sequester more blue carbon? Frontiers in Ecology and the Environment. 2017;15(4):206-13.
26. Mack SK, Lane RR, Deng J, Morris JT, Bauer JJ. Wetland carbon models: Applications for wetland carbon commercialization. Ecological Modelling. 2023;476:110228.
27. Miljødirektoratet. Plan for restaurering av våtmark i Norge (2021-2025). 2020 [Available from: <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2021/april-2021/plan-for-restaurering-av-vatmark-i-norge-2021-2025/>].

28. Norderhaug K-M, Skjermo J, Kolstad K, Broch OJ, Ergron Å, Handå A, et al. Mot en ny havnæring for tare? Havforskningsinstituttet; 2020.
29. Almås KA, Ratvik I. Sjøkart mot 2050. SINTEF, Trondheim. 2017.
30. Jiao N, Wang H, Xu G, Aricò S. Blue carbon on the rise: challenges and opportunities. National Science Review. 2018;5(4):464-8.
31. Jones N. Why the Market for 'Blue Carbon' Credits May Be Poised to Take Off Yale school of the environment: YaleEnvironment360; 2021 [Available from: <https://carboncredits.com/the-importance-of-blue-carbon-credits/>].
32. Ullman R, Bilbao-Bastida V, Grimsditch G. Including blue carbon in climate market mechanisms. Ocean & Coastal Management. 2013;83:15-8.
33. CarbonCredits. The Importance of Blue Carbon Credits: CarbonCredits; [Available from: <https://carboncredits.com/the-importance-of-blue-carbon-credits/>].
34. Krause-Jensen D, Lavery P, Serrano O, Marbà N, Masque P, Duarte CM. Sequestration of macroalgal carbon: the elephant in the Blue Carbon room. Biology letters. 2018;14(6):20180236.
35. Macreadie PI, Robertson AI, Spinks B, Adams MP, Atchison JM, Bell-James J, et al. Operationalizing marketable blue carbon. One Earth. 2022;5(5):485-92.
36. Bertram C, Quaas M, Reusch TB, Vafeidis AT, Wolff C, Rickels W. The blue carbon wealth of nations. Nature Climate Change. 2021;11(8):704-9.
37. Isensee K, Herr D, Howard J, Arico S. Blue carbon: Science developments of relevance to the UNFCCC The Blue Carbon Initiative [Available from: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/4.4BlueCarbon\\_IOC.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/4.4BlueCarbon_IOC.pdf)].
38. Wylie L, Sutton-Grier AE, Moore A. Keys to successful blue carbon projects: lessons learned from global case studies. Marine Policy. 2016;65:76-84.
39. Klein J. Blue carbon will be the next frontier of carbon crediting GreenBiz: GreenBiz; 2022 [Available from: <https://www.greenbiz.com/article/blue-carbon-will-be-next-frontier-carbon-crediting>].
40. Verra. Verra [Available from: <https://verra.org/>].
41. The Gold Standard. Goldstandard [Available from: <https://www.goldstandard.org/>].
42. South Pole. In: Jagiello N, editor.
43. UNESCO. Blue Carbon and UNESCO Marine World Heritage UNESCO [Available from: <https://whc.unesco.org/en/blue-carbon-report/>].
44. Fair Carbon. Global blue carbon projects: Fair Carbon; 2023 [Available from: <https://faircarbon.org/content/fc/projectmap>].



45. Caldeira K, Akai M, Brewer PG, Chen B, Haugan PM, Iwama T, et al. Ocean storage. 2005.
46. Ocean Visions. Ocean-Based Carbon Dioxide Removal (CDR) Ocean Visions [Available from: <https://oceanvisions.org/deep-sea-storage/>].
47. Leung DY, Caramanna G, Maroto-Valer MM. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;39:426-43.
48. Herzog H, Caldeira K, Adams E. Carbon sequestration via direct injection. *Encyclopedia of Ocean Sciences*-. 2001;1:408-14.
49. Aminu MD, Nabavi SA, Rochelle CA, Manovic V. A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied Energy*. 2017;208:1389-419.
50. Metz B, Davidson O, De Coninck H, Loos M, Meyer L. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage: Cambridge: Cambridge University Press; 2005.
51. Metz B, Intergovernmental Panel on Climate Change Working G, III. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge: Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change by Cambridge University Press; 2005.
52. Seibel BA, Walsh PJ. Potential impacts of CO<sub>2</sub> injection on deep-sea biota. *Science*. 2001;294(5541):319-20.
53. Hofmann M, Schellnhuber HJ. Ocean acidification: a millennial challenge. *Energy & Environmental Science*. 2010;3(12):1883-96.
54. Barry JP, Buck KR, Lovera CF, Kuhn L, Whaling PJ, Peltzer ET, et al. Effects of direct ocean CO<sub>2</sub> injection on deep-sea meiofauna. *Journal of Oceanography*. 2004;60:759-66.
55. Protokoll til Konvensjon om bekjempelse av havforurensninger ved dumping av avfall og annet materiale [Available from: <https://lovdata.no/dokument/TRAKTAT/traktat/1996-11-07-1>].
56. Anwar M, Fayyaz A, Sohail N, Khokhar M, Baqar M, Khan W, et al. CO<sub>2</sub> capture and storage: A way forward for sustainable environment. *Journal of environmental management*. 2018;226:131-44.
57. Havrettskonvensjonen: FN-sambandet; 2020 [Available from: <https://www.fn.no/om-fn/avtaler/miljoe-og-klima/havrettskonvensjonen>].
58. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change and Land*: WWF; 2019 [10.05.2023]. Available from: [https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/ipcc\\_land\\_and\\_climate\\_change\\_summary\\_or\\_policy\\_makers.pdf](https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/ipcc_land_and_climate_change_summary_or_policy_makers.pdf).

59. Harris N, Gibbs D. Forests absorb twice as much carbon as they emit each year. World Resources Institute. 2021.
60. Yankel C. FAQ: Forest Carbon Projects: The Climate Trust; 2018 [05.04.2023]. Available from: <https://climatetrust.org/forest-carbon-projects-faq/#:~:text=A%20%E2%80%9Cforest%20carbon%20offset%2C%E2%80%9D,compensate%20for%20emissions%20occurring%20elsewhere.>
61. Haya BK, Evans S, Brown L, Bukoski J, Butsic V, Cabiyo B, et al. Comprehensive review of carbon quantification by improved forest management offset protocols. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2023;6:12.
62. Fuss S, Lamb WF, Callaghan MW, Hilaire J, Creutzig F, Amann T, et al. Negative emissions-Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environ Res Lett*. 2018;13(6):63002.
63. Goetz S, Hansen M, Houghton R, Walker W, Laporte NT, Busch J. Measurement and monitoring for REDD+: the needs, current technological capabilities, and future potential. Center for Global Development Working Paper. 2015(392).
64. Bjerknæs Centre for Climate Research. Naturens opptak av CO2 og avskoging: Universitetet i Bergen; 2021 [07.05.2023]. Available from: <https://bjerknæs.uib.no/artikler/fns-klimapanel/opptak-i-skog>.
65. Sjøgaard GB, Johannes; Smith, Aaron; Hobrak, Katharina. SKOGENS KLIMAGASSREGNSKAP. NORSK INSTITUTT FOR BIOØKONOMI; 2022.
66. Statistisk sentralbyrå. Arealbruk og arealressurser: SSB; 2022 [31.03.2023]. Available from: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/areal/statistikk/arealbruk-og-arealressurser>.
67. Institute for Carbon Removal Law and Policy. Forestation: American University; 2020 [08.04.2023]. Available from: [https://www.american.edu/sis/centers/carbon-removal/upload/icrpl\\_fact\\_sheet\\_forestation\\_2020\\_update.pdf](https://www.american.edu/sis/centers/carbon-removal/upload/icrpl_fact_sheet_forestation_2020_update.pdf).
68. Cerasoli S, Yin J, Porporato A. Cloud cooling effects of afforestation and reforestation at midlatitudes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2021;118(33):e2026241118.
69. Pan C, Shrestha A, Innes JL, Zhou G, Li N, Li J, et al. Key challenges and approaches to addressing barriers in forest carbon offset projects. *Journal of Forestry Research*. 2022;33(4):1109-22.
70. Mooney P. Planting trees can increase local temperatures Univeristetet i Bergen: Bjerknæs Centre for Climate Research; 2021 [09.04.2023]. Available from: <https://bjerknæs.uib.no/en/article/news/planting-trees-can-increase-local-temperatures>.

71. Person W. An inside look at pricing in the forest carbon market: Conservation Finance Network; 2021 [09.04.2023]. Available from: <https://www.greenbiz.com/article/inside-look-pricing-forest-carbon-market>.
72. Busch J, Engelmann J, Cook-Patton SC, Griscom BW, Kroeger T, Possingham H, et al. Potential for low-cost carbon dioxide removal through tropical reforestation. *Nature Climate Change*. 2019;9(6):463-6.
73. Trefadder AS. Bli Trefadder: Trefadder; 2023 [12.04.2023]. Available from: <https://trefadder.no/bedrift/>.
74. Mullis ME. Privatpersoner, bedrifter og stater kaster seg over storstilt treplanting. Men ikke alle er overbevist. *Nettavisen*. 2021.
75. UN-REDD PROGRAMME. ABOUT REDD+: United Nations; 2016 [13.04.2023]. Available from: <https://www.un-redd.org/sites/default/files/2021-10/Fact%20Sheet%201-%20About%20REDD3.pdf>.
76. Architecture for REDD+ Transactions. TREES: The REDD+ Environmental Excellence Standard 2021 [13.04.2023]. Available from: <https://www.artredd.org/trees/#about-trees>.
77. Emergent. LEAF Coalition 2023 [14.04.2023]. Available from: <https://leafcoalition.org/>.
78. European Commission. Use of international credits 2023 [14.04.2023]. Available from: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/use-international-credits\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/use-international-credits_en).
79. Shrestha A, Eshpeter S, Li N, Li J, Nile JO, Wang G. Inclusion of forestry offsets in emission trading schemes: insights from global experts. *Journal of Forestry Research*. 2022;33(1):279-87.
80. Joner EJ, Rasse D, Budai A, O'Toole A. Biokull: NIBIO; 2017 [15.04.2023]. Available from: <https://www.nibio.no/tema/jord/organisk-avfall-som-gjodsel/biokull>.
81. Gupta DK, Gupta CK, Dubey R, Fagodiya RK, Sharma G, Noor Mohamed M, et al. Role of biochar in carbon sequestration and greenhouse gas mitigation. *Biochar applications in agriculture and environment management*. 2020:141-65.
82. Wystalska K, Kwarciak-Kozłowska A. The effect of biodegradable waste pyrolysis temperatures on selected biochar properties. *Materials*. 2021;14(7):1644.
83. Sanford J, Aguirre-Villegas H, Larson R, Sharara M, Liu Z, Schott L. Biochar Production through Slow Pyrolysis of Animal Manure. *NC State Extension Publications*. 2022.
84. Wang D, Jiang P, Zhang H, Yuan W. Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review. *Science of the Total Environment*. 2020;723:137775.

85. Smith P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global change biology*. 2016;22(3):1315-24.
86. Rasse D, Økland I, Barcena TG, Riley H, Martinsen V, Sturite I, et al. Muligheter og utfordringer for økt karbonbinding i jordbruksjord. NIBIO; 2019. Report No.: 5/36/2019.
87. Man KY, Chow KL, Man YB, Mo WY, Wong MH. Use of biochar as feed supplements for animal farming. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2021;51(2):187-217.
88. Tan K, Qin Y, Wang J. Evaluation of the properties and carbon sequestration potential of biochar-modified pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2022;314:125648.
89. Gao Y, Fang Z, Van Zwieten L, Bolan N, Dong D, Quin BF, et al. A critical review of biochar-based nitrogen fertilizers and their effects on crop production and the environment. *Biochar*. 2022;4(1):36.
90. O'toole A, Grønlund A. Produksjon av 2. generasjons- biodrivstoff via termokjemiske prosesser. Kunnskapsstatus, kostnader, og potensial for klimagassreduksjon i Norge. Semantic Scholar: Norsk institutt for bioøkonomi; 2012.
91. Buss W, Hilber I, Graham MC, Mašek Oe. Composition of PAHs in biochar and implications for biochar production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2022;10(20):6755-65.
92. Campion L, Bekchanova M, Malina R, Kuppens T. The costs and benefits of biochar production and use: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*. 2023:137138.
93. Paul C, Bartkowski B, Dönmez C, Don A, Mayer S, Steffens M, et al. Carbon farming: Are soil carbon certificates a suitable tool for climate change mitigation? *Journal of Environmental Management*. 2023;330:117142.
94. Puro.earth. OBIO-biochar from sustainable Norwegian forests: Puro.earth; 2023 [03.04.2023]. Available from: <https://puro.earth/CORC-co2-removal-certificate/obio-biochar-from-sustainable-norwegian-forests-100128>.
95. Thengane SK, Kung K, Hunt J, Gilani HR, Lim CJ, Sokhansanj S, et al. Market prospects for biochar production and application in California. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2021;15(6):1802-19.
96. European Commission Joint Research Centre (JRC). Biochar – Sustainability, Certification and Legislation: International Biochar Initiative; 2010 [22.04.2023]. Available from: [https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/Biochar/Documents/Biochar\\_IBI2010.pdf](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/Biochar/Documents/Biochar_IBI2010.pdf).
97. Klima- og miljødepartementet. Endringer i klimaloven (klimamålet for 2030). Regjeringen Støre; 2023.

98. Thomassen M. CAPTURE+: Biokull som bærekraftig klimatiltak for nullutslippsamfunnet: SINTEF; 2014 [22.04.2023]. Available from: <https://www.sintef.no/prosjekter/2014/barekraftige-biokullsystemer-for-et-nullutslippsam/>.
99. Rasse D. Karbonlandbruk - Carbon farming: NIBIO; 2022 [22.03.2023]. Available from: <https://www.nibio.no/tema/miljo/tiltaksveileder-for-landbruket/klimagassutslipp/karbonlandbruk-carbon-farming>.
100. Lavallee & Cotrufo. Soil carbon is a valuable resource, but all soil carbon is not created equal: The Conversation; 2020 [22.03.2023].
101. Institute for Carbon Removal Law and Policy. Soil Carbon Sequestration: American University; 2020 [22.03.2023]. Available from: [https://www.american.edu/sis/centers/carbon-removal/upload/icrlp\\_fact\\_sheet\\_soil\\_carbon\\_2020\\_update.pdf](https://www.american.edu/sis/centers/carbon-removal/upload/icrlp_fact_sheet_soil_carbon_2020_update.pdf).
102. van der Pol L. To make agriculture more climate-friendly, carbon farming needs clear rules: Colorado State University; 2021 [03.04.2023]. Available from: <https://source.colostate.edu/to-make-agriculture-more-climate-friendly-carbon-farming-needs-clear-rules/>.
103. Puro.earth. CORC Carbon Removal Indexes: Puro.earth; 2023 [22.04.2023]. Available from: <https://puro.earth/carbon-removal-index-price/>.
104. Klima- og miljødepartementet. Heilskapeleg plan for å nå klimamålet Regjeringen.no: Regjeringen Solberg; 2021 [27.03.2023]. Available from: <https://www.regjeringen.no/no/dokumentarkiv/regjeringen-solberg/aktuelt-regjeringen-solberg/kld/nyheter/2021/heilskapeleg-plan-for-a-na-klimamalet/id2827600/?expand=factbox2827603>.
105. Rethink Food. Vi lanserer et norsk karbonmarked for å øke insentivene til karbonlagring i jord: Rethink Food; 2022 [03.04.2023]. Available from: <https://rethinkfood.no/vi-lanserer-et-norsk-karbonmarked-for-a-oke-insentivene-til-karbonlagring-i-jord/>.
106. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. . Geneva, Switzerland: IPCC; 2023.
107. Benjaminsen C. This is what you need to know about CCS – Carbon Capture and Storage. 2019.
108. Petroleum N. Fangst, transport og lagring av CO2 2023 [Available from: <https://www.norskpetroleum.no/miljo-og-teknologi/fangst-transport-og-lagring-av-co2/>].
109. Om TCM 2023 [Available from: <https://tcmda.com/no/om-tcm/#hvem-vi-er-og-hva-vi-leverer>].

110. Russo ME, Olivieri G, Marzocchella A, Salatino P, Caramuscio P, Cavaleiro C. Post-combustion carbon capture mediated by carbonic anhydrase. Separation and purification technology. 2013;107:331-9.
111. Casas N, Schell J, Joss L, Mazzotti M. A parametric study of a PSA process for pre-combustion CO<sub>2</sub> capture. Separation and purification technology. 2013;104:183-92.
112. Fujimori T, Yamada T. Realization of oxyfuel combustion for near zero emission power generation. Proceedings of the Combustion Institute. 2013;34(2):2111-30.
113. laboratory Net. OXY-COMBUSTION [Available from: <https://netl.doe.gov/node/7477>].
114. IEA. About CCUS Paris: IEA; 2021 [Available from: <https://www.iea.org/reports/about-ccus>].
115. IEA. Is carbon capture too expensive? Paris: IEA; 2021 [Available from: <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>].
116. Ditaranto M, Røkke PE. BECCS - Å fjerne CO<sub>2</sub> fra atmosfæren [Available from: <https://www.sintef.no/fagomrader/bioenergi/beccs-a-fjerne-co2-fra-atmosfaren/>].
117. Boot-Handford ME, Abanades JC, Anthony EJ, Blunt MJ, Brandani S, Mac Dowell N, et al. Carbon capture and storage update. Energy & environmental science. 2014;7(1):13-189.
118. IEA. CO<sub>2</sub> Transport and Storage. Paris; 2022.
119. Lindberg B. Karbonfangst på Sleipner - tilbake dit den kom fra. 2022.
120. Halland EK, Riis F, Magnus C, Johansen WT, Tappel IM, Gjeldvik IT, et al. CO<sub>2</sub> Storage Atlas of the Norwegian Part of the North Sea. Energy Procedia. 2013;37:4919-26.
121. Halland EK, Johansen WT, Riis F, Norge O. CO<sub>2</sub> storage atlas : Norwegian North Sea. Stavanger: Norwegian Petroleum Directorate; 2011.
122. Equinor. Karbonfangst, -utnyttelse og -lagring [Available from: <https://www.equinor.com/no/energi/karbonfangst-utnyttelse-og-lagring>].
123. IEA. The world has vast capacity to store CO<sub>2</sub>: Net zero means we'll need it Paris2021 [Available from: <https://www.iea.org/commentaries/the-world-has-vast-capacity-to-store-co2-net-zero-means-we-ll-need-it>].
124. IEA. Bioenergy with Carbon Capture and Storage Paris2022 [Available from: <https://www.iea.org/reports/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage>].
125. IEA. World Energy Balances: Overview Paris2021 [Available from: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview/world>].
126. Gunderson R, Stuart D, Petersen B. The fossil fuel industry's framing of carbon capture and storage: Faith in innovation, value instrumentalization, and status quo maintenance. Journal of Cleaner Production. 2020;252:119767.

127. IEA. ETP Clean Energy Technology Guide Paris: IEA; 2022 [Available from: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>].
128. Snæbjörnsdóttir SÓ, Wiese F, Fridriksson T, Ármannsson H, Einarsson GM, Gislason SR. CO<sub>2</sub> storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges. Energy Procedia. 2014;63:4585-600.
129. Wennersten R, Sun Q, Li H. The future potential for Carbon Capture and Storage in climate change mitigation – an overview from perspectives of technology, economy and risk. Journal of cleaner production. 2015;103:724-36.
130. Pires JCM. Carbon Capture and Storage: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 2019.
131. Petroleum N. Utslipp til luft 2022 [Available from: <https://www.norskpetroleum.no/miljo-og-teknologi/utslipp-til-luft/>].
132. Consoli C. Bioenergy and carbon capture and storage. Global CCS Institute. 2019.
133. Regjeringen. CO<sub>2</sub>-håndtering [Available from: <https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/co2-handtering/id86982/>].
134. Regjeringen. Spørsmål og svar om Langskip-prosjektet 2021 [Available from: <https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/landingssider/ny-side/ccs/id2863902/?expand=factbox2864138>].
135. Regjeringen. Klimaendringer og norsk klimapolitikk 2021 [Available from: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/innsiktsartikler-klima-miljo/klimaendringer-og-norsk-klimapolitikk/id2636812/>].
136. Intergovernmental Panel on Climate C. Climate Change 2014: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change; 2015. Report No.: 9291691437,9789291691432.
137. Terlouw T, Treyer K, Bauer C, Mazzotti M. Life cycle assessment of direct air carbon capture and storage with low-carbon energy sources. Environmental science & technology. 2021;55(16):11397-411.
138. IEA. Direct Air Capture. Paris; 2022.
139. IEA. Direct Air Capture 2022. Paris; 2022.
140. Sabatino F, Grimm A, Gallucci F, van Sint Annaland M, Kramer GJ, Gazzani M. A comparative energy and costs assessment and optimization for direct air capture technologies. Joule. 2021;5(8):2047-76.
141. Bisotti F, Ringdal H, Rosnes O, Mathisen A, Hoff KA, Hovland J. Direct air capture of CO<sub>2</sub> – a review. 2023.

142. Beuttler C, Charles L, Wurzbacher J. The Role of Direct Air Capture in Mitigation of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions. *Frontiers in climate*. 2019;1.
143. Breyer C, Fasihi M, Bajamundi C, Creutzig F. Direct air capture of CO<sub>2</sub>: a key technology for ambitious climate change mitigation. *Joule*. 2019;3(9):2053-7.
144. Héder M. From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation. *The Innovation Journal*. 2017;22(2):1-23.
145. Norge I. Technology Readiness Level (TRL) 2021 [Available from: <https://www.innovasjon Norge.no/no/tjenester/innovasjon-og-utvikling/finansiering-for-innovasjon-og-utvikling/finansiering-av-innovasjonsprosjekt/technology-readiness-level-trl/>].
146. Wouda P. Technology qualification for energy [Available from: <https://www.dnv.com/services/technology-qualification-for-energy-39248>].
147. E-fuel N. Driving the transition to renewable aviation today [Available from: <https://www.norsk-e-fuel.com/>].
148. Climeworks. Climeworks [Available from: <https://climeworks.com/>].
149. Ozkan M, Nayak SP, Ruiz AD, Jiang W. Current status and pillars of direct air capture technologies. *iScience*. 2022;25(4):103990-.
150. Sendi M, Bui M, Mac Dowell N, Fennell P. Geospatial analysis of regional climate impacts to accelerate cost-efficient direct air capture deployment. *One Earth*. 2022;5(10):1153-64.
151. Commission E. Carbon Removal Certification [Available from: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/sustainable-carbon-cycles/carbon-removal-certification\\_en#what-are-high-quality-carbon-removals](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/sustainable-carbon-cycles/carbon-removal-certification_en#what-are-high-quality-carbon-removals)].
152. Ishimoto Y, Sugiyama M, Kato E, Moriyama R, Tsuzuki K, Kurosawa A. Putting costs of direct air capture in context. 2017.
153. Capture DA. Direct Air Capture [Available from: <https://www.directaircapture.com/>].
154. Engineering C. Carbon Engineering [Available from: <https://carbonengineering.com/>].
155. Commission E. Horizon Europe [Available from: [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en)].
156. Removal C. Direct Air Capture in Norway [Available from: <https://www.carbonremoval.no/>].
157. Strefler J, Amann T, Bauer N, Kriegler E, Hartmann J. Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letters*. 2018;13(3):034010.



158. Calabrese S, Wild B, Bertagni MB, Bourg IC, White C, Aburto F, et al. Nano-to global-scale uncertainties in terrestrial enhanced weathering. *Environmental Science & Technology*. 2022;56(22):15261-72.
159. Goll DS, Ciais P, Amann T, Buermann W, Chang J, Eker S, et al. Potential CO<sub>2</sub> removal from enhanced weathering by ecosystem responses to powdered rock. *Nature Geoscience*. 2021;14(8):545-9.
160. Foteinis S, Andresen J, Campo F, Caserini S, Renforth P. Life cycle assessment of ocean liming for carbon dioxide removal from the atmosphere. *Journal of Cleaner Production*. 2022;370:133309.
161. Montserrat F, Renforth P, Hartmann J, Leermakers M, Knops P, Meysman FJ. Olivine dissolution in seawater: implications for CO<sub>2</sub> sequestration through enhanced weathering in coastal environments. *Environmental Science & Technology*. 2017;51(7):3960-72.
162. Korneliussen A. Muligheter for verdiskapning ved CO<sub>2</sub>-basert prosessering av mineralske råvarer: Egnede forekomster i Nordland.: Norges geologiske undersøkelse (NGU); 2012 [30.04.2023]. Available from: [http://ftp.ngu.no/Pub/Are/CO2MIN/\(1\)%20NGU%20Rapport%202011%20038.pdf](http://ftp.ngu.no/Pub/Are/CO2MIN/(1)%20NGU%20Rapport%202011%20038.pdf).
163. Feng E, Koeve W, Keller DP, Oschlies A. Model-Based Assessment of the CO<sub>2</sub> Sequestration Potential of Coastal Ocean Alkalinization. *Earth's Future*. 2017;5(12):1252-66.
164. Martin JH. Glacial-interglacial CO<sub>2</sub> change: The Iron Hypothesis. *Paleoceanography*. 1990;5(1):1-13.
165. Zeebe RE, Archer D. Feasibility of ocean fertilization and its impact on future atmospheric CO<sub>2</sub> levels. *Geophysical Research Letters*. 2005;32(9).
166. Falkowski PG. The ocean's invisible forest. *Scientific American*. 2002;287(2):54-61.
167. NASA. Chlorophyll: NASA; 2023 [Available from: [https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MY1DMM\\_CHLORA](https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MY1DMM_CHLORA)].
168. Boyd P, Law C. The Southern Ocean iron release experiment (SOIREE)—introduction and summary. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2001;48(11-12):2425-38.
169. Huesemann MH. Ocean fertilization and other climate change mitigation strategies: an overview. *Marine Ecology Progress Series*. 2008;364:243-50.
170. Strong AL, Cullen JJ, Chisholm SW. Ocean fertilization: Science, policy, and commerce. *Oceanography*. 2009;22(3):236-61.
171. Boyd PW, Jickells T, Law C, Blain S, Boyle E, Buesseler K, et al. Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005: synthesis and future directions. *science*. 2007;315(5812):612-7.

172. Lampitt RS, Achterberg EP, Anderson TR, Hughes JA, Iglesias-Rodriguez MD, Kelly-Gerrey BA, et al. Ocean fertilization: a potential means of geoengineering? 2008 [cited 2023 mars]. 3919-45]. Available from: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsta.2008.0139>.
173. Williamson P, Wallace DW, Law CS, Boyd PW, Collos Y, Croot P, et al. Ocean fertilization for geoengineering: a review of effectiveness, environmental impacts and emerging governance. *Process Safety and Environmental Protection*. 2012;90(6):475-88.
174. Rickels W, Rehdanz K, Oschlies A. Economic prospects of ocean iron fertilization in an international carbon market. *Resource and Energy Economics*. 2012;34(1):129-50.
175. Harrison DP. A method for estimating the cost to sequester carbon dioxide by delivering iron to the ocean. *International Journal of Global Warming*. 2013;5(3):231-54.
176. Gadikota G. Carbon mineralization pathways for carbon capture, storage and utilization. *Communications Chemistry*. 2021;4(1):23.
177. Matter JM, Stute M, Snæbjörnsdóttir SÓ, Oelkers EH, Gislason SR, Aradóttir ES, et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*. 2016;352(6291):1312-4.
178. Carbfix. Direct Air Capture: Climeworks; 2021 [25.04.2023]. Available from: <https://www.carbfix.com/direct-air-capture>.
179. Dipple G, Kelemen P, Woodall CM, Renforth P, Kolosz B, Paustian K, et al. The Building Blocks of CDR Systems. *CDR Primer*. 2021.
180. Mørk M, Post-Melbye AM. CO<sub>2</sub>-fjerning - Løsningen som tar oss til null 2022 [Available from: [https://zero.no/wp-content/uploads/2022/10/Co2\\_fjerning\\_rapport\\_1414.pdf](https://zero.no/wp-content/uploads/2022/10/Co2_fjerning_rapport_1414.pdf)].
181. de Lannoy C-F, Eisaman MD, Jose A, Karnitz SD, DeVaul RW, Hannun K, et al. Indirect ocean capture of atmospheric CO<sub>2</sub>: Part I. Prototype of a negative emissions technology. *International journal of greenhouse gas control*. 2018;70:243-53.
182. Eisaman MD, Rivest JLB, Karnitz SD, de Lannoy C-F, Jose A, DeVaul RW, et al. Indirect ocean capture of atmospheric CO<sub>2</sub>: Part II. Understanding the cost of negative emissions. *International journal of greenhouse gas control*. 2018;70:254-61.
183. Yang F, Huang J, Zheng X, Huo W, Zhou C, Wang Y, et al. Evaluation of carbon sink in the Taklimakan Desert based on correction of abnormal negative CO<sub>2</sub> flux of IRGASON. *Science of the Total Environment*. 2022;838:155988.
184. Opinion. 7 Ways Nanotechnology Could Combat Climate Change. The World Nano Foundation. 2017.

185. Khullar B. Nanomaterials Could Combat Climate Change and Reduce Pollution. Scientific American. 2017.
186. Wintershall DEA. The future need roots: Wintershall DEA; 2023 [Available from: <https://wintershalldea.com/en/who-we-are/history>].
187. Wintershall DEA. Sustainability report 2022: Energy in transition: Wintershall DEA; 2022 [Available from: [https://wintershalldea.com/sites/default/files/media/files/230327\\_WD\\_SR2022\\_EN\\_Interaktiv.pdf](https://wintershalldea.com/sites/default/files/media/files/230327_WD_SR2022_EN_Interaktiv.pdf)].
188. Wintershall DEA. PRODUCTION ENSURING EUROPE'S ENERGY SUPPLY: Wintershall DEA; 2023 [Available from: <https://wintershalldea.no/en/where-we-are/production>].
189. Wintershall Dea. Wintershall Dea tildelt sin andre CO2-Lagringslisens i Nordsjøen Kassel, Stavanger: Wintershall Dea; 2023 [Available from: <https://wintershalldea.no/nb/newsroom/pi-23-08>].
190. Wintershall Dea. Wintershall Dea initierer første CO2-Lagring utenfor kysten av Danmark Esbjerg: Wintershall Dea; 2023 [Available from: <https://wintershalldea.no/nb/newsroom/pi-23-05>].
191. Norske Shell - Siden 1912 2022 [Available from: <https://www.shell.no/about-us/who-we-are.html>].
192. Petroleum N. A/S NORSKE SHELL [Available from: <https://www.norskpetroleum.no/fakta/selskap-utvinningstillatelse/as-norske-shell/>].
193. Responsible energy. Shell plc; 2022.
194. Responsible Energy 2020 [Available from: <https://reports.shell.com/sustainability-report/2020/servicepages/downloads/files/shell-sustainability-report-2020.pdf>].
195. Shell. GO-AHEAD FOR THE NORTHERN LIGHTS PROJECT 2020 [Available from: <https://www.shell.no/presserom/nyhetsoversikt-artikler-og-nyhetsarkiv/2020/go-ahead-for-the-northern-lights-project-english.html#>].
196. NVE. Elektrifisering av Ormen Lange fase 3 2021 [Available from: <https://webfileservice.nve.no/API/PublishedFiles/Download/2a5b1a05-8aaa-4a2e-8c79-d313707385e8/202015123/3423955>].
197. Oljedirektoratet. Gyda 2023 [Available from: <https://factpages.npd.no/nb-no/field/pageview/all/43492>].
198. Repsol. 2023 Sustainability Plan. 2023.
199. Repsol. Sustainability Plan 2022. 2022.

200. Proff. Neptune Energy Norge AS: Proff; [Available from: <https://www.proff.no/selskap/neptune-energy-norge-as/sandnes/olje-og-gass/IG9I8OH0VFQ/>].
201. Neptune Energy. Our ESG strategy: Neptune Energy; 2023 [Available from: <https://www.neptuneenergy.com/esg/strategy#beyond-net-zero>].
202. Neptune Energy. L10 Area CCS development, Dutch North Sea: Neptune Energy; 2023 [Available from: <https://www.neptuneenergy.com/esg/l10-area-ccs-development>].
203. Neptune Energy. Neptune Energy announces aim to store more carbon than it emits by 2030: Neptune Energy; 2022 [Available from: <https://www.neptuneenergy.com/media/press-releases/year/2022/neptune-announces-aim-store-more-carbon-it-emits-2030>].
204. TotalEnergies. TotalEnergies in Norway: TotalEnergies; 2023 [30.04.2023]. Available from: <https://corporate.totalenergies.no/>.
205. TotalEnergies EP Norge AS. Board of Directors' Report 2021 2021 [30.04.2023]. Available from: [https://corporate.totalenergies.no/system/files/atoms/files/20220519\\_final\\_tepn\\_board\\_of\\_directors\\_report\\_and\\_accounts\\_2021.pdf](https://corporate.totalenergies.no/system/files/atoms/files/20220519_final_tepn_board_of_directors_report_and_accounts_2021.pdf).
206. TotalEnergies. Sustainability & Climate 2022 Progress Report 2022 [30.04.2023]. Available from: [https://totalenergies.com/sites/g/files/nytnzq121/files/documents/2022-05/Sustainability\\_Climate\\_2022\\_Progress\\_Report\\_accessible\\_version\\_EN.pdf](https://totalenergies.com/sites/g/files/nytnzq121/files/documents/2022-05/Sustainability_Climate_2022_Progress_Report_accessible_version_EN.pdf).
207. Sval Energi AS. Sustainability Report 2022 2022 [30.04.2023]. Available from: <https://sval-energi.no/esg/>.
208. Rolstadås A, Johansen A, Olsson N, Langlo JA. Praktisk prosjektledelse: fra idé til gevinst: Fagbokforlaget; 2020.

## Vedleggsliste

A: Tabeller og utregning for AHP

## Tabeller og utregning for AHP

Tabell 9: Parvis sammenligning av kriterier for AHP.

	Kostnad	Potensial	Politikk	Utfordringer	Positive bieffekter	Tilgjengelighet	Varighet	Utviklingsstadium	Grønnvaskingsrisiko	Fremtidsperspektiv
Kostnad	1	6	2	6	7	2	3	3	3	4
Potensial	1/6	1	1/5	1	2	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3
Politikk	1/2	5	1	5	6	1	2	2	2	3
Utfordringer	1/6	1	1/5	1	2	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3
Positive bieffekter	1/7	1/2	1/6	1/2	1	1/6	1/5	1/5	1/5	1/4
Tilgjengelighet	1/2	5	1	5	6	1	2	2	2	3
Varighet	1/3	4	1/2	4	5	1/2	1	1	1	2
Utviklingsstadium	1/3	4	1/2	4	5	1/2	2	1	1	2
Grønnvaskingsrisiko	1/3	4	1/2	4	5	1/2	2	2	1	2
Fremtidsperspektiv	1/4	3	1/3	3	4	1/3	1/2	1/2	1/2	1
<b>Sum</b>	<b>3,73</b>	<b>33,50</b>	<b>6,40</b>	<b>33,50</b>	<b>43,00</b>	<b>6,40</b>	<b>13,20</b>	<b>12,20</b>	<b>11,20</b>	<b>17,92</b>

Tabell 10: Normalisert matrise av Tabell 9, samt tilhørende prioritetsvektor for kriterier i metoden AHP

	Kostnad	Potensial	Politikk	Utfordringer	Positive bieffekter	Tilgjengelighet	Varighet	Utviklingsstadium	Grønnvaskingsrisiko	Fremtidsperspektiv	SUM	Prioritetsvektor
Kostnad	0,27	0,18	0,31	0,18	0,16	0,31	0,23	0,25	0,27	0,22	2,38	23,8%
Potensial	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,29	2,9%
Politikk	0,13	0,15	0,16	0,15	0,14	0,16	0,15	0,16	0,18	0,17	1,55	15,5%
Utfordringer	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,29	2,9%
Positive bieffekter	0,04	0,01	0,03	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,21	2,1%
Tilgjengelighet	0,13	0,15	0,16	0,15	0,14	0,16	0,15	0,16	0,18	0,17	1,55	15,5%
Varighet	0,09	0,12	0,08	0,12	0,12	0,08	0,08	0,08	0,09	0,11	0,96	9,6%
Utviklingsstadium	0,09	0,12	0,08	0,12	0,12	0,08	0,15	0,08	0,09	0,11	1,04	10,4%
Grønnvaskingsrisiko	0,09	0,12	0,08	0,12	0,12	0,08	0,15	0,16	0,09	0,11	1,12	11,2%
Fremtidsperspektiv	0,07	0,09	0,05	0,09	0,09	0,05	0,04	0,04	0,04	0,11	0,68	6,8%
											Sum	100,6%

Tabell 11-20: Parvis sammenligning av alternativer basert på ulike kriterier i AHP.

Tabell 11:

Kostnad	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavslagring	Skogbruk	Biokull	Karbonlandbruk	CCS	DACCS	Mineralisering	BECCS
Hav-gjødsling	1	1/5	1/6	1/6	1/3	1/5	1/3	4	4	1
Blue carbon	5	1	1/2	1/2	3	1	3	8	8	5
Dyphavslagring	6	2	1	1	4	2	4	9	9	6
Skogbruk	6	2	1	1	4	2	4	9	9	6
Biokull	3	1/3	1/4	1/4	1	1/3	1	6	6	3
Karbonlandbruk	5	1	1/2	1/2	3	1	3	8	8	5
CCS	3	1/3	1/4	1/4	1	1/3	1	6	6	3
DACCS	1/4	1/8	1/9	1/9	1/6	1/8	1/6	1	1	1/4
Mineralisering	1/4	1/8	1/9	1/9	1/6	1/8	1/6	1	1	1/4
BECCS	1	1/5	1/6	1/6	1/3	1/5	1/3	4	4	1
<b>Sum</b>	<b>30,50</b>	<b>7,32</b>	<b>4,06</b>	<b>4,06</b>	<b>17,00</b>	<b>7,32</b>	<b>17,00</b>	<b>56,00</b>	<b>56,00</b>	<b>30,50</b>

Tabell 12:

Potensial	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavs-lagring	Skogbruk	Biokull	Karbonlandbruk	CCS	DACCS	Mineralisering	BECCS
Hav-gjødsling	1	1/5	1	1/3	1/2	1/4	1/9	1/8	1/3	1/5
Blue carbon	5	1	5	3	4	2	1/5	1/4	3	1
Dyphavslagring	1	1/5	1	1/3	1/2	1/4	1/9	1/8	1/3	1/5
Skogbruk	3	1/3	3	1	2	1/2	1/7	1/6	1	1/3
Biokull	2	1/4	2	1/2	1	1/3	1/8	1/7	1/2	1/4
Karbonlandbruk	4	1/2	4	2	3	1	1/6	1/5	2	1/2
CCS	9	5	9	7	8	6	1	2	7	5
DACCS	8	4	8	6	7	5	1/2	1	6	4
Mineralisering	3	1/3	3	1	2	1/2	1/7	1/6	1	1/3
BECCS	5	1	5	3	4	2	1/5	1/4	3	1
<b>Sum</b>	<b>41,00</b>	<b>12,82</b>	<b>41,00</b>	<b>24,17</b>	<b>32,00</b>	<b>17,83</b>	<b>2,70</b>	<b>4,43</b>	<b>24,17</b>	<b>12,82</b>

Tabell 13:

Politikk	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavs-lagring	Skogbruk	Biokull	Karbonlandbruk	CCS	DACCS	Mineralisering	BECCS
Hav-gjødsling	1	1/6	2	1/6	1/4	1/5	1/8	1/5	1/5	1/5
Blue carbon	6	1	7	1	3	2	1/3	2	2	2
Dyphavslagring	1/2	1/7	1	1/7	1/5	1/6	1/9	1/6	1/6	1/6
Skogbruk	6	1	7	1	3	2	1/3	2	2	2
Biokull	4	1/3	5	1/3	1	1/2	1/5	1/2	1/2	1/2
Karbonlandbruk	5	1/2	6	1/2	2	1	1/4	1	1	1
CCS	8	3	9	3	5	4	1	4	4	1/4
DACCS	5	1/2	6	1/2	2	1	1/4	1	1	1
Mineralisering	5	1/2	6	1/2	2	1	1/4	1	1	1
BECCS	5	1/2	6	1/2	2	1	1/4	1	1	1
<b>Sum</b>	<b>45,50</b>	<b>7,64</b>	<b>55,00</b>	<b>7,64</b>	<b>20,45</b>	<b>12,87</b>	<b>3,10</b>	<b>12,87</b>	<b>12,87</b>	<b>9,12</b>

Tabell 14:

Utfordringer	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavs-lagring	Skogbruk	Biokull	Karbonlandbruk	CCS	DACCS	Mineralisering	BECCS
Hav-gjødsling	1	1/7	1/3	1/7	1/7	1/6	1/7	1/3	1/6	1/7
Blue carbon	7	1	5	1	1	2	1	5	2	1
Dyphavslagring	3	1/5	1	1/5	1/5	1/4	1/5	1	1/4	1/5
Skogbruk	7	1	5	1	1	2	1	5	2	1
Biokull	7	1	5	1	1	2	1	5	2	1
Karbonlandbruk	6	1/2	4	1/2	1/2	1	1/2	1/4	1	1/2
CCS	7	1	5	1	1	2	1	5	2	1
DACCS	3	1/5	1	1/5	1/5	4	1/5	1	1/4	1/5
Mineralisering	6	1/2	4	1/2	1/2	1	1/2	4	1	1/2
BECCS	7	1	5	1	1	2	1	5	2	1
<b>Sum</b>	<b>54,00</b>	<b>6,54</b>	<b>35,33</b>	<b>6,54</b>	<b>6,54</b>	<b>16,42</b>	<b>6,54</b>	<b>31,58</b>	<b>12,67</b>	<b>6,54</b>

Tabell 15:

Positive biefekter	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavslagring	Skogbruk	Biokull	Karbonlandbruk	CCS	DACCS	Mineralisering	BECCS
Havgjødsling	1	1/7	1	1/7	1/5	1/5	1	1/4	1/3	1/5
Blue carbon	7	1	7	1	3	3	7	4	5	3
Dyphavslagring	1	1/7	1	1/7	1/5	1/5	1	1/4	3	1/5
Skogbruk	7	1	7	1	3	3	7	4	5	3
Biokull	5	1/3	5	1/3	1	1	5	2	3	1
Karbonlandbruk	5	1/3	5	1/3	1	1	5	2	3	1
CCS	1	1/7	1	1/7	1/5	1/5	1	1/4	1/3	1/5
DACCS	4	1/4	4	1/4	1/2	1/2	4	1	2	1/2
Mineralisering	3	1/5	3	1/5	1/3	1/3	3	1/2	1	1/3
BECCS	5	1/3	5	1/3	1	1	5	2	3	1
<b>Sum</b>	<b>39,00</b>	<b>3,88</b>	<b>39,00</b>	<b>3,88</b>	<b>10,43</b>	<b>10,43</b>	<b>39,00</b>	<b>16,25</b>	<b>25,67</b>	<b>10,43</b>

Tabell 16:

Tilgjengelighet	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavslagring	Skogbruk	Biokull	Karbonlandbruk	CCS	DACCS	Mineralisering	BECCS
Havgjødsling	1	1/2	1	1/9	1/9	1/7	1/7	1	1	1/3
Blue carbon	2	1	2	1/8	1/8	1/6	1/6	1	1	1/2
Dyphavslagring	1	1/2	1	1/9	1/9	1/7	1/7	1	1	1/3
Skogbruk	9	8	9	1	1	3	3	9	9	7
Biokull	9	8	9	1	1	3	3	9	9	7
Karbonlandbruk	7	6	7	1/3	1/3	1	1	7	7	1/5
CCS	7	6	7	1/3	1/3	1	1	7	7	1/5
DACCS	1	1	1	1/9	1/9	1/7	1/7	1	1	1/3
Mineralisering	1	1	1	1/9	1/9	1/7	1/7	1	1	1/3
BECCS	3	2	3	1/7	1/7	5	5	3	3	1
<b>Sum</b>	<b>41,00</b>	<b>34,00</b>	<b>41,00</b>	<b>3,38</b>	<b>3,38</b>	<b>13,74</b>	<b>13,74</b>	<b>40,00</b>	<b>40,00</b>	<b>17,23</b>

Tabell 17:

Varighet	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavslagring	Skogbruk	Biokull	Karbonlandbruk	CCS	DACCS	Mineralisering	BECCS
Havgjødsling	1	1	1/5	1	2	1	1/5	1/5	1/5	1/5
Blue carbon	1	1	1/5	1	2	1	1/5	1/5	1/5	1/5
Dyphavslagring	5	5	1	5	7	5	1	1	1	1
Skogbruk	1	1	1/5	1	2	1	1/5	1/5	1/5	1/5
Biokull	1/2	1/2	1/7	1/2	1	1/2	1/7	1/7	1/7	1/7
Karbonlandbruk	1	1	1/5	1	2	1	1/5	1/5	1/5	1/5
CCS	5	5	1	5	7	5	1	1	1	1
DACCS	5	5	1	5	7	5	1	1	1	1
Mineralisering	5	5	1	5	7	5	1	1	1	1
BECCS	5	5	1	5	7	5	1	1	1	1
<b>Sum</b>	<b>29,50</b>	<b>29,50</b>	<b>5,94</b>	<b>29,50</b>	<b>44,00</b>	<b>29,50</b>	<b>5,94</b>	<b>5,94</b>	<b>5,94</b>	<b>5,94</b>



Tabell 18:

Utviklings- stadium	Hav- gjødsling	Blue carbon	Dyphavs- lagring	Skog- bruk	Biokull	Karbon- landbruk	CCS	DACCS	Mineral- isering	BECCS
Havgjødsling	1	1/2	1	1/8	1/7	1/9	1/6	1/7	1/3	1/6
Blue carbon	2	1	3	1/7	1/6	1/7	1/4	1/6	1/2	1/5
Dyphavslagring	1	1/3	1	1/9	1/7	1/9	1/7	1/7	1/3	1/6
Skogbruk	8	7	9	1	3	1	2	3	5	4
Biokull	7	6	7	1/3	1	1/3	1/2	1	3	2
Karbonlandbruk	9	7	9	1	3	1	2	3	6	4
CCS	6	4	7	1/2	2	1/2	1	2	4	3
DACCS	7	6	7	1/3	1	1/3	1/2	1	3	2
Mineralisering	3	2	3	1/5	1/3	1/6	1/4	1/3	1	1/3
BECCS	6	5	6	1/4	1/2	1/4	1/3	2	3	1
<b>Sum</b>	<b>50,00</b>	<b>38,83</b>	<b>53,00</b>	<b>4,00</b>	<b>11,29</b>	<b>3,95</b>	<b>7,14</b>	<b>12,79</b>	<b>26,17</b>	<b>16,87</b>

Tabell 19:

Grønnvaskings- risiko	Hav- gjødsling	Blue carbon	Dyphavs- lagring	Skog- bruk	Biokull	Karbon- landbruk	CCS	DACCS	Mineral- isering	BECCS
Havgjødsling	1	1/3	1/2	1/3	1/6	1/3	1/9	1/9	1/7	1/6
Blue carbon	3	1	2	1	1/4	1	1/7	1/7	1/5	1/4
Dyphavslagring	2	1/2	1	1/2	1/5	1/2	1/8	1/8	1/6	1/5
Skogbruk	3	1	2	1	1/4	1	1/7	1/7	1/5	1/4
Biokull	6	4	5	4	1	4	1/4	1/4	1/2	1
Karbonlandbruk	3	1	2	1	1/4	1	1/7	1/7	1/5	1/4
CCS	9	7	8	7	4	7	1	1	3	4
DACCS	9	7	8	7	4	7	1	1	3	4
Mineralisering	7	5	6	5	2	5	1/3	1/3	1	2
BECCS	6	4	5	4	1	4	1/4	1/4	1/2	1
<b>Sum</b>	<b>49,00</b>	<b>30,83</b>	<b>39,50</b>	<b>30,83</b>	<b>13,12</b>	<b>30,83</b>	<b>3,50</b>	<b>3,50</b>	<b>8,91</b>	<b>13,12</b>

Tabell 20:

Fremtids- perspektiv	Hav- gjødsling	Blue carbon	Dyphavs- lagring	Skog- bruk	Biokull	Karbon- landbruk	CCS	DACCS	Mineral- isering	BECCS
Havgjødsling	1	1/4	1/2	1/5	1/6	1/6	1/9	1/8	1/4	1/7
Blue carbon	4	1	3	1/2	1/3	1/3	1/6	1/5	1	1/4
Dyphavslagring	2	1/3	1	1/4	1/5	1/5	1/8	1/7	1/3	1/6
Skogbruk	5	2	4	1	1/2	1/2	1/5	1/4	2	1/3
Biokull	6	3	5	2	1	1	1/4	1/3	3	1/2
Karbonlandbruk	6	3	5	2	1	1	1/4	1/3	3	1/2
CCS	9	6	8	5	4	4	1	2	6	3
DACCS	8	5	7	4	3	3	1/2	1	5	2
Mineralisering	4	1	3	1/2	1/3	1/3	1/6	1/5	1	1/4
BECCS	7	4	6	3	2	2	1/3	1/2	4	1
<b>Sum</b>	<b>52,00</b>	<b>25,58</b>	<b>42,50</b>	<b>18,45</b>	<b>12,53</b>	<b>12,53</b>	<b>3,10</b>	<b>5,08</b>	<b>25,58</b>	<b>8,14</b>

Tabell 21-30: Normaliserte matriser av Tabell 11-20 med beregnet prioritet av alternativene.

Tabell 21:

Kostnad	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavs-lagring	Skog- bruk	Biokull	Karbon-landbruk	CCS	DACCS	Mineral-isering	BECCS	Sum	Prioritet
Hav-gjødsling	0,03	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03	0,02	0,07	0,07	0,03	0,38	0,038
Blue carbon	0,16	0,14	0,12	0,12	0,18	0,14	0,18	0,14	0,14	0,16	1,49	0,149
Dyphavslagring	0,20	0,27	0,25	0,25	0,24	0,27	0,24	0,16	0,16	0,20	2,23	0,223
Skogbruk	0,20	0,27	0,25	0,25	0,24	0,27	0,24	0,16	0,16	0,20	2,23	0,223
Biokull	0,10	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,11	0,11	0,10	0,74	0,074
Karbonlandbruk	0,16	0,14	0,12	0,12	0,18	0,14	0,18	0,14	0,14	0,16	1,49	0,149
CCS	0,10	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,11	0,11	0,10	0,74	0,074
DACCS	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,16	0,016
Mineralisering	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,16	0,016
BECCS	0,03	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03	0,02	0,07	0,07	0,03	0,38	0,038

Tabell 22:

Potensial	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavs-lagring	Skog- bruk	Biokull	Karbon-landbruk	CCS	DACCS	Mineral-isering	BECCS	Sum	Prioritet
Hav-gjødsling	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,03	0,01	0,02	0,21	0,021
Blue carbon	0,12	0,08	0,12	0,12	0,13	0,11	0,07	0,06	0,12	0,08	1,02	0,102
Dyphavslagring	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,03	0,01	0,02	0,21	0,021
Skogbruk	0,07	0,03	0,07	0,04	0,06	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03	0,46	0,046
Biokull	0,05	0,02	0,05	0,02	0,03	0,02	0,05	0,03	0,02	0,02	0,31	0,031
Karbonlandbruk	0,10	0,04	0,10	0,08	0,09	0,06	0,06	0,05	0,08	0,04	0,70	0,070
CCS	0,22	0,39	0,22	0,29	0,25	0,34	0,37	0,45	0,29	0,39	3,21	0,321
DACCS	0,20	0,31	0,20	0,25	0,22	0,28	0,19	0,23	0,25	0,31	2,42	0,242
Mineralisering	0,07	0,03	0,07	0,04	0,06	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03	0,46	0,046
BECCS	0,12	0,08	0,12	0,12	0,13	0,11	0,07	0,06	0,12	0,08	1,02	0,102

Tabell 23:

Politikk	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavs-lagring	Skog- bruk	Biokull	Karbon-landbruk	CCS	DACCS	Mineral-isering	BECCS	Sum	Prioritet
Havgjødsling	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,22	0,022
Blue carbon	0,13	0,13	0,13	0,13	0,15	0,16	0,11	0,16	0,16	0,22	1,46	0,146
Dyphavslagring	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,02	0,17	0,017
Skogbruk	0,13	0,13	0,13	0,13	0,15	0,16	0,11	0,16	0,16	0,22	1,46	0,146
Biokull	0,09	0,04	0,09	0,04	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,05	0,55	0,055
Karbonlandbruk	0,11	0,07	0,11	0,07	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,11	0,87	0,087
CCS	0,18	0,39	0,16	0,39	0,24	0,31	0,32	0,31	0,31	0,03	2,65	0,265
DACCS	0,11	0,07	0,11	0,07	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,11	0,87	0,087
Mineralisering	0,11	0,07	0,11	0,07	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,11	0,87	0,087
BECCS	0,11	0,07	0,11	0,07	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,11	0,87	0,087

Tabell 24:

Utfordringer	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavs-lagring	Skog-bruk	Biokull	Karbon-landbruk	CCS	DACCS	Mineral-isering	BECCS	Sum	Prioritet
Havgjødsling	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,17	0,017
Blue carbon	0,13	0,15	0,14	0,15	0,15	0,12	0,15	0,16	0,16	0,15	1,47	0,147
Dyphavslagring	0,06	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,30	0,030
Skogbruk	0,13	0,15	0,14	0,15	0,15	0,12	0,15	0,16	0,16	0,15	1,47	0,147
Biokull	0,13	0,15	0,14	0,15	0,15	0,12	0,15	0,16	0,16	0,15	1,47	0,147
Karbonlandbruk	0,11	0,08	0,11	0,08	0,08	0,06	0,08	0,01	0,08	0,08	0,75	0,075
CCS	0,13	0,15	0,14	0,15	0,15	0,12	0,15	0,16	0,16	0,15	1,47	0,147
DACCS	0,06	0,03	0,03	0,03	0,03	0,24	0,03	0,03	0,02	0,03	0,53	0,053
Mineralisering	0,11	0,08	0,11	0,08	0,08	0,06	0,08	0,13	0,08	0,08	0,87	0,087
BECCS	0,13	0,15	0,14	0,15	0,15	0,12	0,15	0,16	0,16	0,15	1,47	0,147

Tabell 25:

Positive bieffekter	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavs-lagring	Skog-bruk	Biokull	Karbon-landbruk	CCS	DACCS	Mineral-isering	BECCS	Sum	Prioritet
Havgjødsling	0,03	0,04	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,24	0,024
Blue carbon	0,18	0,26	0,18	0,26	0,29	0,29	0,18	0,25	0,19	0,29	2,36	0,236
Dyphavslagring	0,03	0,04	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,12	0,02	0,34	0,034
Skogbruk	0,18	0,26	0,18	0,26	0,29	0,29	0,18	0,25	0,19	0,29	2,36	0,236
Biokull	0,13	0,09	0,13	0,09	0,10	0,10	0,13	0,12	0,12	0,10	1,08	0,108
Karbonlandbruk	0,13	0,09	0,13	0,09	0,10	0,10	0,13	0,12	0,12	0,10	1,08	0,108
CCS	0,03	0,04	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,24	0,024
DACCS	0,10	0,06	0,10	0,06	0,05	0,05	0,10	0,06	0,08	0,05	0,72	0,072
Mineralisering	0,08	0,05	0,08	0,05	0,03	0,03	0,08	0,03	0,04	0,03	0,50	0,050
BECCS	0,13	0,09	0,13	0,09	0,10	0,10	0,13	0,12	0,12	0,10	1,08	0,108

Tabell 26:

Tilgjengelighet	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavsl-agring	Skog-bruk	Biokull	Karbon-landbruk	CCS	DACCS	Mineral-isering	BECCS	Sum	Prioritet
Havgjødsling	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,22	0,022
Blue carbon	0,05	0,03	0,05	0,04	0,04	0,01	0,01	0,03	0,03	0,03	0,30	0,030
Dyphavslagring	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,22	0,022
Skogbruk	0,22	0,24	0,22	0,30	0,30	0,22	0,22	0,23	0,23	0,41	2,56	0,256
Biokull	0,22	0,24	0,22	0,30	0,30	0,22	0,22	0,23	0,23	0,41	2,56	0,256
Karbonlandbruk	0,17	0,18	0,17	0,10	0,10	0,07	0,07	0,18	0,18	0,01	1,22	0,122
CCS	0,17	0,18	0,17	0,10	0,10	0,07	0,07	0,18	0,18	0,01	1,22	0,122
DACCS	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,23	0,023
Mineralisering	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,23	0,023
BECCS	0,07	0,06	0,07	0,04	0,04	0,36	0,36	0,08	0,08	0,06	1,23	0,123

Tabell 27:

Varighet	Hav-gjødsling	Blue carbon	Dyphavs-lagring	Skog-bruk	Biokull	Karbon-landbruk	CCS	DACCS	Mineral-isering	BECCS	Sum	Prioritet
Havgjødsling	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,35	0,035
Blue carbon	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,35	0,035
Dyphavslagring	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	1,68	0,168
Skogbruk	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,35	0,035
Biokull	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,21	0,021
Karbonlandbruk	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,35	0,035
CCS	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	1,68	0,168
DACCS	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	1,68	0,168
Mineralisering	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	1,68	0,168
BECCS	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	1,68	0,168

Tabell 28:

Utviklings- stadium	Hav- gjødsling	Blue carbon	Dyphavs- lagring	Skog- bruk	Biokull	Karbon- landbruk	CCS	DACCS	Mineral- isering	BECCS	Sum	Prioritet
Havgjødsling	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,18	0,018
Blue carbon	0,04	0,03	0,06	0,04	0,01	0,04	0,04	0,01	0,02	0,01	0,29	0,029
Dyphavslagring	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,17	0,017
Skogbruk	0,16	0,18	0,17	0,25	0,27	0,25	0,28	0,23	0,19	0,24	2,22	0,222
Biokull	0,14	0,15	0,13	0,08	0,09	0,08	0,07	0,08	0,11	0,12	1,06	0,106
Karbonlandbruk	0,18	0,18	0,17	0,25	0,27	0,25	0,28	0,23	0,23	0,24	2,28	0,228
CCS	0,12	0,10	0,13	0,13	0,18	0,13	0,14	0,16	0,15	0,18	1,41	0,141
DACCS	0,14	0,15	0,13	0,08	0,09	0,08	0,07	0,08	0,11	0,12	1,06	0,106
Mineralisering	0,06	0,05	0,06	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,02	0,41	0,041
BECCS	0,12	0,13	0,11	0,06	0,04	0,06	0,05	0,16	0,11	0,06	0,91	0,091

Tabell 29:

Grønnvaskings- risiko	Hav- gjødsling	Blue carbon	Dyphavs- lagring	Skog- bruk	Biokull	Karbon- landbruk	CCS	DACCS	Mineral- isering	BECCS	Sum	Prioritet
Havgjødsling	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01	0,17	0,017
Blue carbon	0,06	0,03	0,05	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02	0,35	0,035
Dyphavslagring	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,02	0,02	0,24	0,024
Skogbruk	0,06	0,03	0,05	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02	0,35	0,035
Biokull	0,12	0,13	0,13	0,13	0,08	0,13	0,07	0,07	0,06	0,08	0,99	0,099
Karbonlandbruk	0,06	0,03	0,05	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02	0,35	0,035
CCS	0,18	0,23	0,20	0,23	0,30	0,23	0,29	0,29	0,34	0,30	2,59	0,259
DACCS	0,18	0,23	0,20	0,23	0,30	0,23	0,29	0,29	0,34	0,30	2,59	0,259
Mineralisering	0,14	0,16	0,15	0,16	0,15	0,16	0,10	0,10	0,11	0,15	1,39	0,139
BECCS	0,12	0,13	0,13	0,13	0,08	0,13	0,07	0,07	0,06	0,08	0,99	0,099

Tabell 30:

Fremtids- perspektiv	Hav- gjødsling	Blue carbon	Dyphavs- lagring	Skog- bruk	Biokull	Karbon- landbruk	CCS	DACCS	Mineral- isering	BECCS	Sum	Prioritet
Havgjødsling	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,02	0,17	0,017
Blue carbon	0,08	0,04	0,07	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03	0,43	0,043
Dyphavslagring	0,04	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,04	0,03	0,01	0,02	0,22	0,022
Skogbruk	0,10	0,08	0,09	0,05	0,04	0,04	0,06	0,05	0,08	0,04	0,64	0,064
Biokull	0,12	0,12	0,12	0,11	0,08	0,08	0,08	0,07	0,12	0,06	0,94	0,094
Karbonlandbruk	0,12	0,12	0,12	0,11	0,08	0,08	0,08	0,07	0,12	0,06	0,94	0,094
CCS	0,17	0,23	0,19	0,27	0,32	0,32	0,32	0,39	0,23	0,37	2,82	0,282
DACCS	0,15	0,20	0,16	0,22	0,24	0,24	0,16	0,20	0,20	0,25	2,01	0,201
Mineralisering	0,08	0,04	0,07	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03	0,43	0,043
BECCS	0,13	0,16	0,14	0,16	0,16	0,16	0,11	0,10	0,16	0,12	1,40	0,140

Tabell 31: Beregning av total prioritet av alternativene og deres rangering.

Alternativ	Prioritet	Plassering
Havgjødsling	0,0258	10
Blue carbon	0,0880	7
Dyphavslagring	0,0831	8
Skogbruk	0,1602	2
Biokull	0,1037	4
Karbonlandbruk	0,1115	3
CCS	0,1706	1
DACCS	0,1007	5
Mineralisering	0,0646	9
BECCS	0,0972	6
<b>Sum</b>	<b>1,0</b>	

