

CO₂ PÜÜDMISE TEHNOLOOGIA KASUTUSELEVÕTU TEEKAART

Uuringuaruanne

Oktoober 2025

Uuringu tellija: Kliimaministeerium

Uuringu autorid:

- **Alar Konist**, täisprofessor tenuuris, Energiatehnoloogia instituudi direktor, Jätkusuutliku energeetika ja kütuste uurimisrühma juht, Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika programmijuht
- **Oliver Järvik**, kaasprofessor tenuuris, Kütuse ja õhuemissioonide analüüsi teadus- ja katselabori juht, Keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia programmijuht
- **Dmitri Nešumajev**, vanemteadur Jätkusuutliku energeetika ja kütuste uurimisrühmas
- **Janika Laht**, doktorant-nooremteadur uurimisrühmas „Nutikad kaugküttelehendused ja kasvuhoonegaaside emissioonide keskkonnamõju integreeritud hindamine“
- **Mari-Liis Ummik**, doktorant-nooremteadur uurimisrühmas „Jätkusuutlik energeetika ja kütused“

Tallinna Tehnikaülikool

Telefon: 620 2002

E-post: info@taltech.ee

Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn



Rahastanud Euroopa Liit
NextGenerationEU



Eesti
tuleviku heaks

SISUKORD

Lühendid	3
Kokkuvõte	5
Sissejuhatus	11
Metoodika	12
1. CCUS võimalused ja väljakutsed	14
1.1. CO ₂ püüdmine	14
1.2. CO ₂ transport	17
1.3. CO ₂ ladustamine	23
1.4. CO ₂ kasutamine	24
2. CO ₂ püüdmise regulatsioon	26
2.1. EL heitkoguse ühikutega kauplemise süsteem	30
2.2. CCS direktiiv	31
3. CCUS äriline perspektiiv	33
4. CCUS teekaart aastani 2035	44
Summary	48
Kasutatud kirjandus	53

LÜHENDID

Lühend	Selgitus
BECCS	Bioenergia tootmisel tekkiva süsinikdioksiidi püüdmine ja jäädav ladustamine, inglise keeles <i>Bioenergy with Carbon Capture and Storage</i>
BioCCS	Biogeensest allikast pärit CO ₂ püüdmine ja jäädav ladustamine, inglise keeles <i>Biogenic Carbon Capture and Storage</i>
CCS	Süsinikdioksiidi püüdmine ja jäädav ladustamine, inglise keeles <i>Carbon Capture and Storage/Sequestration</i>
CCU	Süsinikdioksiidi püüdmine ja kasutamine, inglise keeles <i>Carbon Capture and Utilization</i>
CCUS	Süsinikdioksiidi püüdmine, kasutamine ja jäädav ladustamine, inglise keeles <i>Carbon Capture, Utilization and Storage/Sequestration</i>
CDR	Süsinikdioksiidi püüdmine õhust eemaldamise teel, sisaldab nii bioloogilist kui tööstuslikku CO ₂ õhtust eemaldamist; inglise keeles <i>Carbon Dioxide Removal</i>
CH₄	Metaan
CO₂	Süsinikdioksiid
DAC	Tööstuslik õhust püüdmine, inglise keeles <i>Direct Air Capture</i>
DACCS	Süsiniku otse õhust püüdmine ja ladustamine, inglise keeles <i>Direct Air Carbon Capture and Storage/Sequestration</i>
EAK	Eesti Akrediteerimiskeskus
EIS	Ettevõtluse ja Innovatsiooni Sihtasutus
EL	Euroopa Liit
EL HKS	Euroopa Liidu heitkogustega kauplemise süsteem
ENMAK	Eesti energiamajanduse arengukava
EOR	Nafta täiendav tootmine, inglise keeles <i>Enhanced Oil Recovery</i>
ESABCC	Euroopa kliimamuutuste teadusnõukogu, inglise keeles <i>European Scientific Advisory Board on Climate Change</i>
ETAG	Eesti Teadusagentuur

Lühend	Selgitus
ETIS	Eesti Teadusinfosüsteem
IPCC	Valitsustevaheline kliimamuutuste rühm, inglise keeles <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
KHG	Kasvuhoonegaas(id), inglise keeles <i>Greenhouse Gas(es)</i>
KIK	Sihtasutus Keskkonnainvesteeringute Keskus
LHÜ	Lubatud heitkoguse ühik, millega kaubeldakse EL HKS-is
LULUCF	Maakasutus, maakasutuse muutus ja metsandus sektor, inglise keeles <i>Land Use, Land Use Change and Forestry</i>
N₂O	Dilämmastikoksiid
OXY	Hapnikus põletamine, inglise keeles <i>Oxyfuel Combustion</i>
PCC	Järelpüüdmine, inglise keeles <i>Post-Combustion Capture</i>
RED	Taastuenergia direktiiv, inglise keeles <i>Renewable Energy Directive</i>
TVT	Tehnoloogia valmidustase, inglise keeles <i>Technology Readiness Level</i>
TTJA	Tarbijakaitse ja Tehnilise Järelevalve Amet
UNCLOS	ÜRO mereõiguse konventsioon, inglise keeles <i>United Nations Convention on the Law of the Sea</i>
ÜRO	Ühinenud Rahvaste Organisatsioon, inglise keeles <i>United Nations Organization</i>

KOKKUVÕTE

Euroopa Liit (EL) on seadnud eesmärgiks vähendada kasvuhoonegaaside (KHG) heitkoguseid 55% aastaks 2030 ja saavutada kliimanetraalsus aastaks 2050. Nende eesmärkide saavutamisel mängivad kesksel rolli innovaatilised tehnoloogiad, sh CO₂ püüdmine ja kasutamine (CCUS), mis aitavad vähendada süsinikuheitmeid ning ühtlasi võimaldavad seda kasutada väärtusliku ressursina. Selle saavutamiseks on välja töötatud mitmeid EL regulatsioone ja muudetud olemasolevaid, Euroopa Komisjon plaanib sellega jätkata ka järgnevatel aastatel nagu võib välja lugeda 2025. aasta veebruaris avalikustatud puhta tööstuse kokkuleppes. 2024. aastal valminud Eesti KHG eelarve uuringus leiti, et ilma täiendava tehnoloogilise CO₂ püüdmise suurendamiseta energeetika- ja tööstussektoris ei ole Eestil võimalik järgida KHG eelarvet, mis võimaldaks jääda Pariisi kokkuleppes seatud 1,5°C temperatuurieesmärgi piiresse. Seega mängivad CCUS tehnoloogiad olulist rolli energeetika- ja tööstussektori, aga ka kogu majanduse kliimanetraalsuse saavutamisel.

Käesolev teekaart keskendubki sellele, kas ja kuidas CO₂ püüdmise ja kasutamise tehnoloogiaid saab rakendada Eestis, sh võttes arvesse siinset keskkonda. CO₂ püüdmise teekaardi koostamise eesmärk on tööstuslike või ka teisiti öelduna tehnoloogiliste CO₂ (ehk lühidalt süsiniku) püüdmise ja jäädava ladustamise (CCS – *Carbon Capture and Storage*) ja kasutamise (CCU – *Carbon Capture and Utilization*) tehnoloogiate kasutuselevõtuks vajalike eelduste väljaselgitamine Eestis kuni aastani 2035. Selline ajaperspektiiv valiti, kuna tehnoloogiad arenevad kiiresti ning seetõttu ei ole võimalik pikema ajahorisondi taha teekaardi tegevuste kontekstis vaadata. Teekaardi aluseks on Kliimaministeeriumi poolt esitatud uuringu lähteülesanne, varasemad CO₂ püüdmise ja kasutamise uuringud, rahvusvaheline teaduskirjandus ning EL-i regulatsioonid. Teekaardi koostamise protsessi kaasati mitmeid ettevõtteid ja eksperte, et tagada teekaardi praktilisus ja rakendatavus.

AKTUAALSUS EESTI KONTEKSTIS

CCUS teema aktuaalsust Eestis näitab asjaolu, et 2023. aastal oli Eesti paiksetes käitistes tekkinud fossiilse CO₂ kogus 5,8 miljonit tonni. Suurimad fossiilse CO₂ punktallikad asuvad peamiselt Kirde-Eestis ja on seotud energia ja põlevkiviõli tootmisega. Enam kui 100 000 tonni aastase heitemahuga allikad (kokku 14 käitist) katavad ligikaudu 79% kogu heitest. Suurimate ja sageli ka lähestikku paiknevate heiteallikate aastane heide võib ületada 0,5 miljonit tonni CO₂, mis omakorda võib vähendada CO₂ kinnipüüdmise ja transpordi maksumust. Nimetatud suurema 9 käitise biogeense CO₂ heitkogused ulatuvad 3,17 miljoni tonnini aastas ehk moodustavad umbes 55% fossiilsest CO₂ heitkogusest. Need on valdavalt koostootmisjaamad. Vähemalt 90 000 tonni CO₂ heitmeid aastas emiteerivad 10 allikat, kokku ca 1,75 mln tonni. Eestis asub ja lähitulevikus tekib ilmselt juurde ka väiksemaid biometaanijaamu, kust saaks biogeenset CO₂ kinni püüda.

Eestis ja EL-is on väljendatud selget soovi loobuda pikas perspektiivis fossiilkütustest (st Eestis kohalikust põlevkivist) ja võtta kasutusele taastuvad energiaallikad. Vaatamata sellele, et biomassi ja põlevkivi koospõletamist võimaldavad energiaplokid on võimalik edukalt varustada CO₂ püüdmise tehnoloogiaga ning mis sellisel juhul tagaksid pideva

elektritootmise baaskoormuse CO₂ negatiivselt, on otsustatud Eesti energiavarustuskindluse seisukohalt küsitaval imporditaval fossiilsel maagaasil töötavate gaasielektrijaamade (kokku kuni 1200 MW, kus maagaasi põletamisel tekiks ca 400 000 tonni CO₂ aastas) rajamise kasuks. Tuleb mõnda, et biogaasi tootmine ja selle kasv Eestis (tootmisperspektiiviga kuni 1 TWh) võib tulevikus mõnevõrra vähendada sõltuvust imporditavast maagaasist. Erinevalt kohalikul prognoositava hinnaga põlevkivil ja biomassil põhinevatest energiablokkidest, ei paku see lahendus energijulgeolekut. Ka biomassi kasutavad koostootmisjaamad on võimalik edukalt varustada CO₂ püüdmise tehnoloogiaga, kuid need ei ole koormatud pidevalt ja seetõttu ei saaks toimida baaskoormuse tagajana. Koostootmisjaamade ebaühtlane koormatus muudab CO₂ kinnipüüdmise tehnoloogiliselt keerulisemaks ja kulukamaks.

Eesti tööstussektoris, kus heitkogused on küll pigem väikesed, kuid kus tootmise jätkamiseks on jätkuvalt vajalik fossiilsete kütuste kasutamine, on CCUS kasutuselevõtt hiljemalt aastaks 2050 ilmselt möödapääsmatu (v.a juhul kui see fossiilne CO₂ heide kompenseeritakse mõnes teises käitises kinni püütud biogeense CO₂-ga, näiteks kohalikes biogaasijaamades). See kõik demonstreerib vajadust analüüsida ja arendada CCUS valdkonda.

CCUS TEHNOLOOGIAD

CCUS on CO₂ püüdmisest, transportimisest, kasutamisest ja ladustamisest koosnev tehnoloogiate ahel, millega on seotud erinevad väljakutsed ja võimalused. Iga nimetatud tehnoloogiline etapp võib tähendada tervikahelas kombinatsiooni erinevatest tehnoloogiatest, mille valikul tuleb lähtuda tehnoloogilistest ja majanduslikest aspektidest.

Arvestades CO₂ püüdmise tehnoloogiate tehnoloogilise valmiduse hetketaset (TVT) ja CO₂ punktallikate iseloomu Eestis, on siin olemasolevates põletusseadmetes kõige perspektiivikamad kasutamiseks protsessijärgse püüdmise tehnoloogiad, eelkõige keemiline absorptsioon ja membraantehnoloogia. Keemiline absorptsioon on CO₂ püüdmise tehnoloogia, mis võimaldab efektiivselt suurte põletusseadmete põlemisgaasidest (nt Auvere elektrijaam, suured koostootmisjaamad) CO₂ eemaldamist ühe tonni püütava CO₂ maksumusega vahemikus 40-120 eurot. Membraantehnoloogia on üldiselt sobivam kasutamiseks nn protsessigaasidest, st Eesti mõistes biometaani tootmisel tekkiva, põlemisgaasidega võrreldes oluliselt kõrgema CO₂ sisaldusega/osarõhuga heitgaasist CO₂ eraldamiseks (CO₂ sisaldus >15 mahu%). Kuna CO₂ püüdmise maksumus on seda madalam, mida kõrgem on CO₂ osarõhk ja suurem püüdesead, siis jääb biogaasi väärindamisel biometaaniks ühe tonni CO₂ püüdmise maksumus Eesti keskmise vastava tootmisüksuse puhul (umbes 5000 t CO₂ aastas) suurusjärku 50 eurot, millest umbes poole moodustab kapitalikulu.

Üldiselt on tehnoloogilised protsessid (sh baaskoormust tagavad elektrijaamad) optimeeritud töötama pidevalt ühtlasel koormusel. Arvestades taastuvenergiaallikate summaarse võimsuse kasvu, muutub järjest olulisemaks CO₂ püüdmise tehnoloogiate võime tulla toime koormuste kõikumisega. Membraantehnoloogia eeliseks keemilise absorptsiooni ees on selle lihtne modulaarseks muutmine (membraanimoodulite lisamine või ära võtmine). Keemilise absorptsiooni korral toob gaasivoo kulu ja koostise ajas muutumine kaasa vajaduse olulisteks täiendavateks kapitalikuludeks, mis on tingitud

vajadusest tagada absorptsioonikolonnis kindel minimaalne (või ka lubatud maksimaalne) gaasi ja absorbendi kulu. Samuti ei ole seda tüüpi püüdmisseadmed üldiselt sobivad lühiajalisteks sisse- ja väljalülitusteks, mistõttu ei ole need kasutatavad tipukoormuse tagamiseks kasutatavate põletusseadmete korral. Seega, uute rajatavate suurte põletusseadmete rajamisel on otstarbekas kaaluda hoopis nn protsessis püüdmist hapnikus põletamise tehnoloogia näol, mille puhul hinnanguline ühe tonni CO₂ püüdmise maksumus on vahemikus 35-90 €. See võimaldab CO₂ püüdmist sisse-välja lülitada ja töötada püüdmise režiimis kogu võimsusvahemiku ulatuses ning kasutades kütusena biomassi, saavutada ka negatiivne CO₂ emissioon.

CO₂ otse õhust kinni püüdmise (DAC – *Direct Air Capture*) protsessi maksumus on täna veel väga kõrge (suurusjärg märkimisväärselt üle 100 euro ühe tonni CO₂ püüdmisel), sõltudes oluliselt elektrimaksumusest ja seega ei ole Eestis selle rakendamine lähitulevikus tõenäoline.

CO₂ transpordiks kasutatakse nii toru-, auto-, laeva- kui ka raudteetransporti ja nende kombinatsioone, mis kõik on arenenud tehnoloogiad (TVT 9). Transpordiviisi valiku määravad nii alg- ja lõpp-punkti asukoht (vahemaa ja looduslikud tõkked) kui ka aastas transporditav CO₂ kogus. Arvestades CO₂ püüdmise potentsiaali ja potentsiaalseid CO₂ punktallikaid Eestis, aga ka CO₂ kasutamise potentsiaali, on Eesti siseselt käesoleval hetkel ja lähiajal kõige otstarbekam kasutada maanteetransporti, mille puhul hinnanguline ühe tonni CO₂ transpordi maksumus on suurusjärgus üks euro ühe kilomeetri kohta. Juhul kui jõutakse olukorrani, kus Eestis aastas püütav CO₂ kogus ületab siin kasutatavat kogust, on vajalik ehitada välja infrastruktuur, mis võimaldaks riigipiiri ülest CO₂ transporti selle mujal kasutamiseks või püsivaks ladustamiseks. CO₂ transpordil pikema vahemaa taha (üle 500 km) on kõige kulutõhusam kasutada laevatransporti ühe tonni CO₂ transpordi maksumusega suurusjärgus kümme senti ühe kilomeetri kohta. Üldiselt tuleb aga arvestada, et riigipiiride ülese transpordi maksumuse kujunemisel mängib olulist rolli koostöö kõigi turuosalistega, sh lähinaabritega, et optimeerida transpordisüsteemi ja vähendada kulusid. Seega on oluline mitte jääda kõrvale EL-i ülesest CO₂ transporditaristu arendamisest.

Püütud, kuid mitte kasutatud CO₂ tuleb ladustada. Ladustamise võimalused jagatakse nn looduslikeks (atmosfäärist CO₂ eemaldamine fotosünteesi või erinevate karbonaatsete mineraalide keemilise ja/või biokeemilise sadenemise teel) või tehislakeks (ladustamine maa-alustes geoloogilistes struktuurides, sidumine geokeemiliselt-mineraalselt silikaatsete tard- ja moondekivimitega või mineraalne sidumine tööstusjäätmetega). Eestis CO₂ geoloogilise ladustamise võimalused puuduvad, mistõttu ei ole CCS tehnoloogiad Eestis perspektiivsed, kuid maailmas üldiselt ja ka Euroopas arendatakse mitmeid projekte ning Norras on käivitunud ka esimene kommertsiaalne CO₂ geoloogilise ladustamise projekt. Viimase puhul ei ole CO₂ ladustamise hind avalik, kuid hinnangulised CO₂ ladustamise maksumused jäävad suurusjärku 15 eurot ühe tonni CO₂ eest. Sellele lisanduks märkimisväärne transpordikulu.

Lähtudes CO₂ geoloogilise ladustamise võimaluste puudumisest Eestis, on siin oluline tagada potentsiaal energeetikast ja tööstusest kinnipüütud CO₂-st erinevate pikaajaliselt ja püsivalt süsinikku siduvate toodete tootmiseks (CCU). CO₂ on keemiatööstuses oluline tooraine, mille kasutusvõimalusi pidevalt laiendatakse. Tooted/kemikaalid, kus CO₂

kasutatakse, võib jagada nn traditsioonilisteks ja uuteks/arendatavateks. Lisaks kasutatakse CO₂ ka keemiliselt muundamata. Sõltuvalt sellest, milleks CO₂ kasutatakse, võib see olla tootega/tootesse seotud kas lühiajaliselt (kütused) või pikaajaliselt (ehitusmaterjalid). Orgaaniliste materjalide/ainete (nt metanool, metaan, süngas jne) CO₂-st tootmiseks on vajalik vesiniku olemasolu. Seega sõltub selliste toodete omahind tugevasti elektri hinnast, eriti nn roheline vesiniku kasutamisel. Arvestada tuleb ka, et selliste toodete omahind ületab üldiselt vähemalt kahekordselt nende toodete praegust turuhinda. EL-i praeguste regulatsioonidega on soodustatud eelkõige püsivalt süsinikku siduvate mineraalsete ehitusmaterjalide tootmine, aga ka uute alternatiivsete kütuste ja energia-kandjate tootmine (metanool, sünteesgaas jne).

CO₂ PÜÜDMIST KÄSITLEVAD REGULATSIOONID

Kuigi mitmetes EL strateegiates ja eesmärkides on toonitatud tööstusliku CO₂ püüdmise vajadust ja tähtsust, ei motiveeri tänased regulatsioonid tegema vajalikke investeeringuid CO₂ kinnipüüdmiseks. EL on plaaninud lähiaastateks mitmeid samme nende kitsaskohtade lahendamiseks ning Eestil on oluline neid arenguid jälgida ja kaasa rääkida. Mõningad olulised kitsaskohad EL-i tasemel on järgmised:

- EL tasemel vajab lahendamist kinnipüütud CO₂ arvestus EL heitkogustega kauplemise süsteemis (EL HKS-is), sh biogeense CO₂ ja negatiivsete heitkoguste arvestus.
- Eesti ettevõtete jaoks on vajalik laiendada püsivalt süsinikku siduvate toodete nimekirja EL HKS-is ning luua ühtsed alused projektide sertifitseerimiseks.
- CO₂ püüdmine ja selle ringlussevõtt täiustatud sünteetiliste kütuste, kemikaalide, polümeeride või mineraalide tootmiseks on oluline ja uuenduslik aspekt tööstusliku süsinikumajanduse väärtusahelas ja reguleeritud taastuvenergia direktiiviga, mis aga annab selge suunise biogeense CO₂ kasutamisele.
- Teatavad piirangud investeeringute suunamisele on seatud taksonoomia määrusega (nt fossiilne CCUS).

Kuna CCUS-i näol on tegemist siiski üsna uue ja kohati reguleerimata teemaga, siis on lähiaastatel lisandumas mitmeid uusi EL algatusi, mille osas Eestil tuleb kaasa mõelda ja rääkida oma selgelt välja kujundatud seisukohtadega.

CCUS PERSPEKTIIV EESTIS CO₂ VAATES

Siseriiklikult on Eestil oluline kuni aastani 2035:

- erinevate riiklike toetuste välja töötamine, sh toetused CCUS tervikahelate välja arendamiseks, ja laiema teadlikkuse tõstmine;
- poliitilise visiooni loomine ja riiklikul tasandil selgete eesmärkide seadmine, sh pikaajaline CCUS eesmärk ning seejärel vastavasisuline lobitööd EL regulatsioonide suunal;

- ettevõtete toetamine ja nõustamine EL toetuste suunal, sh tegevused kujundamaks ja loomaks regulatiivset raamistikku, mis suurendaks energeetika- ja tööstusettevõtete motivatsiooni CCUS tehnoloogiate arendamiseks ja kasutuselevõtuks, ning ka kinnipüütud CO₂ kasutamiseks toodetes.

Järgides puhtalt EL-i CCUS temaatilisi algatusi on Eestis CO₂ punktallikatest paljulubavaim biogeense CO₂ (nt biometaani tootmisel tekkiv) püüdmine ja kasutamine. 2023. aastal tekkis Eestis 3,2 miljonit tonni biogeenset CO₂, kuid selle hajutatuse ja väiksemad kogused käitiste kaupa muudavad investeeringud kalliks. Erandiks on biometaanijaamad, kus CO₂ kogumine on kuluefektiivsem võrreldes nt biomassil põhinevate koostootmisjaamadega, kus CO₂ kontsentratsioon suitsugaasis on oluliselt madalam ning sellest tulenevalt ka CO₂ kinnipüüdmise maksumus suurem. Eestis on täna kaheksa biometaanijaama, kus on võimalik hinnanguliselt toota kokku ca 46 000 tonni CO₂. Lisaks toodetakse biogaasi ka tööstuslikes biogaasijaamades, veepuhastuskäitistes ja prügilates. Teoreetiline aastane biogeense CO₂ tootmiskaht võiks Eesti olla kuni 200 000 tonni. CCUS-i rakendatavus sõltub ka heiteallika suuruselt (soovitavalt üle 40 000 tonni aastas), asukohast ja transpordivõimalustest.

Biogeense CO₂ järele on olemas mõningane turunõudlus juba praegu ning seda toetavad ka EL regulatsioonid. Samas võimalusel tuleks täiendada EL HKS-is püsivalt süsinikku siduvate toodete nimekirja (lisada sinna tooted, mida Eesti ettevõtted nagu nt UP Catalyst OÜ ja Ragn-Sells AS on plaaninud tootma hakata) või muuta selle arvestusmetoodika aluseid (nt seada arvestuse aluseks vastavus kindlatele vähendamise ja püsivuse kriteeriumidele). Oluliseks tingimuseks fossiilse CO₂ kasutuselevõtul on CO₂ hind EL HKS-is – see peab olema ligilähedane CO₂ püüdmise, transportimise ja kasutamise kogumaksumusega. Eelpool nimetatud eeldused ja tingimused looks paremad võimalused nii biogeense kui fossiilse CO₂ kinnipüüdmiseks olemasolevates koostootmisjaamades ja põlevkivielektrijaamades (juhul kui leitakse lisaks kõikide teiste takistuste kõrvaldamisele ka lahendus ebaühtlasele koormamisele neis olemasolevates jaamades).

CCUS EESTIS MAJANDUS- JA JULGEOLEKUKESKKONNA VAATES

Lähtuvalt vajakajäämistest kohaliku poliitiliste otsuste tasemel ja EL-i regulatiivses raamistikus seatud takistustest fossiilse CO₂ kasutamisele on üldises CO₂ temaatika käsitluses leitud, et fossiilset päritolu ressurssidest tuleks iga hinna eest loobuda. Samas on Eestis 2025. aastal tehtud olulisi CO₂ temaatikat puudutavaid otsuseid (gaasielektrijaamade rajamine), mis suurendavad sõltuvust imporditud fossiilsest maagaasist. See on ühest küljest vastuolus EL-i kliimapoliitikaga ning teisest küljest otseseks ohuks energiajulgeolekule. Samal ajal on Eestil olemas kohalikud energiaressurssid – põlevkivi ja biomass – ning toimivad kaevandused ja taristu.

Arvestades üldist majandus- ja julgeolekukeskkonna turbulentsust ning prognoosimatust, peaks Eesti eelistama kohalike ressursside kasutamist koos CCUS tehnoloogiatega. See kombinatsioon võimaldaks märkimisväärselt vähendada CO₂ heitmeid ning saavutada negatiivse CO₂ heitmete bilansi, hoida energiatootmise tulu riigieelarves ja tagada varustuskindlus kriisiolukordades.

Sellisel lähenemisel on:

- geopoliitiline kaalutus – tervise-, julgeoleku- või poliitilise kriisi korral võib katkeda ligipääs imporditavale maagaasile, sealjuures Eesti biogaasi perspektiivseks tootmismahuks hinnatakse kuni 1 TWh. Kohalikul ressursil põhinev energia-tootmine tagab parema valmisoleku ja vähendab sõltuvust välisriikidest;
- majanduslik kaalutus – põlevkivist toodetud elektri omahind ilma CO₂ kvoodita on 30–40 €/MWh¹ ning rakendades CO₂ püüdmistehnoloogiat jääb põlevkivi elektri lõpphind samaks või isegi odavamaks kui maagaasist toodetud elektril, mille hind on suurusjärgus 120–150 €/MWh¹. Lisaks jääb selle kohaliku ressursi tulu Eestisse, toetades riigieelarvet ja kohalikke töökohti.

Gaasielektrijaamade ehitamine võimalusega nende hilisemaks vesinikule üleviimiseks sõltub vesiniku tootmise ja salvestustehnoloogiate arengust. Kui vesiniku tootmine muutub ulatuslikuks, saab sellest toota ammoniaaki, mida on võimalik kasutada ka olemasolevates põlevkivikateldes.

Muutuvas tervise-, julgeoleku- ja kliimapoliitilises olukorras on põhjendatud ja strateegiliselt mõistlik toetada põlevkivi kasutamist koos CCUS-tehnoloogiatega. See tagab energiajulgeoleku, toetab kohalikku majandust ja aitab täita kliimaeesmärke.

¹ <https://www.err.ee/1609637431/analuus-polevkivijaamad-hoidsid-mullu-elektri-hinna-17-protsenti-madalamal>

SISSEJUHATUS

Euroopa Liit (EL) on seadnud eesmärgiks vähendada kasvuhoonegaaside (KHG) heitkoguseid 55% aastaks 2030 ja saavutada kliimaneutraalsus aastaks 2050. Lisaks on seatud vahe-eesmärk aastaks 2040. Eesti, olles üks EL-i liikmesriikidest, on samuti seadnud eesmärgi saavutada kliimaneutraalsus 2050. aastaks. Nende eesmärkide saavutamisel mängivad kesksel rollil innovaatilised tehnoloogiad, sh CO₂ püüdmine ja kasutamine (CCUS), mis aitavad vähendada süsinikuheitmeid ning ühtlasi võimaldavad seda kasutada väärtusliku ressursina.

Aastal 2024 valminud uurimistöö "Eesti kasvuhoonegaaside eelarve koostamine" käigus arvutati välja Eesti KHG eelarve, võttes arvesse olemasolevaid parimaid praktikaid, meetodikaid ja mudeleid üleilmse süsinikueelarve ja EL-i KHG eelarve kohta ning töö käigus kogutud tagasisidet tellijalt (Kliimaministeerium) ja kaasatavatelt huvirühmadelt. Üleilmselt Pariisi kokkuleppega seatud 1,5°C temperatuurieesmärgi täitmiseks 50–67% tõenäosusega peaks Eesti KHG eelarve perioodil 2020–2050 jääma vahemikku 94–116 Mt CO₂-ekv. Selline KHG eelarve on kooskõlas üleilmselt kasutatavate mudelitega, mille järgi peaks Eesti oma õiglase panuse andmiseks Pariisi kokkuleppesse vähendama KHG heitkoguseid aastaks 2030 ligikaudu 80% ja aastaks 2040 ligikaudu 98% võrreldes 1990. aasta tasemega. Uuringu üks järeldusi oli, et ilma täiendava tehnoloogilise süsinikusidumiseta energeetika- ja tööstussektoris ei ole Eestil võimalik järgida KHG eelarvet, mis võimaldaks jääda 1,5°C temperatuurieesmärgi piiresse.

Käesolev teekaart keskendub sellele, kuidas CO₂ püüdmise ja kasutamise tehnoloogiaid saab rakendada Eestis, sh võttes arvesse siinset keskkonda. CO₂ püüdmise teekaardi koostamise eesmärk on tööstuslike või ka tehnoloogiliste süsiniku püüdmise ja jäädava ladustamise (CCS – *Carbon Capture and Storage*) ja kasutamise (CCU – *Carbon Capture and Utilization*) tehnoloogiate kasutuselevõtuks vajalike eelduste väljaselgitamine Eestis. Teekaart lähtub tehnoloogiate hetkeseisust, nende kasutuselevõtuks vajalike eelduste kaardistusest, Eesti tööstus- ja energiamajanduse eripäradest ja potentsiaalsetest CO₂ mahtudest ning seda kõike toetava õigusraamistiku analüüsist. Seejuures käsitletakse teekaardis nii fossiilse kui biogeense CO₂ allikaid ja kinni püüdmist ning sealhulgas CO₂ kinni püüdmist nii olemasolevatest seadmetest kui ka otse õhust.

Käesoleva teekaardi aluseks on Kliimaministeeriumi poolt esitatud uuringu lähteülesanne, varasemad CO₂ püüdmise ja kasutamise uuringud, rahvusvaheline teaduskirjandus ning EL-i regulatsioonid. Teekaardi koostamise protsessi on kaasatud Eesti olulisemad energia- ja tööstusettevõtted ning valdkonna eksperdid, et tagada teekaardi praktilisus ja rakendatavus.

METOODIKA

Teekaardi koostamiseks viidi läbi järgmised tegevused:

- Varasemate uuringute, andmete ja kirjanduse analüüs, sealhulgas mitmete üleilmsete uuringute analüüs CCUS tehnoloogiate (süsiniku püüdmise, transpordi, hoiustamise, kasutamise ja salvestamise) tehnoloogilise valmidustaseme (TVT), maksumuse ja efektiivsuse kohta. Muuhulgas tugineti järgmistele uuringutele ja analüüsidele:
 - Kliimamuutuste leevendamine läbi CCS ja CCU tehnoloogiate: Climmit;
 - Ida-Viru maakonna CO₂ kasutamise arengustrateegia 2021–2030+;
 - The Applied Innovation Roadmap for CDR. An independent perspective to guide RD&D funding;
 - Carbon Dioxide Removal Technology Roadmap: Innovation Gaps and Landscape Analysis;
 - Scaling Technological Greenhouse Gas Removal: A Global Roadmap tp 2050;
 - CCS National Roadmap. Estonia.
- Regulatsioonide analüüs, sealhulgas ülevaade regulatsioonidest, mis mõjutavad CCUS tehnoloogiate kasutuselevõttu ja kinnipüütud CO₂ toodetud toodete edukust turul, ning tänaste regulatsioonide kitsaskohad, mis piiravad CCUS tehnoloogiate kasutuselevõttu Eestis ja ettepanekud nende muutmiseks. Muuhulgas analüüsiti järgmist:
 - Komisjoni teatised Euroopa Parlamendile, Nõukogule, Euroopa majandus- ja sotsiaalkomiteele ning regioonide komiteele:
 - „Meie tuleviku kindlustamine Euroopa kliimaeesmärk aastaks 2040 ja tee kliimaneutraalsuse saavutamisele 2050. aastaks, ehitades jätkusuutlikku, õiglast ja jõukat ühiskonda“;
 - „Edasipüüdliku ELi tööstusliku süsinikumajanduse suunas“;
 - „Puhta tööstuse kokkulepe – konkurentsivõime ja süsinikuheite vähendamise ühtne tegevuskava“;
 - Euroopa Parlamendi ja Nõukogu:
 - direktiiv 2003/87/EÜ, millega luuakse liidus kasvuhoonegaaside lubatud heitkoosse ühikutega kauplemise süsteem ja muudetakse nõukogu direktiivi 96/61/EÜ ja selle muudatused (EL HKS direktiiv) ja alamaktid;
 - direktiiv 2009/31/EÜ, milles käsitletakse süsinikdioksiidi geoloogilist säilitamist ning millega muudetakse nõukogu direktiivi 85/337/EMÜ ja direktiive 2000/60/EÜ, 2001/80/EÜ, 2004/35/EÜ, 2006/12/EÜ, 2008/1/EÜ ning määrust (EÜ) nr 1013/2006 (CCS direktiiv) ja selle alamaktid;

- direktiiv (EL) 2018/2001 taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise edendamise kohta (taastuvenergia direktiiv) ja alamaktid;
 - määrus (EL) 2020/852, millega kehtestatakse kestlike investeeringute hõlbustamise raamistik ja muudetakse määrust (EL) 2019/2088 (taksonoomia määrus) ning selle alamaktid;
 - määrus (EL) 2021/1119, millega kehtestatakse kliimanetraalsuse saavutamise raamistik ning muudetakse määruseid (EÜ) nr 401/2009 ja (EL) 2018/1999 (Euroopa kliimamäärus);
 - määrus (EL) 2024/1735, millega kehtestatakse meetmete raamistik Euroopa nullnetotehnoloogia toodete tootmise ökosüsteemi tugevdamiseks ja muudetakse määrust (EL) 2018/1724 (Euroopa nullnetotööstuse määrus) ning selle alamaktid;
 - määrus (EL) 2024/3012, millega kehtestatakse liidu raamistik süsiniku püsiva eemaldamise, süsinikupõllunduse ja toodetes süsiniku säilitamise sertifitseerimiseks (süsiniku eemaldamise ja sertifitseerimise määrus) ning selle alamaktid.
- Arutelud turuosalistega, sealhulgas viidi turuosalistega läbi arutelud ja intervjuud ning saadi tagasisidet nende seisukohtade kohta ka läbi kirjalike küsimustike.

1. CCUS VÕIMALUSED JA VÄLJAKUTSED

CO₂ püüdmine, transport, kasutamine ja ladustamine on tehnoloogiate ahel, milles iga etapp (püüdmine, transport, kasutamine ja/või ladustamine) on teineteisest sõltumatu. Iga nimetatud tehnoloogiline etapp võib tähendada erinevaid tehnoloogiaid, mille valikul tuleb lähtuda tehnoloogilistest ja majanduslikest aspektidest. CCUS ahela erinevate etappide sisu on lühidalt selgitatud järgnevalt:

- **CO₂ püüdmise** all mõistetakse tavaliselt põlemisel või materjalide termilisel lagunemisel tekkiva CO₂ atmosfääri sattumise vältimist. Seega tähendab see erinevate kütuste (nii fossiilkütused kui ka biokütused) oksüdeerumisel tekkinud gaaside segust CO₂ eemaldamist või otse õhust CO₂ eemaldamist (ingl k *direct air capture* – DAC).
- **CO₂ transpordi** all mõistetakse püütud CO₂ viimist püüdmiskohast ladustamis- või kasutuskohtadesse. CO₂ komprimeerimist ja veeldamist võidakse vaadelda nii CO₂ püüdmise kui ka transpordi etapi raames. Antud teekaardis käsitletakse seda CO₂ transpordi etapi osana.
- **CO₂ kasutamine** hõlmab püütud CO₂ muundamist erinevateks toodeteks, mis leiavad kasutust kütustena, kemikaalidena või ehitusmaterjalidena.
- **CO₂ ladustamine** tähendab selle viimist maa-alustesse geoloogilistesse formatsioonidesse nii, et see ei pääse atmosfääri.

1.1. CO₂ PÜÜDMINE

Erinevad tehnoloogilised lahendused CO₂ püüdmiseks on toodud järgmises tabelis (Tabel 1). Tehnoloogilised meetodid CO₂ püüdmiseks jagunevad protsessieelseks püüdmiseks, protsessis püüdmiseks ja protsessijärgseks püüdmiseks. Erinevate meetodite tehnoloogilised valmidustasemed (TVT-d) näitavad, et mitmed neist on saavutanud taseme TVT 9, kuid sellel juhul tuleb arvestada, et nendel meetoditel põhinevate tehnoloogiate rakendusteks on olnud tavaliselt keemiatööstus (kütuste gaasistamisel tekkivast süngaasist CO₂ eemaldamine, vesiniku tootmine maagaasi auruga reformimisel, maagaasi puhastamine), mitte suurte põletusseadmete põlemisgaasidest CO₂ püüdmine. Põlemisgaasi ja keemiatööstuse protsesside voogude koostiste ja mahtude/mastaapide erinevustest tulenevalt on nende meetodite praktiline juurutamine põletusseadmete põlemisgaasidest CO₂ püüdmisel osutunud vaevaliseks. Oluline on ka märkida, et olemasolevate põletusseadmete korral on põhimõtteliselt rakendatavad ainult protsessijärgsed CO₂ püüdmise tehnoloogiad.

Kõikide tehnoloogiate rakendamise puhul on oluline tähelepanu pöörata nende märkimisväärssele energiakulule (Tabel 1), millest enamuse protsessieelsete, protsessis ja protsessijärgsete püüdmise tehnoloogiate korral moodustab suure osa soojusenergia (tavaliselt aur). Eranditeks on krüogeensed, membraan- ja kõikuvrõhuga adsorptsioontehnoloogiad,

mille puhul märkimisväärne energiakulu tuleneb elektrienergia vajadusest. Arvestada tuleb ka märkimisväärse ruumi vajadusega, mis linnakeskkonnas paiknevate põletusseadmete korral võib osutada oluliseks takistuseks.

CO₂ püüdmise maksumuse hinnangud, mis sisaldavad nii kapitali- kui ka opereerimiskulusid, varieeruvad väga laiades piirides, sõltudes nii CO₂ püüdmise tehnoloogiast, püüdmise efektiivsusest, tööstusharust (CO₂ kontsentratsioonist ja CO₂ püüdmise tehnoloogia integreerimise võimalus) ja asukohast, kus CO₂ püüdmise tehnoloogiat rakendatakse. Kuna reaalseid CO₂ püüdmise rakendusi on vähe, siis enamuse CO₂ püüdmise maksumusi on hinnangulised ning täpsusega $\pm 30\%$. Opereerimiskulud moodustavad üldjuhul kuni umbes 25% CO₂ püüdmise maksumusest. Samas nt membraantehnoloogia kasutamisel on need umbes 50% CO₂ püüdmise maksumusest.

Tööstuslikku põlemisgaasidest CO₂ püüdmist on käesolevaks hetkeks CO₂ järelpüüdmise (keemiline absorptsioon) kujul rakendatud Põhja-Ameerikas, mistõttu on teada maksumused seal piirkonnas. Arvestada tuleb aga, et need maksumused on esmased tehnoloogiate/seadmete maksumused, mis on tavaliselt oluliselt kõrgemad nn N-nda seadme maksumusest. Tehnoloogiate arenedes CO₂ püüdmise maksumuse vähenemist näitab esimese ja teise kommertsiaalse CO₂ püüdmise tehnoloogia võrdlus – CO₂ püüdmise maksumus on nende puhul vastavalt umbes 105 USD/t (ligikaudu 1 Mt/a) ja 65 USD/t (ligikaudu 1,4 Mt/a) (NECCUS and OGTC).

Püüdmise maksumuse kujunemise puhul tuleb arvestada, et see on seda kõrgem, mida madalam on CO₂ kontsentratsioon (osarõhk) gaasis. Samuti muutub mastaabi mõju seda olulisemaks, mida madalam on CO₂ osarõhk (Kearns et al. 2021). See tähendab, et mida madalam on CO₂ osarõhk ja masskulu, seda kõrgem on ühe tonni CO₂ püüdmise maksumus. Selle tõttu on protsessigaaside voogudes (protsessieelne püüdmine) CO₂ püüdmise maksumus oluliselt madalam võrreldes madala või keskmise CO₂ kontsentratsiooniga gaasivoogudega. Viimase alla kuuluvad nii fossiilset kui ka biogeenset kütust põletavate põletusseadmete põlemisgaasid. Suuremate, sh ka Eestis asuvate koostootmisjaamade ja põlevkivielektri jaamade korral ulatub CO₂ püüdmisseadmete maksumus isegi kuni sadade miljonite eurodeni. Üldiselt võib välja tuua, et võrdse aastas püütava CO₂ massi korral on biomassi- või põlevkivielektri jaamast iga CO₂ tonni püüdmine vähemalt 15% odavam võrreldes gaasielektri jaamaga. Aastase püütava CO₂ massi suurenedes langevad püüdmiskulud märkimisväärselt, kuna püüdmisseadme mastaap suureneb. Kulude vähenemine väheneb aastas üle 0,3 miljoni tonni CO₂ püüdmisel, stabiliseerudes lõpuks püütavatel CO₂ kogustel 0,5–0,6 miljoni tonni aastas. Uute gaasijaamade korral on teoreetiliselt võimalik kasutada ka protsessis püüdmise tehnoloogiaid, kuid nende maksumus jääb enamvähem samasse suurusjärku kui protsessijärgsetel tehnoloogiatel.

Arvestades eespool toodud CO₂ püüdmise maksumuse kujunemise asjaolusid, siis oluliselt madalam on CO₂ püüdmise maksumus biogaasi väärindamisel biometaaniks saadavast gaasivoost. Keskmise Eesti biogaasijaama korral tähendab see kapitalikulu suurusjärgus 2 kuni 3 miljonit eurot ja seega CO₂ püüdmise maksumust (koos opereerimiskuludega) umbes 50 eurot tonn võttes aluseks, et ühes jaamas püütava CO₂ kogus on ca 4000 tonni aastas.

Tabel 1. CO₂ püüdmise meetodite ja tehnoloogiate võrdlus

	Meetod	TVT	Püütava CO ₂ mass, t/päev	Energiakulu, GJ/t	CO ₂ püüdmise maksumus, €/t
Protsessi- eelne püüdmine	Absorptsioon (keemiline)	9	20-3000	1 kuni 3	13-25
	Absorptsioon (füüsikaline)	9	100-10 000	>0,3	
Protsessis püüdmine	Hapnikus põletamine	8	>10 000	1,5-1,7	35-90
	Hapnikukandja ringlus (sh kaltsiumi ringlus)	6	>10 000		20-40
Protsessi- järgne püüdmine	Absorptsioon (keemiline)	8-9	1-10 000	1,0-5,5	40-120
	Absorptsioon (füüsikaline)	9	1500	1-1,7	
	Krüogeenne	6-8	250-10 000	0,2-2	25-80
	Membraan	6-9	1-10 000	0-2,9	60-120
	Adsorptsioon	7-9	10-5000	0-2,8	55-90
	Kõikuvrõhuga adsorptsioon	9	68-2700	>0	
DAC		5-7	10-1400	(4-12) th + (0,9-3,2) ^e	100-1200

Kokkuvõtlikult, käesoleval hetkel on suures skaalas põletusseadmete (nt ühtlaselt koormatavad koostootmisjaamad ja põlevkivielektri jaamad) põlemisgaasidest CO₂ püüdmiseks võimalik kasutada protsessijärgset keemilist absorptsiooni. Membraan-tehnoloogia, mille kasutamist põlemisgaasidest CO₂ püüdmiseks hetkel piloteeritakse, on üldiselt sobivam kasutamiseks nn protsessigaaside (nt biometaani tootmisel tekkiv kõrge CO₂ sisaldusega heitgaas) korral, kus CO₂ kontsentratsioon on põlemisgaasidega võrreldes kõrgem. Membraantehnoloogiat on lihtne muuta modulaarseks. Keemilise absorptsiooni modulaarseks muutmine on problemaatiline, kuna erinevad gaasivood võivad olla erinevate parameetritega (CO₂ kontsentratsioon ja gaasi mahtkulu). Olulised piirangud seab vajadus tagada absorptsioonikolonnis kindel minimaalne (või ka lubatud maksimaalne) gaasi mahtkulu. Samuti ei ole seda tüüpi püüdmiseadmed sobivad lühiajalisteks sisse- ja väljalülitusteks, mistõttu ei ole need kasutatavad tipukoormuse tagamiseks kasutatavate põletusseadmete korral.

1.2. CO₂ TRANSPORT

CO₂ transpordiks saab kasutada nii toru-, auto-, laeva- kui ka raudteetransporti. Kõik need on arenenud tehnoloogiad (TVT 9) ja neid on võimalik kombineerida. Kõige mastaapsemalt kasutatakse CO₂ transpordiks torustikke, mille kogupikkus Põhja-Ameerikas on ligi 7200 km. Ülejäänud maailmas on kogu CO₂ võrgustiku pikkuseks kokku ligi 8000 km.

CO₂ võib transportida nii gaasilisel kui ka vedelal kujul. Vedel CO₂ on kõrge tihedusega, võimaldades transportida suuremaid koguseid, samas väiksemate koguste torustikus transportimiseks kasutatakse gaasilisel kujul CO₂-e. CO₂ auto-, laeva- või raudteetransport toimub peamiselt vedelas olekus keskmisel rõhul (15 bar ja -30°C) või madalal rõhul (7 bar ja -50,3°C). Kõiki transpordiviise kasutatakse CO₂ transportimiseks, kuigi kuni viimase ajani ei olnud spetsiaalseid CO₂ transpordiks mõeldud laevu.

Torustiku kaudu CO₂ transpordi maksumus sõltub olulisel määral transporditavast kogusest, aga ka sellest, kas torustik paikneb maismaal või meres (Tabel 2). Üldiselt on CO₂ transpordil pikema vahemaa taha (üle 500 km) kõige kulutõhusam kasutada laeva-transporti. Maismaatransport (kuni 200 km) veoautodega võib osutada torustikust kulutõhusamaks vahelduva nõudluse korral alla 0,05 miljoni tonni CO₂ transpordil aastas (Moreno et al. 2024). Sõltuvalt CO₂ kogusest ja transpordimeetoditest, võimalike kasutajate või ladustamiskohtade asukohast, Soome näitel on transpordi maksumus tõenäoliselt vahemikus 25-55 €/t (Kujanpää, Onni, and Mäkikouri 2024). Maksumus sisaldab esialgset komprimeerimist või veeldamist ja puhverladustamist sihtkohas nii kasutus- kui ka püsiladustamise puhul ning lähtub maantee- ja raudteetranspordi kasutamisest. Olulise osa sellest maksumusest moodustavad veeldamiskulud (~18 €/t). Raudteetransport on ligikaudu 10% võrra odavam.

Transpordi maksumuse puhul mängib olulist rolli ka kõigi turuosaliste, sealhulgas lähinaabrite koostöö, mis võimaldaks optimeerida transpordisüsteemi ja sellest tulenevalt vähendada kulusid (d'Amore, Romano, and Bezzo 2021). Eesti kontekstis on käesoleval hetkel kõige perspektiivikam maanteetransport, tulenevalt CCUS-i väikestest kogustest, sh võttes arvesse potentsiaali nii CO₂ püüdmise kui kasutamise osas.

Tabel 2. CO₂ transpordiks kasutatavad lahenduste võrdlus

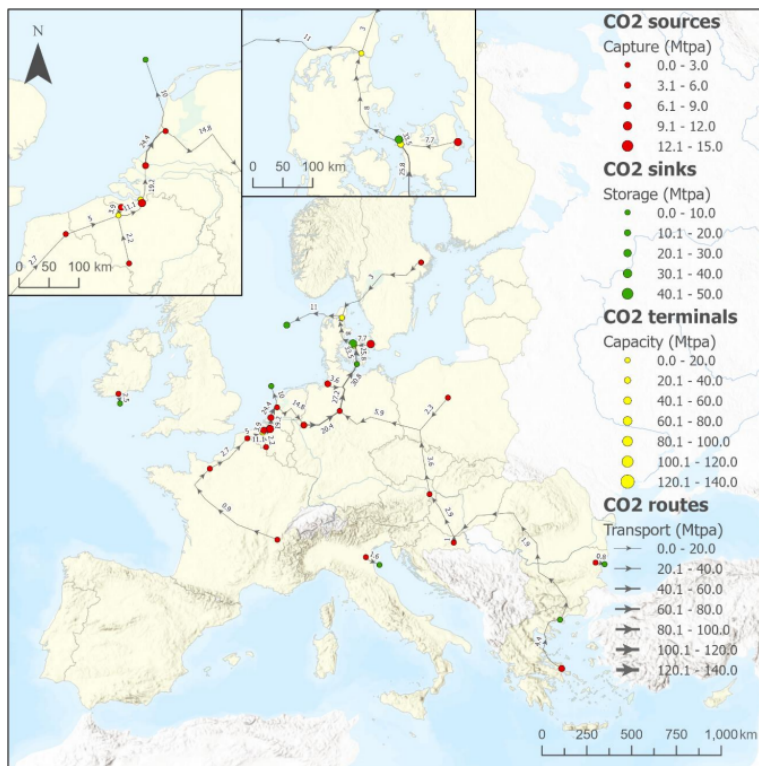
Transport	Plussid	Miinused	Kasutamine	Maksumus, €/t/km
Laev	<ul style="list-style-type: none"> sobib hooajaliste ja kaugemal asuvate saasteallikate korral lihtne suurendada võimsust paindlikkus marsruutide valikul 	<ul style="list-style-type: none"> nõuab sadamataristu väljehitamist perioodiline transpordiviis (vajab vahemahuteid) sõltuv ilmastikust 	<ul style="list-style-type: none"> saab kasutada mitme avamere ladustamiskoha korral CO₂ allikas asub transpordivõrgust eemal või sadamataristu lähedal 	0,01-0,1

Transport	Plussid	Miinused	Kasutamine	Maksumus, €/t/km
		<ul style="list-style-type: none"> möödukad heitmed 		
Rong	<ul style="list-style-type: none"> majanduslikult tõhus võimalus väikeste ja keskmiste mahtude transportimiseks keskmistel ja suurtel kaugustel madalad heitmed energiasäästlik 	<ul style="list-style-type: none"> täiendav vajadus veoautodega või toru-transportiks perioodiline transpordiviis (vajab vahemahuteid) taristu võimsus on piiratud piiratud geograafiline paindlikkus 	<ul style="list-style-type: none"> logistiline lahendus väikeste või kaugemate CO₂ allikate ühendamiseks (<1,0 mln aastas 200 km kaugustel) käivitamislahendus 	0,20-2,0
Veoauto	<ul style="list-style-type: none"> sobiv lahendus projekti käivitamisetapis suur geograafiline paindlikkus lihtne rakendada 	<ul style="list-style-type: none"> võib osutada kulukaks ja suhteliselt ebatõhusaks perioodiline transpordiviis (vajalik vahemahutite ehitamine) CO₂ püüdmise üldine efektiivsus langeb fossiilsete kütuste kasutamisel 	<ul style="list-style-type: none"> väikeste ja keskmiste CO₂ koguste transportimiseks väikestel kaugustel (<0,7 mln aastas 200 km kaugustel) 	0,11-2,0
Torustik	<ul style="list-style-type: none"> võimaldab transporti erinevates faasi olekutes väiksemad eeltöötlemiskulud vähem rangemad koostise nõuded väiksem energia-vajadus madalad heitmed 	<ul style="list-style-type: none"> nõuab regulatiivse raamistiku väljatöötamist algkapitali kulud kõrged pikad tarne-ajad 	<ul style="list-style-type: none"> tõhus suurte mahtude korral tõhus nii maismaal kui avamerel 	0,01-0,15

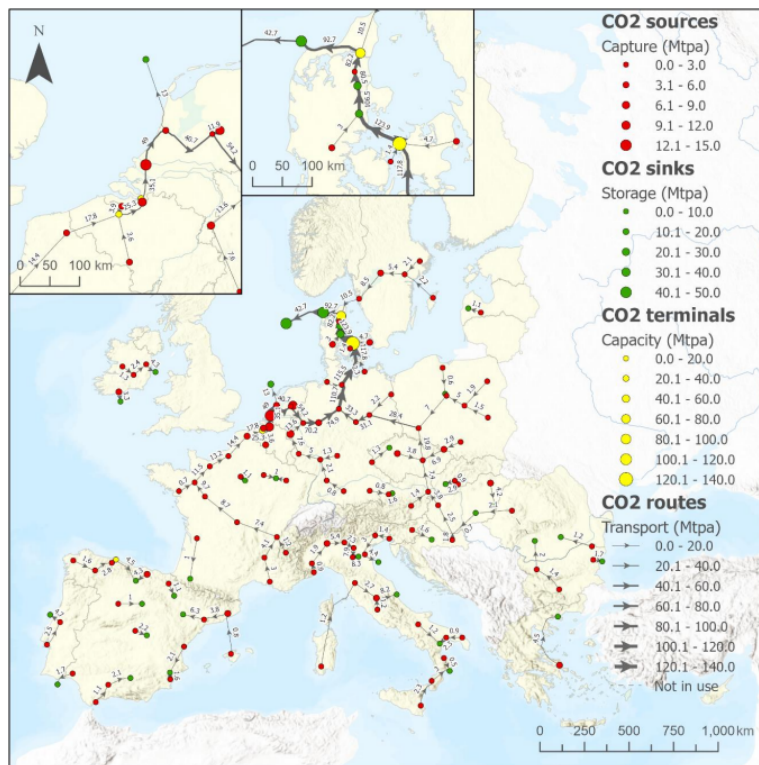
CO₂ transpordi infrastruktuur Euroopas

CCUS-i suuremahulise kasutuselevõtu tagamiseks Euroopas ja tagamaks CO₂ transport allikatest sobivatesse ladustamiskohtadesse, on vajalik kiirendada CO₂ transporditaristu arendamist. Praegused CO₂ transporditavad kogused erinevate transpordiliikide ja kohalike võrkude vahendusel on väga väikesed, võrreldes tulevaste vajadustega. Värske Euroopa Komisjoni uuringu hinnangul (Tumara et al., 2024) võib CO₂ transpordivõrgustik, sh torustik ja laevateed, pikeneda 2030. aastaks kuni 7300 km pikkuseni ja 2040. aastaks umbes 19 000 km pikkuseni. On ilmselge, et Euroopa torustiku arendamine, sh CCUS rakendamise algfaasis kuni 2030. aastani, on suur väljakutse. Vaatamata sellele, et CO₂ torustik on paljudel juhtudel kõige optimaalsem CO₂ transpordiviis, on selle ehitamise algkapitali kulu kõrged (Becattini et al., 2022) ja pika tarneajaga. Samal ajal, CO₂ püüdmise seadme rakendamise seisukohast vaadatuna püüdmine tundub mõistlik ainult siis, kui transport ladustamiskohale on tagatud. Seega on realistlik eeldada, et algselt hakatakse kasutama alternatiivseid maismaatranspordi viise lähimasse sadamasse, millele järgneb laevatransport avamere ladustamiskohtadesse.

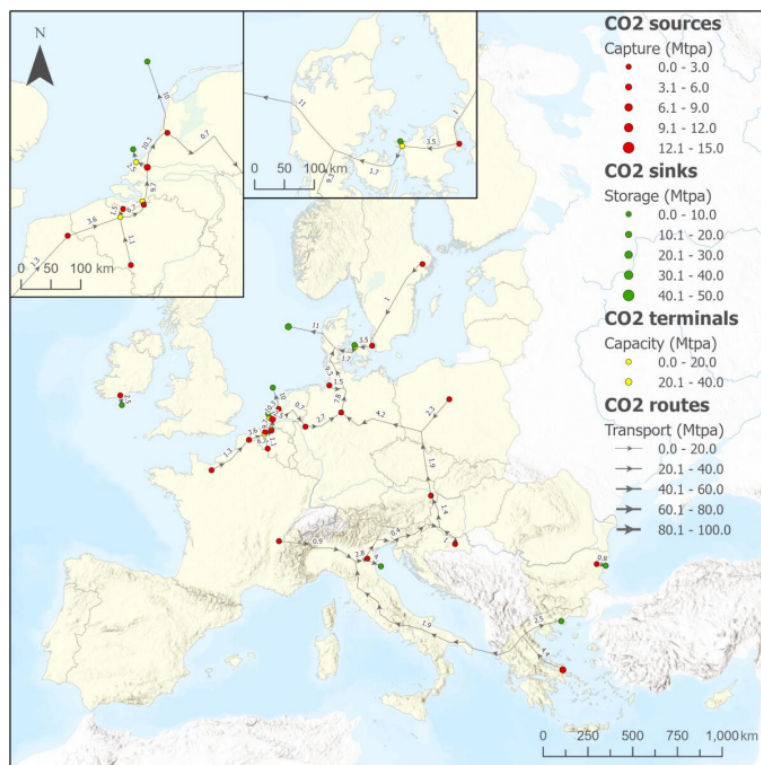
Allpool toodud graafikutel (vt Joonis 1 – Joonis 4) on näidatud kaks võimalikku alternatiivset stsenaariumi CO₂ transpordisüsteemi arenguks Euroopas, sõltuvalt CO₂ ladustamiskohtade kättesaadavusest ja juurdepääsetavusest erinevate arengufaaside lõikes. Uuringud tõestavad, et rahvusvaheline koordineerimine ja koostöö on ülioluline CO₂-transpordivõrgu edukaks ja kuluoptimaalseks arendamiseks. On näha, et enamjaolt on antud transpordisüsteem küllaltki laiaulatuslik ühendades mitmeid riike, tagades märkimisväärseid CO₂ koguste läbilaskvust kuni kümnete või isegi sadade Mt aastas. See tingib ka vajaduse töötada välja ühine CO₂-voo kvaliteedinõudeid sisaldav standard, mis hõlmaks koostist, puhtust, rõhku ja temperatuuri.



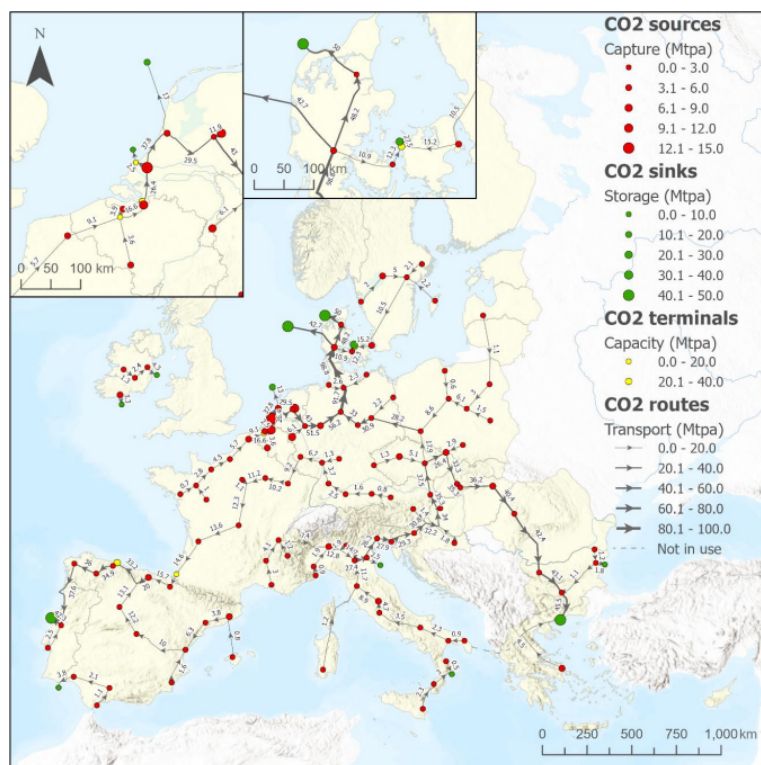
Joonis 1. CO₂ transpordivõrk vastavalt „Scenario A1 - CTP 2040 (EU)“ stsenaariumile aastal 2030 (Tumara et al., 2024). Siin eeldati, et ELis püütud CO₂ on võimalik ladustada nii Norras kui ka ELis.



Joonis 2. CO₂ transpordivõrk vastavalt „Scenario A1 - CTP 2040 (EU)“ stsenaariumile aastal 2050 (Tumara et al., 2024). Siin eeldati, et ELis püütud CO₂ on võimalik ladustada nii Norras kui ka ELis.



Joonis 3. CO₂ transpordivõrk vastavalt „Scenario B1 - CTP 2040 & Offshore only (EU)” stsenaariumile aastal 2030 (Tumara et al., 2024). Siin eeldati, et ELis püütud CO₂ on võimalik ladustada ainult saab avamere ladustamiskohtades.



Joonis 4. CO₂ transpordivõrk vastavalt „Scenario B1 - CTP 2040 & Offshore only (EU)” stsenaariumile aastal 2050 (Tumara et al., 2024). Siin eeldati, et ELis püütud CO₂ on võimalik ladustada ainult saab avamere ladustamiskohtades.

Euroopa Komisjon on valinud neliteist CO₂ transpordi ja ladustamise projekti oma viimasesse ühist huvi pakkuvate projektide (*Projects of Common Interests* ehk PCI-s) ja vastastikust huvi pakkuvate projektide (*Projects of Mutual Interest* ehk PMI-s) nimekirja. See arv näitab EL-i tahet toetada CCUS arendamist kooskõlas nullnetotööstuse määruse eesmärkidega.

Need projektid on järgmised:

- CO₂ TransPorts – See projekt on mõeldud toetama CO₂ kinnipüüdmist, transporti ja ladustamist Rotterdamist, Antwerpenist ja Põhjameres asuvate sadamate piirkondadest.
- Aramis – Piiriülene CO₂ transporti ja ladustamise projekt, kus CO₂ kogutakse Rotterdami sadama piirkonnast ning transporditakse ladustamiseks Hollandi mandrilavale.
- ECO₂CEE – Piiriülene CO₂ transpordi ja ladustamise projekt, kus CO₂ võib ladustada Taanis, Norras, Hollandis või Suurbritannias.
- Bifrost – Selles projektis viiakse CO₂ Saksamaa, Poola ja Taani tootjatelt ladustamiseks Taanisse.
- Callisto – CO₂ hub'i väljatöötamine Vahemerel, mis hakkab ladustama Prantsusmaa ja Itaalia heitgaase.
- CCS Baltic Consortium – See konsortsium arendab Läti ja Leedu vahelist piiriülest CO₂ projekti. Püütud CO₂ transporditakse CO₂ torustiku kaudu Klaipėda mere-sadamasse. Amber Grid (Leedu) ja Conexus Baltic Grid (Läti) tagavad sujuvama maismaatranspordi. CO₂ transporditakse ja ladustatakse KN Energies poolt Klaipėda sadamas (Leedu) opereeritavas multimodaalses vedelat CO₂ import-ekspordi terminalis. Rajatis võimaldab vastu võtta väiksemaid ja keskmise suurusega CO₂ koguseid, mis toimetatakse maanteetranspordiga veoautode või raudteetranspordiga vagunite abil. See oleks ka Eesti jaoks lähim koht, kuhu eelnimetatud transpordiviise kasutades kinnipüütud CO₂ transportida. Laevad transpordivad vedelat süsinikdioksiidi (LCO₂) avamere ladustuspaika. Transporditeenuse osutavad Mitsui O.S.K. Lines (Jaapan) ja Larvik Shipping (Norra).
- Delta Rhine Corridor – See projekt hakkab ladustama Saksamaalt ja Rotterdami piirkonnast pärit CO₂ avamere ladustuskohtadesse Hollandi ranniku lähedal.
- EU2NSEA – EU2NSEA arendab piiriülest CO₂-võrku, mis ühendab Belgiat, Saksamaad, Norrat, Taanit, Prantsusmaad, Lätit, Hollandit, Poolat ja Rootsi, et tagada CO₂ ladustamine Norra territoriaalvetes.
- GT CCS Croatia – See projekt hõlmab CO₂ torustiku ehitamist Horvaatiasse ja Ungarisse, kusjuures CO₂ ladustatakse maa-alustesse ladustuskohtadesse Ungaris.
- Norne – Norne eesmärk on rajada CO₂ transportinfrastruktuur, mis võimaldaks CO₂ ladustamist Taanis. Peamised heitkoguste allikad on ettevõtted Taanist, Rootsist, Belgiast ja Suurbritanniast.
- Prinos – Prinosse (Kreeka) viiakse CO₂ torustiku kaudu Belgia, Ungari, Kreeka, Itaalia ja Sloveeniast ning laevaga Küprosel.
- Pycasso – See projekt hõlmab Hispaania ja Prantsusmaa ettevõtete CO₂ transporti ning ladustamist Prantsusmaal.

- Northern Lights – Northern Lights on piiriülene projekt, mis ühendab mitmeid Euroopa CO₂ kinnipüüdmisprojekte Belgias, Saksamaal, Iirimaa, Prantsusmaal ja Rootsis. CO₂ transporditakse laevadega Norra mandrilavale asuvasse ladustuspaika.
- Nautilus CCS – Nautilus CO₂ käitlusprojekt hõlmab CO₂ kinni püüdmist Norra, Prantsuse ja Saksa allikatest ja selle merelist transporti Põhjamerre ladustamiseks.

1.3. CO₂ LADUSTAMINE

CO₂ ladustamise võimalused saab jagada nn looduslikeks või tehisliseks. Esimene hõlmab atmosfäärist CO₂ eemaldamist fotosünteesi teel ja erinevate karbonaatsete mineraalide keemilise ja/või biokeemilise sadenemise teel. Tehislikud CO₂ ladustamise viisid hõlmavad CO₂ ladustamist maa-alustes geoloogilistes struktuurides (kõrge soolsusega veekihtid, ammendunud nafta- ja gaasiväljad, söe ja orgaanilise kildade lasundid), selle sidustamist geokeemiliselt-mineraalselt silikaatsete tard- ja moondekivimite töötlemisel või kasutades mineraalset sidustamist tööstusjäätmetega.

CO₂ geoloogiline ladustamine on ohutu ja arenenud tehnoloogia, kuigi tööstuslikuks CO₂ ladustamiseks on senini kasutatud vaid nafta- ja gaasivälju. Peamine tööstusliku CO₂ ladustamise rakendus on nafta täiendav tootmine (EOR). Eesti territooriumil puuduvad olulised võimalused CO₂ ladustamiseks ning ühtlasi on kehtiva seadusandlusega Eestis CO₂ ladustamine nii maismaal kui ka merealadel keelatud.

CO₂ ladustamise maksumus sõltub oluliselt sellest, kas ladustuspaik asub maismaal või meres ning üldiselt on maismaal ladustamine odavam (Tabel 3). Kõrge soolsusega põhjaveekihtides CO₂ ladustamine nõuab sageli ulatuslikumat jälgimist/andmete kogumist ja suuremat arvu kaevusid CO₂ sisestamiseks võrreldes ammendunud nafta- ja gaasiväljadega. Viimasel juhul on võimalik kasutada ka olemasolevat infrastruktuuri.

Tabel 3. CO₂ ladustamise võimalused ja maksumus

Ladustamise koht	Ladustamise tüüp	Taristu taaskasutus võimalik	Maksumus, EUR/t
Maismaa	Ammendunud nafta- ja gaasiväljadel	Jah	1-7
		Ei	1-10
	Soolaveekihid	Ei	2-12
Avameri	Ammendunud nafta- ja gaasiväljadel	Jah	2-9
		Ei	3-14
	Soolaveekihid	Ei	6-20

1.4. CO₂ KASUTAMINE

CO₂ on keemiatööstuses oluline tooraine, mille kasutusvõimalusi pidevalt laiendatakse. Tooted/kemikaalid, kus CO₂ kasutatakse võib jagada nn traditsioonilisteks ja uuteks/arendatavateks. Sõltuvalt sellest, milleks CO₂ kasutatakse, võib see olla tootega/tootesse seotud kas lühiajaliselt (kütused) või pikaajaliselt (ehitusmaterjalid).

Traditsioonilised kemikaalid, kus CO₂ on üks lähteaine, on näiteks urea ja salitsüülhape. Uued tooted, mille tootmiseks on võimalik kasutada potentsiaalselt suures koguses CO₂ ning mille tootmise tehnoloogia on saavutanud arvestatava TVT, võib jagada omakorda kaheks: need, mille tootmiseks on vaja vesinikku ning need, mis vajavad erinevaid orgaanilisi või anorgaanilisi lähteaineid. Esimesse gruppi kuuluvad nt metanooli, sünteesgaasi ja metaani tootmine. Teise gruppi kuuluvad dimetüülkarbonaat või erinevad polüoolid ja CO₂ mineraliseerimisel karbonaathenditeks saadavad ehitusmaterjalid. Üks olulisemaid valdkondi, kus CO₂ saab kasutada, on tsemendi tootmine, kus CO₂ süstitakse betooni selle valmistamise käigus. CO₂ reageerib tsemendis oleva kaltsiumhüdroksiidiga (Ca(OH)₂), moodustades kaltsiumkarbonaadi (CaCO₃). See mitte ainult ei seo CO₂, vaid ka parandab betooni survetugevust ja vastupidavust.

Keemiliselt muundamata CO₂ leiab kasutust ka toiduainetetööstuses. Seda kasutatakse jookide karboniseerimiseks, toiduainete säilitamisel ja pakendamisel, kus see aitab takistada mikroorganismide kasvu ning pikendab toodete säilivusaega. CO₂ kasutatakse kasvuhoonetes, et tõsta taimede saagikust.

CO₂ kasutamise tehnoloogiate võrdlus on põhjalikult käsitletud projektis „Kliimamuutuste leevendamine läbi CCS ja CCU tehnoloogiate (ClimMit)“. Selle tulemused on esitatud lühidalt Tabel 4.

Tabel 4. CO₂ kasutamise tehnoloogiad ning peamised näitajad nende omavaheliseks võrdlemiseks ja hindamiseks

Toode, kasutus	TVT	CO ₂ sidumine, t CO ₂ /t toode	Hinnanguline maailmaturu maht, Mt	Ligikaudne maailmaturu hind, €/t
Urea	9	0,735	180-200 kasvav	200
Polükarbonaadid	9	0,173	4-5, kasvav	2500-4500
Salitsüülhape	9	0,319	0,17	1500-3000
Metanool	7-9	1,373	65-70, kiirelt kasvav	300-400
Metaan	8	2,6	5000	100-500
Süntetiline diiseli	5-8	2,93	20, kiirelt kasvav	1200
Mikrovetikate, tsüanobakterite, pärmide biomass (fototroofilise konversioon)	7-9	1,8	35, kiirelt kasvav	1000-4000

Toode, kasutus	TVT	CO ₂ sidumine, t CO ₂ /t toode	Hinnanguline maailmaturu maht, Mt	Ligikaudne maailmaturu hind, €/t
Kasutamine kasvuhoonetes	9	0,44 tomatid, 0,31 kurk	>1000, kasvab	1-5 EUR/kg
F-gaaside asendamine	9	1,5 külmutus-seadme kWh kohta	lokaalne turg	
Betoonitooted (tsement ja täitematerjal)	8-9	0,085		150 €/t

Erinevate TVT 8-9 tasemel olevate toodete, mille valmistamisel kasutatakse CO₂, omahinna vahemikud on toodud Tabel 5. Toote omahind on leitud erinevate kirjandusallikate andmete ja hinnangute põhjal, tehes üldistusi, et saada ligikaudne ülevaade omahinna tasemest ja selle sõltuvusest elektri hinnast. Arvutustes on arvesse võetud skaleerimise mõju, kapitalikulud, tooraine ja energia maksumust ning võimalikke heitmetasusid (nt jahutusvee kasutamise keskkonnatasu, reovee puhastuskulu, jäätmekäitlus). Kuna elektri hind mängib toote omahinnas olulist rolli, on analüüsitud kahte erinevat stsenaariumi, et hinnata selle mõju tootmise tasuvusele. Tulemused annavad indikatiivse hinnangu, kuid lõplik omahind sõltub konkreetsetest tehnoloogilistest ja turutingimustest. Üldiselt sõltub toote omahind tugevasti elektri hinnast, eriti vesinikupõhiste tehnoloogiate puhul. Seetõttu võib CO₂ kasutamisel keemiatööstuses olla majanduslik mõttekus eelkõige juhul, kui on tagatud madalad energia- ja toorainekulud.

Tabel 5. Toote omahind (€/t) ja selle sõltuvus elektri hinnast

Toode	Elektri hind, €/MWh	
	100	200
Metanool	1100-1600	2200-2600
Uurea	800-1000	1300-1700
Salitsüülhape	1800-2100	1800-2100
Metaan	3200-5200	5900-9000
Süntetiline diiseli	3200-4900	6000-8500

2. CO₂ PÜÜDMISE REGULATSIOON

Valitsustevahelise kliimamuutuste rühma (edaspidi IPCC) 2018. aasta eriaruandes (IPCC, 2018) prognoositakse, et taastuenergiaallikad annavad 2050. aastal 70–85% elektrienergiast. Koos CCS tehnoloogiate kasutamisega suureneb tuuma- ja fossiilkütuste osakaal, kuna CCS tehnoloogia võimaldab kliimanetraalsuse tingimustes jätkuvalt kasutada fossiilkütuseid. Eriaruandes on hinnatud, et CCS-i kasutamine võimaldaks 2050. aastaks saavutada gaasi elektritootmise osakaaluks ligikaudu 8% ja et selle sajandi jooksul on CDR maht 100–1000 Gt CO₂ ekvivalenti. Tööstuse KHG heitkoguste osas on hinnatud, et 2050. aastal on need 65–90% madalamad kui 2010. aastal. Sellist ulatuslikku vähendamist on võimalik saavutada uute ja olemasolevate tavade ja tehnoloogiate abil, mh kombineerides elektrifitseerimist, vesinikku, biopõhiseid materjale ja CCUS-i.

2019. aastal esitas Euroopa Komisjon teatises „**Euroopa roheline kokkulepe**“ (edaspidi Euroopa rohelepe) uue majanduskasvu strateegia, mille eesmärk on muuta liit õiglaseks ja jõukaks, nüüdisaegse, ressursitõhusa ja konkurentsivõimelise majandusega ühiskonnaks, kus 2050. aastaks ei ole enam KHG netoheidet ja kus majanduskasv on ressursikasutusest lahutatud. Euroopa roheleppega nähakse ette arukam taristu, sh et see soodustaks muuhulgas ka CO₂ kogumist, säilitamist ja kasutamist ning sektorite integreerimist. CCUS on prioriteetse valdkonnana mainitud tööstuse peatükis puhta vesiniku, kütuseelementide, alternatiivkütuste ja energia salvestamise kõrval.

2025. aasta veebruaris avalikustas komisjon „**Puhta tööstuse kokkuleppe**“, mis on tegevuskava EL-i tööstuse konkurentsivõime ja vastupidavuse toetamiseks, sh kiirendades CO₂ heite vähendamist ja ringmajandusele üleminekut. Selles kinnitatakse eesmärki jõuda aastaks 2050 kliimanetraalse majanduseni. Tegevuskava kohaselt on komisjonil plaan aastate 2025–2026 jooksul välja tulla erinevate algatustega, mis toetavad innovatsiooni, tööstuse dekarboniseerimist ja CCUS-i arengut, ühtlasi täiendades seniseid regulatsioone ja arvestuse aluseid.

Euroopa kliimapolitiika raamistiku aastani 2050 sätestab Euroopa Parlamendi ja Nõukogu määrus (EL) 2021/1119, millega kehtestatakse kliimanetraalsuse saavutamise raamistik ning muudetakse määruseid (EÜ) nr 401/2009 ja (EL) 2018/1999 (Euroopa Parlament ja nõukogu, 2021) (edaspidi **Euroopa kliimamäärus**). Varasemalt on EL kehtestanud õigusraamistiku, et saavutada 2030. aastaks KHG heite vähendamise eesmärk 40% (võrreldes 1990. aasta tasemega). Euroopa roheleppe ja kliimamäärusega suurendati seda 2030. aasta eesmärki 55%-ni. Seejuures sätestab Euroopa kliimamäärus 55% eesmärgi õiguslikult siduvana, sh täpsustades, et eesmärgi saavutamisel peavad EL-i institutsioonid ja liikmesriigid seadma prioriteediks vähendada kiiresti ja prognoositavalt KHG heidet ja samal ajal suurendama nende looduslikku sidumist. Seega ei nähta EL-i 2030. aasta eesmärgi saavutamisel olulist rolli tehnoloogilistel CCS lahendustel. Samas 2050. aasta eesmärkidesse panustamist nähakse nii looduslike kui tehnoloogiliste CCS lahenduste poolt, eelkõige aidates vähendada raskesti dekarboniseeritavat protsessiheidet tööstuses. Kliimamääruses sätestatud pikaajalise eesmärgi kohaselt peab EL võtma sihiks saavutada liidu sees 2050. aastaks KHG inimtekkelistest allikatest pärineva heite ja nende neeldajates sidumise vaheline tasakaal kogu majanduses ning kohasel juhul saavutada

pärast seda negatiivsed heitkogused (sh rakendades CCUS tehnoloogiaid). See eesmärk hõlmab EL-i õigusega reguleeritud KHG heidet ja sidumist kogu liidus ning olema käsitletav asjakohaste kliima- ja energiaõigusaktide läbivaatamise käigus. Kliimamääruse kontekstis hõlmavad neeldajad looduslikke ja tehnoloogilisi lahendusi, nagu on aru antud ÜRO kliimamuutuste raamkonventsioonile esitatud liidu KHG inventuurides.

EL-i 2030. aasta kliimaeesmärgi saavutamiseks on vastu võetud sellised õigusaktid nagu Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2003/87/EÜ, millega loodi EL HKS, Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrus (EL) 2018/842, millega kehtestati liikmesriikidele KHG heite vähendamise eesmärgid 2030. aastaks (edaspidi ESR määrus), ning Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrus (EL) 2018/841, millega nõutakse liikmesriikidelt maakasutusest, maakasutuse muutusest ja metsandusest pärineva KHG heite ja nende sidumise tasakaalustamist (edaspidi LULUCF määrus). Just looduslikel süsiniku neeldajatel on oluline roll üleminekul kliimanetraalsusele liidus ning sellega seoses on suur panus eelkõige põllumajandus-, metsandus- ja maakasutussektoril. Üha enam on hakatud kohandama ka EL HKS-i, et energia- ja tööstuskäitised oleksid rohkem motiveeritud CCUS-i investeerima (vt alapeatükk EL HKS-i kohta).

Komisjoni 2020. aasta teatises **strateegia „Talust taldrikule“** õiglase, tervisliku ja keskkonnahoidliku toidusüsteemi edendamiseks“ teatati komisjoni algatusest edendada uut keskkonnahoidlikku ärimudelit, et premeerida tulevases süsinikku siduva majandamise algatuses maahaldajaid KHG heitkoguste vähendamise ja süsiniku sidumise eest. Lisaks on komisjon oma 2020. aasta teatises **„Uus ringmajanduse tegevuskava. Puhtama ja konkurentsivõimelisema Euroopa nimel“** võtnud kohustuse töötada välja süsiniku sidumise sertifitseerimise õigusraamistik, mis põhineb kindlal ja läbipaistval süsiniku arvestamisel ning mille abil jälgitakse ja kontrollitakse süsiniku sidumise usaldusväärust, tagades samal ajal negatiivse mõju puudumise keskkonnale, eelkõige elurikkusele, rahvatervisele või sotsiaalsetele või majanduslikele eesmärkidele.

Eelnevate algatustega seonduvalt on EL-is vastu võetud Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrus (EL) 2024/3012, millega kehtestatakse liidu raamistik süsiniku püsiva eemaldamise, süsinikupõllunduse ja toodetes süsiniku säilitamise sertifitseerimiseks ehk **„Süsiniku eemaldamise ja sertifitseerimise määrus“**. Määrusega luuakse vabatahtlik süsiniku eemaldamise ja mulla KHG heite vähendamise sertifitseerimise raamistik, millega sätestatakse sellistele projektidele EL-i ülesed kvaliteedikriteeriumid ja sertifitseerimise normid ning luuakse vastav liidu register. Määruse kohaselt peavad sellised vabatahtlikul alusel loodud projektid vastama järgmistele kvaliteedikriteeriumidele: kvantifitseeritavus, täiendavus, säilitavus ja kestlikkus. Määruse alusel on komisjonil õigus võtta vastu delegeeritud õigusakte, määramaks kindlaks sertifitseerimismetoodikad tegevustele/projektidele, mis on seotud kas süsiniku püsiva eemaldamisega, süsinikupõllundusega või toodetes süsiniku säilitamisega. Esimese alla loetakse näiteks DACCS, BECCS, BioCCS ning keemiliselt püsivalt toodetesse seotud CO₂. Viimase all peetakse antud määruse kontekstis silmas eelkõige puidust ehitusmaterjale ja -tooteid, mis seovad ja säilitavad CO₂. Tänapäevaks on arutelud ekspertgruppides alanud ning valmistatakse ette tehnilisi nõudeid erinevatele sertifitseerimismetoodikatele.

Aastal 2024 avalikustatud komisjoni teatises Euroopa Parlamendile, Nõukogule, Euroopa majandus- ja sotsiaalkomiteele ning regioonide komiteele „Meie tuleviku kindlustamine.

Euroopa kliimaeesmärk aastaks 2040 ja tee kliimanetraalsuse saavutamisele 2050. aastaks, ehitades jätkusuutlikku, õiglast ja jõukat ühiskonda" nähakse CCUS tehnoloogiatel märkimisväärset rolli. Selle teatisega koos anti välja ka komisjoni teatis Euroopa Parlamendile ja nõukogule, Euroopa majandus- ja sotsiaalkomiteele ning regionide komiteele „**Edasipüüdliku EL-i tööstusliku süsinikumajanduse suunas**“, kus on esitatud tegevuskava vajalike CCUS tehnoloogiate kasutuselevõtuks sektorites, kus heidet on raske vähendada. Nende teatistega on komisjon näinud ette, et energiasüsteemi 2040. aastal CO₂ heitevabaks muutmiseks on vaja kõiki heiteta ja vähese CO₂ heitega energialahendusi, sh taastuvad energiaallikad, tuumaenergia, energiatõhusus, energia salvestamine, CCUS, maapõue- ja hüdroenergia ning kõik muud olemasolevad ja tulevased nullnetotehnoloogiad. Tähelepanuväärne on komisjoni nägemus, et igasugune veel toimiv fossiilkütuste põletamine tuleks siduda võimalikult kiiresti CCUS tehnoloogiaga.

Komisjoni ettepanek 2040. aasta eesmärgi kohta kätkeb endas CCUS tehnoloogiate varasemat kasutuselevõttu. Osa sellest annaks panuse CO₂ tööstuslikku eemaldamisse, mis täiendaks CO₂ sidumist maasektoris – biomassis ja mullas – ning aitaks saavutada KHG netoheite 90% vähendamise eesmärki. Selleks on vaja erinevaid valikuvõimalusi nagu bioenergia tootmine koos CO₂ kogumise ja säilitamisega (BECCS), CO₂ kogumine otse atmosfäärist ja selle säilitamine (DACCS) ning võimalik et ka muid uudseid lähenemisviise. CCUS tehnoloogiate abil saab vähendada CO₂ heidet tööstussektorites, kus selleks muid lahendusi ei ole, säilitades süsinikku püsivalt maa all või toodetes ning asendades praegu paljudes tööstusharudes lähteainena kasutatava fossiilset päritolu süsiniku mitte-fossiilse süsinikuga. CO₂ kogumine jääb edaspidi oluliseks, et jõuda 2050. aastaks nullnetoheiteni ja seejärel absoluutse negatiivse heiteni. EL-i 2040. aasta kliimaeesmärki käsitleva teatise modelleerimistulemused näitavad, et 2040. aastaks tuleks koguda ligikaudu 280 miljonit tonni ja 2050. aastaks ligikaudu 450 miljonit tonni CO₂. Seejuures peaks 2040. aastaks ligi pool igal aastal kogutavast CO₂-st pärinema biogeensetest allikatest või otse atmosfäärist.

Tööstusliku süsinikumajanduse teatises on komisjon näinud ette, et sel kümnendil keskendutakse peamiselt CO₂ kogumisele protsessiheitest ning osale fossiilsetest ja biogeensetest CO₂ allikatest pärit heitest. Lisaks looduslikele CO₂ sidujatele ja süsinikku siduvale põllumajandusele on 2050. aastaks kogu majandust hõlmava kliimanetraalsuse saavutamiseks vaja süsiniku tööstuslikku sidumist biogeensetest ja atmosfääriallikatest juba enne 2040. aastat, et tasakaalustada EL-is heidet, mida on raske vähendada, ja saavutada seejärel negatiivne heide. EL-il on juba mitu poliitikavaldkonda, mis toetavad CO₂ kogumist ja säilitamist ja/või kasutamist, ning sellega seotud taristuvajadusi.

Alates 2009. aastast reguleeritakse CO₂ maapõues säilitamist süsinikdioksiidi kogumise ja säilitamise direktiiviga (edaspidi **CCS direktiiv**), milles on sätestatud lubade andmise eeskirjad, et tagada CO₂ säilitamise ohutus ja keskkonnaalane terviklikkus, ning sellega on ette nähtud läbipaistev ja mittediskrimineeriv juurdepääs taristule. Lisaks toetatakse läbivaadatud üleeuroopalisi energiavõrkusid (edaspidi **TEN-E**) käsitleva määruse alusel CO₂ transpordi projekte ning praeguse 14 ühishuvi- või vastastikust huvi pakkuvate projektide loetelu kohaselt on kavandatud kogumaht kuni 103 miljonit tonni CO₂ aastas, mida hoitakse neljas maismaal asuvas säilitamiskohas ja kaheksas või enam asuvas avamerel asuvas säilitamiskohas.

2021. aastal seadis komisjon teatises **kestlikud süsinikuringed 2030**. aastaks kõrge eesmärgi, mille kohaselt kestlik süsinik (st ringlusse võetud jäätmetest (ei sisalda jäätme-põletust), säästvast biomassist või kogutud otse atmosfäärist) peaks moodustama EL-i keemiatööstuses lähteainena kasutatavast süsinikust vähemalt 20% ning tuleks siduda ja püsivalt säilitada vähemalt 5 miljonit tonni CO₂. Lisaks tunnustatakse kavandatavas **nullnetotööstuse määruses** CO₂ kogumist ja säilitamist strateegilise nullneto-tehnoloogiana ja toetatakse projektide kasutuselevõttu regulatiivsete meetmetega, sh kiirendatud loamenetlustega. Ettepanek sisaldab ka eesmärgi, et EL-ile oleks 2030. aastaks tagatud suutlikkus säilitada igal aastal 50 miljonit tonni CO₂, ning ettepanekus antakse nafta- ja gaasitootjatele volitused investeerida asjaomasesse esialgsesse taristusse, tunnustades sektori konkreetset oskusteavet selles valdkonnas.

CO₂ kogumine ja selle ringlussevõtt täiustatud sünteetiliste kütuste, kemikaalide, polümeeride või mineraalide tootmiseks on oluline ja uuenduslik aspekt tööstusliku süsinikumajanduse väärtusahelas. Kogutud CO₂ toodetes kasutamise teatavad viisid (nt ringlussevõetud süsinikupõhised alternatiivkütused energeetika- ja transpordisektoris) on sätestatud **taastuenergia direktiivis** (EL) 2018/2001 ja komisjoni delegeeritud määruses (EL) 2023/1185. Need õigusnormid soodustavad CO₂ kogumisel ja kasutamisel põhinevate kütuste kasutuselevõttu, et asendada peamistes sektorites fossiilkütused, ning tagavad kaitsemeetmed, et kindlustada vajalik minimaalne (vähemalt 70%) KHG heite vähenemine ringlussevõetud süsinikupõhiste vedel- ja gaaskütuste korral.

CCUS tehnoloogiaga kaasnevad mahukad investeeringuid ning see valdkond on EL-is reguleeritud muuhulgas ka Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrusega (EL) 2020/852 kestlike investeeringute hõlbustamise raamistiku kohta ehk nn **taksonoomia määrus**. Määrusega kehtestatakse kriteeriumid, mille alusel määrata kindlaks, kas majandustegevust saab liigitada keskkonnasäästlikuks või mitte. Määrust kohaldatakse nii erinevatele riiklikele meetmetele kui ka finantstoodetele. Määrusega ei keelata otseselt fossiilsete energiaallikatega seotud investeeringute rahastamine, aga tulenevalt aruandluskohustusest ja eesmärgist suurendada keskkonnasäästlike investeeringute osakaalu, tuleneb määruse kohaldamisest fossiilsete allikatega seotud investeeringutele täiendav surve, sh ebasoodsamad tingimused. Määruses loetakse oluliseks kliimamuutuste leevendamisse panustamiseks nii keskkonnaohutut CO₂ kogumist ja kasutamist ning CCUS tehnoloogia ulatuslikumat kasutamist kui ka energiataristu rajamist, puhaste ja tõhusate kütuste tootmist, kuid see majandustegevus ei tohi kaasa tuua sõltuvust CO₂-mahukatest varadest ega takistada vähese CO₂ heitega alternatiivide väljatöötamist ja kasutuselevõttu. See seab aga olulised piirangud investeeringutele seonduvalt fossiilse CCUS-iga.

2.1. EL HEITKOGUSE ÜHIKUTEGA KAUPLEMISE SÜSTEEM

Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2003/87/EÜ, millega luuakse liidus kasvuhoonegaaside lubatud heitkoguse ühikutega kauplemise süsteem ja muudetakse nõukogu direktiivi 96/61/EÜ (edaspidi EL HKS direktiiv), loob aluse KHG heitkoguste kauplemise süsteemile EL-is. EL HKS direktiivi kohaldamisalasse kuuluvad energeetika- ja tööstussektor, lennundussektor ning alates 2026. aastast ka meretransport. Samuti loodi viimase direktiivi muudatusega eraldi kauplemissüsteem maanteetranspordis ja hoonete sektoris kasutatavatele fossiilkütustele, mis käivitub täismahus 2027. aastal.

EL HKS-i direktiivi I lisa tegevusalade hulka on loetletud ka (i) CO₂ kogumine EL HKS-i käitise eesmärgiga seda transportida ja geoloogiliselt säilitada CCS direktiivi kohases säilitamiskohas, (ii) CO₂ transportimine CCS direktiivi kohasesse säilitamiskohta, (iii) CO₂ säilitamine CCS direktiivi kohases säilitamiskohas. Seejuures on oluline mainida, et kui enamusele kohaldamisalasse kuuluvatele tegevusaladele on ette nähtud alumised künnisväärtused, siis CO₂ kogumise, transpordi ja ladustamise kohta neid sätestatud ei ole, mis tähendab, et kõik nimetatud tegevused on EL HKS-i kohuslased.

EL HKS-i direktiivi artiklis 12 on ette nähtud, et lubatud heitkoguse ühikute (edaspidi LHÜ) tagastamise kohustust ei teki seoses selliste heitkogustega, mis on tõendatult kogutud ja transporditud püsivaks säilitamiseks käitisesse, millel on CCS direktiivi kohane kehtiv luba CO₂ geoloogiliseks säilitamiseks. Selle kohta on täpsemad nõuded esitatud komisjoni rakendusmääruses (EL) 2018/2066, mis käsitleb Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiivi 2003/87/EÜ kohast kasvuhoonegaaside heite seiret ja aruandlust ning millega muudetakse komisjoni määrust (EL) nr 601/2012 (edaspidi **seire ja aruandluse määrus**).

Nimelt nähakse seire ja aruandluse määruse artikliga 49 ette, et selline CO₂ heide, mis on EL HKS-i käitise poolt üle antud kas kogumiskäitisele, transpordivõrku või CCS direktiivi kohasesse säilitamiskohta, tuleb käitise KHG heitkoguse aruandes kajastada ülekantud CO₂ heitena. See tähendab seda, et käitaja peab selle teisele käitisele ülekantud CO₂ heitkoguse oma heitkogustest maha arvestama ja seda ka läbipaistvalt aruandes kajastama. Samuti võib käitaja maha arvestada selle CO₂ heitkoguse, mis kantakse käitise üle ja kasutatakse selleks, et toota sadestatud kaltsiumkarbonaati, millega kasutatud CO₂ keemiliselt seotakse. Mõlemad käitised peavad esitama oma KHG heitkoguse aruandes ülekantud CO₂ koguse ning teise käitise tunnuskoodi. CO₂ võivad koguda selleks ette nähtud käitised, mis saavad CO₂ ühest või enamast teisest käitise ülekande teel, või käitised, mille toimingute käigus toodetud kogutav CO₂ eraldub, sama kasvuhoonegaaside heiteloala alusel. Kõik CO₂ kogumise, vaheladustamise, CO₂ transpordi võrku või CO₂ geoloogilise säilitamise kohta transportimisega seotud käitise osad tuleb lisada KHG heiteloale ja need tuleb vastavas seirekavas märkida.

2023. aastal lisati EL HKS-i direktiivi uus artikli 12 lõige 3b, et kaotada kohustus tagastada LHÜ-sid sellise KHG heite eest, mis on kogutud ja kasutatud püsivalt tootes. Aastal 2024 andis komisjon välja delegeeritud määruse, millega täpsustas EL HKS-i direktiivi artikli 12 lõike 3b kohaseid kriteeriume, mille alusel määratakse kindlaks, kas KHG-d, eelkõige CO₂,

on muudetud tootes püsivalt keemiliselt seotuks nii, et need ei satu tavapärase kasutuse korral ega pärast toote olulusringi lõppu toimuva mis tahes tavapärase tegevuse käigus atmosfääri. Ühtlasi esitatakse komisjoni ettepanekus üksikasjalikud nõuded, mis on vajalikud selleks, et tooteid saaks lugeda eespool nimetatud kriteeriumidele vastavaks, ning nimetatakse süsiniku kogumisel ja kasutamisel põhinevad tooted, mida peetakse määruses sätestatud nõuetele vastavaks ja mille suhtes võib seega kohaldada erandit LHÜ-de tagastamise kohustusest. Tooted, mida loetakse nõuetele vastavaks, on mineraalsed karbonaadid, mida kasutatakse järgmistes ehitustoodetes:

- karboniseeritud täitematerjalid, mida kasutatakse sidumata või seotuna mineraalsetes ehitustoodetes;
- tsemendi karboniseeritud koostisosad, lubi ja muud hüdraulilised sideained, mida kasutatakse ehitustoodetes;
- karboniseeritud betoon, sh valmisplokid, sillutuskivid ja poorbetoon;
- karboniseeritud tellised, plaadid ja muud müürikivid.

EL HKS direktiivi artiklis 30 on ette nähtud, et komisjon peab esitama hiljemalt 2026. aasta keskpaigaks Euroopa Parlamendile ja nõukogule aruande koos asjakohase seadusandliku ettepaneku ja mõjuhindanguga selle kohta, kuidas saaks EL HKS-is arvesse võtta atmosfäärist seotud ning ohutult ja püsivalt säilitatud KHG heitkoguseid. Praegu õhust püütud ega biogeenset tööstuslikult püütud CO₂ EL HKS-is arvesse võtta ei saa. Kuna EL HKS ei tunnista negatiivset heidet (nt DACCS, BECCS), ei stimuleeri EL-i süsinikuturu nõuetele vastavuse hind biogeenset ja atmosfäärset päritolu CO₂ kogumist ja säilitamist ning praegu on ainus EL-i tasandi stiimul kättesaadav EL-i innovatsioonifondi kaudu, kust toetatakse CO₂ kogumise ja säilitamise projekte. Nende maht on ligikaudu 10 miljonit tonni CO₂ aastas ja need peaksid hakkama tööle juba 2027. aastal.

2.2. CCS DIREKTIIV

CO₂ keskkonnale ohutu geoloogilise ladustamise seadusandlik raamistik on sätestatud nn CCS direktiivis – Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2009/31/EÜ, milles käsitletakse süsinikdioksiidi geoloogilist säilitamist ning millega muudetakse nõukogu direktiivi 85/337/EMÜ ja direktiive 2000/60/EÜ, 2001/80/EÜ, 2004/35/EÜ, 2006/12/EÜ, 2008/1/EÜ ning määrust (EÜ) nr 1013/2006. Direktiivi eesmärk on tagada olulise CO₂ lekke vältimine või CO₂ poolt põhjustatavate tervise- ja keskkonnakahjustuste vältimine, aga ka CO₂ transpordivõrgustiku ja ladustamiskohtade turvalisuse tagamine. Direktiivi kohaldatakse CO₂ geoloogilisele säilitamisele liikmesriikide territooriumil, nende majandusvööndites ja mandrilavadel ÜRO mereõiguse konventsiooni (edaspidi UNCLOS, inglise keeles *United Nations Convention on the Law of the Sea*) tähenduses. CCS direktiiv on kohaldatav juhul, kui ladustava CO₂ kogus ületab 100 000 tonni. Direktiivi ei kohaldata sellise CO₂ säilitamise suhtes, mis toimub teadusuuringute ja arendustegevuste raames või uute toodete ja protsesside katsetamise eesmärgil.

CCS direktiiv on tinginud muudatused mitmes EL-i direktiivis, et vältida CO₂ geoloogilise ladustamise negatiivset mõju keskkonnale ja inimeste tervisele. Näiteks täiendati CCS direktiiviga Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiivi 2004/35/EÜ keskkonnavastutusest keskkonnakahjustuste ärahoidmise ja parandamise kohta (edaspidi keskkonnavastutuse direktiiv). Keskkonnavastutuse direktiivi artiklisse 3 kohaldamisala kohta lisati CO₂ geoloogilisest säilitamisest tingitud kahjustused, direktiiviga nähakse ette ka nõuded ennetus- ja parandusmeetmete ning liikmesriikide koostöö kohta. EL HKS-i direktiivi artiklis 12 on ette nähtud, et LHÜ-de tagastamise kohustust ei teki seoses selliste heitkogustega, mis on tõendatult kogutud ja transporditud püsivaks säilitamiseks käitisesse, millel on CCS direktiivi kohane kehtiv luba CO₂ geoloogiliseks säilitamiseks.

Eestis on CCS direktiivi rakendamise eest vastutav Kliimaministeerium, direktiivi võttis üle Eesti seadusandlusesse 2011. aastal Keskkonnaministeerium. Riikidevahelise CO₂ transporditorustiku ehitamise korral on vaja valitsuse luba. Kuigi Eesti on muutnud kehtivaid õigusakte, et rakendada direktiivi 2009/31/EÜ CO₂ geoloogilise säilitamise kohta, on lähtuvalt atmosfääriõhu kaitse seadusest endiselt CO₂ ladustamine maismaal ja avamere geoloogilistes struktuurides, v.a teadus- ja arendustegevuse eesmärgil, keelatud. Ka erinevates teadusuuringutes on jõutud seisukohale, et Eesti territooriumil puuduvad olulised võimalused CO₂ ladustamiseks direktiivi 2009/31/EÜ tähenduses. Sellest tulenevalt on Eestis keelatud CO₂ ladustamine nii maismaal kui ka merealadel.

3. CCUS ÄRILINE PERSPEKTIIV

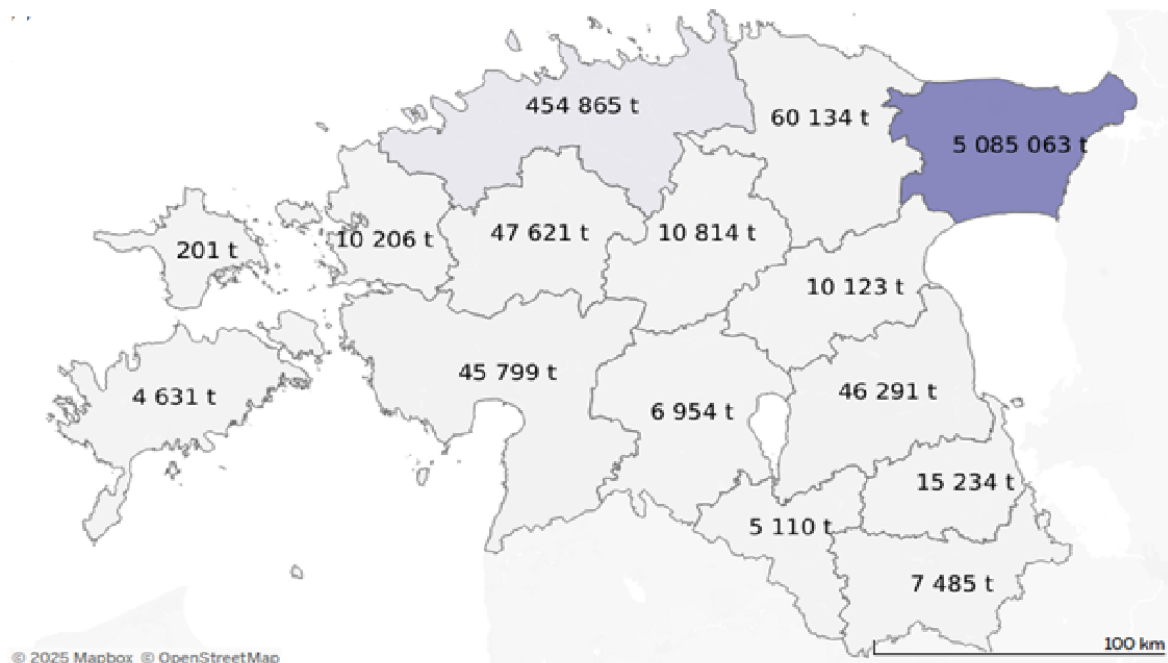
Maailmas toimub CO₂ püüdmise ja kasutamise aktiivne arendamine ettevõtete ja ülikoolide poolt. Eesti Teadusinfosüsteemile (ETIS) tuginedes võib väita, et Eestis on vastavate arenduste ja uuringute arv olnud tagasihoidlik – kokku on võimalik leida infot veidi enam kui 10 teadusprojekti kohta. Seejuures saab kokkuvõtlikult öelda, et Eestis läbi viidud:

- CO₂ püüdmise uuringud on keskendunud põlevkivienergeetikast ja põlevkivitööstusest CO₂ püüdmisele. Nendes uuringutes on katseliselt uuritud või uuritakse kaltsiumi ringlust, hapnikus põletamist ja hapnikukandja ringlust.
- CO₂ kasutamise uuringutest, mille alla kuuluvad CO₂-st nanomaterjalide ja mineraalsete materjalide tootmise alased uuringud, sulasoolade segudes CO₂ elektrokeemilise lõhustamise uuringud, eesmärgiga muuta CO₂ tahkeks süsinikuks, on arendatud välja kaks potentsiaalselt suures mahus CO₂ kasutatavat tehnoloogiat, mis näitab vastavasisuliste teadusuuringute rahastamise olulisust praktilise väljundini jõudmisel.
- CO₂ ladustamise uuringute tulemused näitavad, et reaalne CO₂ ladustamise potentsiaal Eestis puudub, mistõttu tuleb potentsiaalselt püütav CO₂ kasutada või transportida ladustamiseks sobivasse kohta.

Teema vastu Eestis huvi on ja ette on näidata ka märkimisväärseid tulemusi. Kui Eesti soovib selle valdkonna edasi arendamisse panustada ja kaasa mõelda, siis on oluline jätkata vastava teadus-arendustegevuse toetamisega. Võimaluse korral tuleks teadus-arendusasutustel ja tehnoloogiat väiksemas skaalas rakendatavatel ettevõtetel edendada riigi toel rahvusvahelist koostööd, et tagada ligipääs EL rahastusvahenditele.

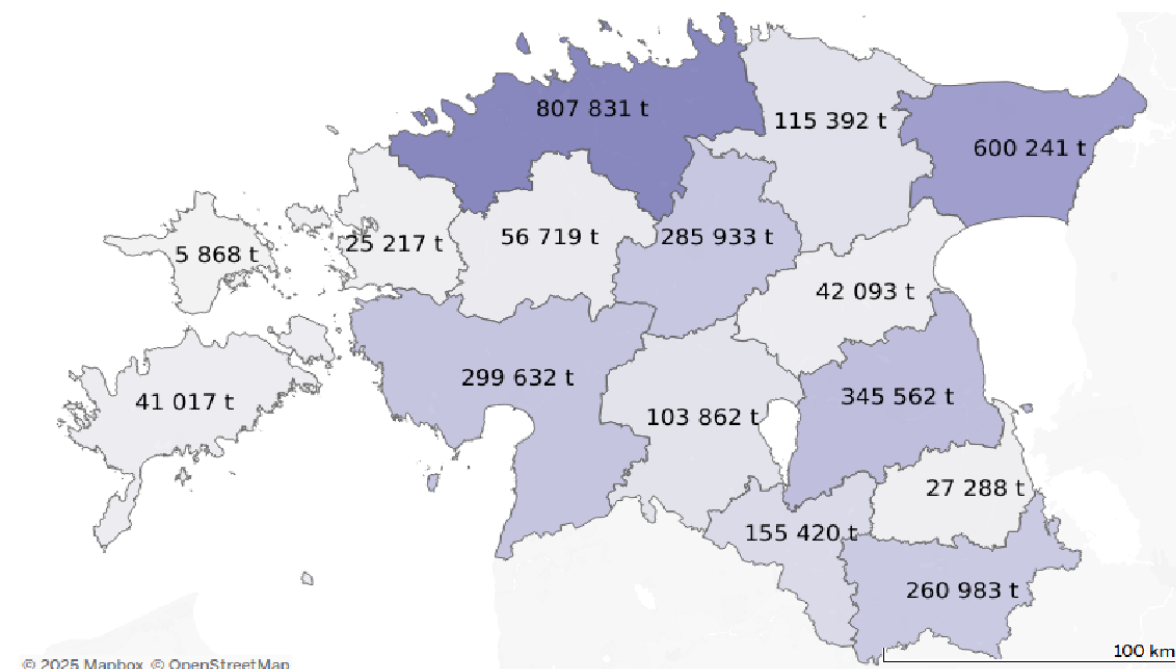
Otsese õhust CO₂ tööstusliku püüdmisega ei ole Eestis seni tegeletud ning ka peatükis 1.1 hinnatud aspektid annavad alust arvata, et tegemist on tänaseks veel lõplikult välja kujunemata tehnoloogiaga (TVT 5–7), mille maksumus on Eestis kasutuselevõtuks liiga kõrge. Sellest tulenevalt ei ole lähima 10 aasta perspektiivis näha Eestis perspektiivi DAC tehnoloogia kasutuselevõtuks ning seetõttu ei käsitleta seda tehnoloogiat ja sellega seotud tegevusi indikatiivses teekaardis peatükis 4. Küll aga on Eestis mõningast potentsiaali teiste CO₂ püüdmise tehnoloogiate (protsessieelne ja protsessijärgne ning protsessis püüdmine), kasutuselevõtuks.

Selleks, et hinnata üleüldist CCUS-i potentsiaali Eestis, tuleb alustuseks vaadata, kus üldse paiknevad suurimad CO₂ allikad, sh nii biogeense kui fossiilse CO₂ osas. Suurimad fossiilse CO₂ punktallikad asuvad peamiselt Kirde-Eestis ja on seotud energiatootmisega (Joonis 5). Suured CO₂ tootjad on ka põlevkiviõli tootmissettevõtted, mis asuvad samuti Kirde-Eestis. Teised tööstused nagu ehitusmaterjalide tootmine, klaasi tootmine ning paberi ja paberimassi tootmine panustavad CO₂ tekkesse marginaalselt (Tabel 6).



Joonis 5. Fossiilse CO₂ heitkogus paiksetest kütistest 2023. aastal maakondade kaupa (Allikas: Keskkonnaportaal)

Biogeense CO₂ tekitajad asuvad võrreldes fossiilse CO₂ tekitajatega rohkem hajali üle Eesti (Joonis 6). Need on peamiselt puiduhaket kasutavad koostootmisjaamad. Summaarselt tekkis biogeenset CO₂ Eesti paiksetes kütistes 2023. aastal 3,2 miljonit tonni.



Joonis 6. Biogeense CO₂ heitkogus paiksetes kütistes 2023. aastal maakondade kaupa (Allikas: Keskkonnaportaal)

Tabel 6. Suurimad CO₂ tekitavad käitised Eestis 2023. aastal (Allikas: Keskkonnaportaal)

Käitis*	Asukoht	Tegevusala	Kütus	Fossiilne/ biogeenne CO ₂	CO ₂ , t/2023 a
Iru elektrijaam	Maardu linn	SEJ	jäätmed	fossiilne	150 000
Balti Elektrijaam	Narva linn	EJ	põlevkivi, biomass	fossiilne biogeenne	493 000 197 000
Eesti Elektrijaam	Auvere küla, Narva-Jõesuu linn	EJ	põlevkivi, uttegaas	fossiilne	1 250 000
Auvere elektrijaam	Auvere küla, Narva-Jõesuu linn	EJ	põlevkivi, uttegaas, biomass	fossiilne biogeenne	680 000 256 000
Kohtla-Järve Põhja soojuselektrijaam	Kohtla-Järve linn	SEJ	uttegaas	fossiilne	620 000
Sillamäe soojuselektrijaam	Sillamäe linn	SEJ	biomass	biogeenne	126 000
Lohkva koostootmisjaam	Lohkva küla, Luunja vald	SEJ	biomass	biogeenne	233 000
Pärnu koostootmisjaam	Pärnu linn	SEJ	biomass	biogeenne	192 000
Tallinna elektrijaam	Tallinn	SEJ	biomass	biogeenne	155 000
Väo reservkatlamaja	Tallinn	SEJ	biomass	biogeenne	266 000
Mustamäe katlamaja	Tallinn	SEJ	biomass, maagaas, põlevkiviõli	fossiilne biogeenne	43 000 112 400
Enefit õlitööstus	Auvere küla, Narva-Jõesuu linn	Põlevkiviõli tootmine	põlevkivi	fossiilne	976 000
Kohtla-Järve Petroter põlevkiviõlitehas	Kohtla-Järve linn	Põlevkiviõli tootmine	põlevkivi	fossiilne	721 000
Kiviõli keemiatööstus	Kiviõli linn	Põlevkiviõli tootmine	põlevkivi	fossiilne	232 000
Kehra paberivabrik	Kehra linn	Paberi tootmine	maagaas, puiduhake, must leelis	fossiilne biogeenne	4030 121 300
Kristiine katlamaja	Tallinn	Katlamaja	maagaas, põlevkiviõli	fossiilne	63 300
Järvakandi klaasivabrik	Järvakandi alev	Klaasi tootmine	maagaas	fossiilne	30 000
Leca Eesti OÜ	Häädemeeste vald	Kergkruusa- tehas	freesturvas, kivisüsi	fossiilne	30 000

* Käitis on paikne üksus, milles toimub tootmistegevus, millega kaasneb saastamine või saastatus. Käitisel kui paiksel heiteallikal võib olla üks või mitu korstent. Mitme korstna korral tuleb arvestada ka mitme CO₂ püüdeseadme investeringuga. Samas annab lähestikku paiknemine soodsamad

tingimused kinnipüütud CO₂ transpordiks. Tabelis 6 on esitatud käitise aastane CO₂ heide kõikide korstende peale kokku.

Fossiilset CO₂ tekkis 2023. aastal Eesti paiksetes käitistes 5,8 miljonit tonni. Enam kui 100 000 tonni aastase heitemahuga allikad (kokku 14 käitist) katavad ligikaudu 79% kogu heitest. Suurimate heiteallikate aastane heide võib ületada 0,5 miljonit tonni CO₂. Alla 10 000 tonnise aastase heitkogusega käitiste koguheitmed on umbes 480 000 tonni aastas, mis on võrreldav suurimate allikatega. Samade 14 käitise (vt tabel 6) biogeense CO₂ heitkogused ulatuvad 3,17 miljoni tonnini aastas ehk umbes 55% fossiilsest CO₂ heitkogusest.

Võib eeldada, et tulenevalt kliima- ja energiaeesmärkidest väheneb fossiilse CO₂ kogus lähima kümnendi jooksul märkimisväärselt, mis muudab fossiilse CO₂ jaoks CCUS tehnoloogiate arendamise Eestis vähem perspektiivikaks. Seda ei toeta EL-i algatused ja regulatsioonid, v.a CCUS-i rakendamine EL HKS käitistes, mis on praeguste arvestusreeglite järgi lubatud ja seeläbi ka stimuleeritud. Eestis ega lähiriikides aga sobilikke CO₂ ladestuspaiku ei ole, seega on ainuke potentsiaal kinni püütud fossiilsest CO₂ mineraalsete ehitusmaterjalide tootmine, mida saab EL HKS-is koguheitest maha arvestada. Teistel juhtudel, nt fossiilsest CO₂-st kütuse või muude toodete tootmisel toetavat regulatsiooni ei ole ning taksonoomia määrusest tulenevalt võib olla pigem raskusi sellistele projektidele rahastuse leidmisel.

Eesti energeetikas on võetud selge suund fossiilkütustest (eelkõige põlevkivi-energeetikast) väljumisele ja taastuvate energiaallikate kasutuselevõtule. Isegi kui tehakse lõplik otsus gaasielektri jaamade (kokku kuni 1200 MW, kus maagaasi põletamisel tekiks ca 400 000 tonni CO₂ aastas) rajamise kasuks, siis tuleb arvestada, et juhul kui need varustatakse CO₂ püüdmise tehnoloogiaga, siis mastaabiefekti saavutamiseks peaksid gaasielektri jaamad olema pidevas töös. Nn tipuelektri jaamade varustamine CO₂ püüdmise tehnoloogiaga ei ole tehnoloogiliselt ega majanduslikult mõistlik. Just kiiremini käivitatavus on peamisi põhjusi, miks sellist investeeringut varustuskindluse tagamise seisukohalt kaalutakse. Samas, gaasielektri jaamade rajamise otstarbekus on küsitav olukorras, kus on olemas biomassi ja põlevkivi koospõletamist võimaldavad energiaplokid, mis oleks edukalt varustatavad CO₂ püüdmise tehnoloogiaga ning mis sellisel juhul tagaksid pideva elektritootmise baaskoormuse CO₂ negatiivselt (Tallinna Tehnikaülikool ja Tartu Ülikool, 2021) ja tugineksid kohalikule prognoositava hinnaga kütuseressursile, tagades seega energiajulgeoleku. See eeldaks nende jaamade pidevat käitamist baaskoormuse tagamiseks, mis omakorda loob paremad eeldused CO₂ püüdmise tehnoloogia edukaks kasutamiseks.

Tööstussektoris, kus on jätkuvalt vajalik fossiilsete kütuste kasutamine, on CCUS kasutuselevõtt hiljemalt aastaks 2050 möödapääsmatu (juhul kui seda fossiilset CO₂ heidet ei kompenseerita mõnes teises käitises kinni püütud biogeense CO₂-ga). Tegemist ei ole heitkoguste mõistes suurte käitistega, kuid kliimanetraalsuse eesmärgi saavutamiseks ja samal ajal oma toodete tootmisega jätkamiseks on ilmselt nendel käitistel tarvilik vahetada kas energiakandjat (mis sageli ei ole võimalik) või siis rakendada CCUS tehnoloogiat, mis selleks hetkeks võib olla jõudnud ka sellisele hinnatasemele, et seda on mõistlik ja võimalik ka sellistes väiksemates käitistes rakendada. Küll aga ei ole seda näha Eestis juhtumas lähima 10 aasta perspektiivis.

Selleks, et fossiilse CO₂ püüdmistehnoloogiad välja arendada ja majanduslikult tasuvaks muuta, on vajalik täiustada EL regulatsioone, et fossiilset CO₂ saaks rakendada ka CCU tehnoloogiates, sh mitte ainult praegu EL HKS-is loetletud püsivalt süsinikku siduvates toodetes, ning seda arvesse võtta ka EL HKS-is. Võimalusel tuleks täiendada EL HKS-is püsivalt süsinikku siduvate toodete nimekirja (lisada sinna tooted, mida Eesti ettevõtted nagu nt UP Catalyst OÜ ja Ragn-Sells AS on plaaninud tootma hakata) või muuta selle arvestusmetoodika aluseid (nt seada arvestuse aluseks vastavus kindlatele vähendamise ja püsivuse kriteeriumidele). Ilma vastavate muudatusteta ei ole võimalik motiveerida fossiilse CO₂ tekitajaid suunama mahukaid investeringuid CCUS tehnoloogiasse või CO₂ kasutajaid võtma kasutusele kinnipüütud fossiilset CO₂.

Samuti on oluliseks tingimuseks fossiilse CO₂ kasutuselevõtul (seda nii põlevkivi- kui muudes tööstustes, kus üleminek biogeensele ja heitevabadele energiaallikatele on keeruline) CO₂ hind EL HKS-is – see peab olema ligilähedane CO₂ püüdmise, transportimise ja kasutamise kogumaksumusega. Et tulevikus on tööstustest kinnipüütud CO₂ kogused Eestis üsna väikesed, siis on vähetõenäoline, et Eesti hakkab siin olema teerajaja ning CCS tehnoloogiad tööstustele välja arendama. Pigem on Eesti tööstussektoris perspektiiv võtta kasutusele mujal välja töötatud ja katsetatud tehnoloogiad. Ning arvestada tuleb, et olemasolevates põletusseadmetes tekkiva CO₂ püüdmiseks on vaja teha peatükis 1.1 nimetatud investeringuid.

Biogeense CO₂ heitkoguste kogumahu on suurte ja väikeste käitiste jaotus mõnevõrra erinev fossiilsete elektrijaamade omast (Joonis 2) – heitkogused on jaotunud ühtlasemalt erinevate maakondade vahel, mitte koondunud ühte nagu fossiilse heite korral. Umbes pool (50% või 1,6 miljonit) biogeensest CO₂ tekib 9 suuremas käitises, mille igapäevane aastane CO₂ heitkogus on üle 100 000 tonni. Sellest tulenevalt on biogeense heite kinni püüdmise rakendamisel, sarnaselt Rootsile ja Soomele (Rosa, Sanchez, and Mazzotti 2021), olemas märkimisväärne potentsiaal Eesti koguheitmete (fossiilsed) vähendamiseks kuni 30% ulatuses (s.o. ligikaudu 1,5 mln tonni aastas) võttes aluseks 2023. aasta ja arvestades ainult üle 100 000 t CO₂ aastase heitega seadmeid.

Minimaalne käitise suurus, mille puhul oleks võimalik rääkida CCUS tehnoloogia kasutuselevõtu otstarbekusest, sõltub paljudest teguritest, kus olulist rolli mängivad lisaks ka allika geograafiline asukoht, läheduses asuvate CO₂-transpordisõlmede olemasolu millest hakkab sõltuma CO₂ transpordi viis ja kulud jne. Kirjanduse kohaselt on CCS-i rakendatavust analüüsitud heiteallikate puhul, mille heitemahud ületavad 40 000 tonni CO₂ aastas (Moreno et al. 2024). Teine väga oluline tegur, mis mõjutab kinnipüüdmise maksumust ja millest sõltub seadme minimaalne suurus, mille puhul oleks majanduslik otstarbekus, on selle konkreetse seadme tööaeg aasta jooksul. Uuringu (Energistyrelsen 2023) kohaselt, see faktor avaldab maksumusele suuremat mõju kui paigaldise suurus. Seega tuleb iga paigaldis individuaalselt analüüsida, pöörates tähelepanu kõikidele selle iseärasustele.

Siinkohal on vaja märkida veel üht eripära, mis on seotud biogeense ja fossiilse CO₂ tekkimisega, nimelt et samas käitises võib üheaegselt kasutusel olla nii fossiilne kui biogeenne kütus. Näiteks Auvere EJ, kus biogeense kütuse osakaal võiks praegu teoreetiliselt ja ka tehniliselt ulatuda 50%-ni siseneva soojushulga järgi. Selles energia-plokis CCS-tehnoloogia kasutuselevõtt tagaks fossiilse CO₂ heitmete täieliku vältimise ning

võimaldaks lisaks atmosfäärist CO₂ eemaldamist koguses -398 kg/MWh (Tallinna Tehnikaülikool ja Tartu Ülikool, 2021). Ümber arvutades aasta kohta ja eeldusel, et energiablokk kasutab 50% fossiilse ja 50% biogeense kütuse segu, ploki töötundide arv aastas 5150 tunni (vastab 2023. a), saaksime 0,7 mln tonni vähem fossiilse CO₂ tekke ja 0,4 mln tonni biogeense CO₂ eemaldamist atmosfäärist. Eesti kontekstis saame siin siiski rääkida peamiselt kinnipüütud biogeense heite kasutamisest erinevate toodete tootmiseks, kuna ladustamisvõimalus siin puudub ning sellise üsna vähese koguse transportimine ja ladustamine on mastaabiefekti puudumise tõttu kulukas.

Eesti biometaanijaamades, mis on pigem väikesed, on märkimisväärne potentsiaal biogeense CO₂ kogumiseks. Anaeroobsel kääritamisel saadud puhastamata biogaas sisaldab ligikaudu 50–70% metaani (CH₄), 30–50% süsinikdioksiidi (CO₂) ja vähesel määral teisi komponente. Biometaani eraldamisel saadakse umbes 98% puhtusega CO₂, mis praegu lastakse otse atmosfääri. Ühes keskmises biogaasijaamas (30 GWh) saab toota ca 4000 tonni CO₂ aastas. Eestis on täna 8 biometaanijaama, kus on võimalik hinnanguliselt toota kokku ca 46 000 tonni CO₂ (

Tabel 7). Lisaks toodetakse biogaasi ka tööstuslikes biogaasijaamades, veepuhastuskäitistes ja prügilates. Võttes aluseks biogaasi tootmiseks sobiliku toorme teoreetilise biogaasi sisalduse ning CO₂ keskmise sisalduse biogaasis, oleks Eesti jääkide ja jäätmete toormel töötavates biometaanijaamades võimalik toota aastas ligikaudu 100 000 tonni CO₂. Juhul kui arvestada ka rohtse biomassi jaamade biogaasi toodangut, oleks teoreetiline aastane tootmiskaht ligikaudu 200 000 tonni (Tartu Ülikool RAKE ja Tallinna Tehnikaülikool, 2024).

Koos suuremates energia- ja tööstusettevõtetes tekkiva biogeense CO₂-ga (vt tabel 6) moodustab see märkimisväärse koguse potentsiaalselt kinnipüütud CO₂, mida oleks võimalik kasutada erinevate toodete ja kütuste tootmisel sisendina. Seda toetavad ka EL regulatsioonid ning vabatahtliku süsinikuturu arengud, kus nõudlus biogeense süsiniku kasutamisele kasvab. Vabatahtlikul süsinikuturul on võimalik juba täna sertifitseerida biogeensest CO₂ toodetud teatud tooteid (biosüsi, mineraalsed ehitusmaterjalid jne). Samas tuleb arvestada, et biometaanijaamadest kinni püütava CO₂ osarõhk on suur ja seetõttu ka selle maksumus oluliselt väiksem, kui paiksetest energeetika- ja tööstuskäitistest väljuvatest suitsugaasidest selle vähese CO₂ kinni püüdmine ja puhastamine.

Biogaasist CO₂ eraldamine Eesti keskmises biogaasi tootmisüksuses maksab suurusjärgus 40–50 €/t, sellele lisanduvad muud kulud, sh transpordikulu (enam kui 1 €/t-km). Koostootmisjaamadest CO₂ kinni püüdmine on kordades (intervjuu käigus ettevõtete hinnangul isegi kuni 10 korda) kulukam tulenevalt väiksemast CO₂ osarõhust ja teistsugusest kasutatavast meetodist ja seadmetest, kuid võib suurte koguste ja EL HKS-i tänasest tasemest oluliselt kõrgema CO₂ hinna juures (eeldusel, et leitakse ka lahendus EL HKS-is selliseid negatiivseid heitkoguseid arvesse võtta) osutada majanduslikult motiveerivaks lahenduseks. Eelnevalt tulenevalt on siiski tõenäolisem, et esimesed väiksemad CO₂ püüdmiseadmed paigaldatakse just biometaanijaamadele, kui turul tekib vastav stiimul ja nõudlus.

Tabel 7. Biometaanijaamad ja hinnangulised CO₂ kogused

Käitaja/ettevõte	Energia	CO₂, t
Rohegaas OÜ	60 GWh	4000
Biometaan OÜ	15 GWh	2000
Vinni Biogaas OÜ	40 GWh	4400
Tartu Biogaas OÜ	40 GWh	4400
Oisu Biogaas OÜ	40 GWh	4400
Bioforce Aravete OÜ	36 GWh	4400
EKT Ekobio OÜ	112 GWh	15000
Ebavere Bioforce OÜ	60 GWh	8000

Lisaks CO₂ tekkimise asukohtadele ja potentsiaalile Eestis tuleb üleüldise CCUS tehnoloogia kasutuselevõtu ärilise potentsiaali hindamiseks analüüsida ka võimalikke CO₂ kasutajaid Eestis. CO₂ suuremad kasutajad Eestis on hetkel toiduainetööstuse ettevõtted. Toiduainetööstus kasutab CO₂ mitmel viisil, kuid kogused on heitmete kogumahuga võrreldes suhteliselt väikesed. Eestis kasutab joogitööstus toodetes CO₂-te hinnanguliselt 5000 tonni aastas ning gaasikeskkonna pakendilahendustes 2000-3000 tonni aastas. Peamised kasutusvaldkonnad on jookide karboniseerimine, toidu säilitamine, kuivjää tootmine, õllepruulimine ja piimatööstus. CO₂ kasutatakse ka kasvuhoonetes taimede kasvu soodustamiseks, kuna see on fotosünteesi oluline komponent. Tavapäraselt on atmosfääri CO₂ kontsentratsioon umbes 400 ppm (osakest miljoni kohta), kuid kasvuhoonetes võib seda tõsta tasemeni 800–1000 ppm, mis võib märkimisväärselt parandada saagikust ja taimede kvaliteeti. Eesti toiduainetööstuses biogeense CO₂ kasutuselevõtmise peamiseks takistusteks on lisaks praegusele pakkumise puudumisele CO₂ hind ja transport. Oluliseks näitajaks on ka CO₂ kvaliteet ja sobivus toodetes kasutamiseks.

Potentsiaalne CO₂ kasutaja Eestis on Ragn-Sells AS, kelle OSA projekt on keskkonnasäästlik algatus, mille eesmärk on toota põlevkivituhast ja CO₂-st kaltsiumkarbonaati ja lubiväetiseid. Projekt keskendub ringmajanduse põhimõtetele, muutes tööstusjäätmed väärtuslikeks toodeteks, mida kasutatakse erinevates tööstusharudes, sh ehitusmaterjalide, paberi ja plastitootmises. Projekti raames on plaanis rajada tootmisüksus, mis suudaks iga-aastaselt töödelda märkimisväärsed kogused põlevkivituhka ja CO₂. Ettevõtte hinnangul suudaksid nad kasutada ca 250 000 t CO₂ aastas. Takistuseks on mitmed EL regulatiivsed nõuded ja ka turunõudlus, millest tulenevalt on projektis võimalik kasutada vaid biogeenset CO₂, samas puudub Eestis praegu motivatsioon biogeenset CO₂ kinni püüda. Turul pakutava kinnipüütud biogeense CO₂ hind on kõrge ja selle kasutamisel ei oleks toode turul konkurentsivõimeline, vaatamata sellele, et seda saaks sertifitseerida vabatahtlikul süsinikuturul. Tekkivat toodet ei loeta EL HKS-is praegu ka püsivalt süsinikku siduvate toodete hulka.

Teine potentsiaalne CO₂ kasutaja on UP Catalyst OÜ. UP Catalyst OÜ on Eesti idufirma, mis arendab tehnoloogiat, mis muundab CO₂ väärtuslikeks süsinikmaterjalideks, nagu grafiit ja süsiniknanotorud. Nende protsess põhineb sulasoola elektrolüüsil, mis võimaldab toota kvaliteetseid süsinikmaterjale otse tööstuslikust CO₂-st, pakkudes keskkonnasõbralikku alternatiivi traditsioonilistele fossiilkütustel põhinevatele meetoditele. Ettevõtte on seadnud eesmärgiks alustada pilootreaktori käivitamist 2025. aastal, mis suudaks

töödelda aastas 100 tonni CO₂ ja toota 27 tonni süsinikmaterjale. Ettevõtte eesmärk on 2030. aastaks kasutada 250 000 tonni CO₂.

Enamikul suurema CO₂ heitega Eesti ettevõtetel siiski ei ole nii selget huvi CCUS-i vastu. Seda tulenevalt asjaolust, et fossiilne CCUS ei ole soodustatud EL regulatsioonidega, Eestis puuduvad ladestusvõimalused ning riik on võtnud selge suuna väljuda aastaks 2035 põlevkivienergeetikast, mis on meie peamine fossiilse CO₂ allikas. Biogeense CO₂ kogused ei ole hetkel Eestis sellised, et tekiks majanduslik mõttekus CCUS tehnoloogiatesse investeerida – biogeense CO₂ tootjad on üle Eesti hajutatud, pigem väikesed, puudub tervikahel ning kindlustunne pikaajalise nõudluse ja pakkumise osas. Arvesse tuleb võtta ka seda, et biogeense CO₂ pakkumine ei saa tulevikus väga palju kasvada tulenevalt survest tagada kestlik majandamine ja saavutada süsinikusidumise kasv maakasutus, maakasutuse muutuse ja metsanduse (LULUCF) sektoris. Mitmetel tööstusettevõtetel ja jäätmepõletustehasel võib tekkida motivatsioon CCUS kasutuselevõtuks tulevikus. Selle realiseerimine sõltub mitmetest majanduslikest ja regulatiivsetest eeldustest nagu kokkuvõtlikult kirjeldatud ka allolevas tabelis (Tabel 8)

Tabel 8. CCUS tehnoloogiate kasutuselevõtu eeldused

	Majanduslikud eeldused	Regulatiivsed eeldused
Fossiilse CO₂ püüdmine, transport ja kasutamine	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ hind, sh EL HKS-is peaks olema kõrgem • Elektri hind, sh võrreldes lähiriikidega CO₂ püüdmisel ja kasutamisel • Toote hind ja tarbijate nõudlus toote järele • Konkurents EL-i väliste tootjatega • Rakendusuuringute ja piloteerimise toetused • Investeeringutoetused CO₂ kinni püüdmiseks • Toetus tervikahela välja-töötamisele ja koostöö arendamisele • Pikaajalise nõudluse ja pakkumise kindlustamine 	<ul style="list-style-type: none"> • Kindlus tuleviku ees pikaajalise investeeingu tegemiseks – hetkel puuduvad EL-is selged suunised ja eesmärgid post-2030 perioodiks • Regulatsioon, mis soodustab fossiilse CO₂ sidumise (CCUS) arvestamist EL HKS-is • CO₂ transporditaristu arendamine ja nõuded EL regulatsioonides • Kvaliteedi nõuded CO₂ kasutamisel
Biogeense CO₂ püüdmine, transport ja kasutamine	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ hind, sh nii EL HKS-is kui ka vabatahtlikul süsinikuturul • Elektri hind CO₂ püüdmisel ja kasutamisel • Toote hind ja tarbijate nõudlus toote järele • Rakendusuuringute ja piloteerimise toetused 	<ul style="list-style-type: none"> • Vabatahtliku süsinikuturu areng ja sertifikaadid • Sertifitseerimise standardid ja meetodid • Riigi tugi sertifitseerimisele • CO₂ transporditaristu arendamine ja nõuded EL regulatsioonides

	Majanduslikud eeldused	Regulatiivsed eeldused
	<ul style="list-style-type: none"> • Investeeringutoetused CO₂ kinni püüdmiseks • Pikaajalise nõudluse ja pakkumise kindlustamine • Toetus tervikahela välja-töötamisele ja koostöö arendamisele 	<ul style="list-style-type: none"> • Nõuded ja arvestuse alused alternatiivkütuste ja süsinikku siduvate toodete tootmiseks

CO₂ kasutajate jaoks on üks olulisemaid aspekte CO₂ hind. Täna saadakse valdavalt CO₂ maagaasi põletamisel ja selle turuhind sõltub ostetavast kogusest. Tavatarbijale maksab nt 50 liitrine balloon ca 100 €. Tööstuslike kasutajate andmetel on CO₂ hind ca 130 €/tonn. Kinnipüütud CO₂ kasutamisele üleminekuks on tarvis, et selle maksumus oleks enam-vähem samas suurusjärgus, kuid täna on see isegi kuni kaks korda kallim. See suurusjärg ei ole väga erinev CO₂ püüdmise maksumusest (tabel 1), kuhu ilmselt tulevad küll muud kulud juurde (transport, logistika, müük jmt.) Seejuures tuleb arvestada, et fossiilse CO₂ eest tuleb täna EL HKS-i turul tasuda ligikaudu 70-80 €/t. Eesti keskkonnatasude seaduse kohaselt soojusettevõtte, kes tekitab taastuvenergia direktiivi säästlikkuse kriteeriumidele mittevastavat biogeenset CO₂, peab alates 2024. aasta 1. juulist maksma saastetasu 25 €/t. Eesti koostootmisjaamad kasutavad valdavalt Eesti metsadest pärit tahket biomasskütust, mis on kooskõlas taastuvenergia direktiivist tulenevate nõudmistega, mis tähendab, et saastetasu tegelikkuses ei rakendu. Saastetasu rakendumisel võiks tekkida motivatsioon CO₂ kinnipüüdmiseks ja lisaks saaks kinnipüütud CO₂ ka kaubana turustada, kui on olemas piisav nõudlus ning CO₂ hind on konkurentsivõimeline. Eestis sellist nõudlust ja turgu veel ei ole.

Lisaks CO₂ hinnakomponendile mõjutab lõpptarbija jaoks CO₂ maksumust ka elektri ja transpordi hind. CO₂ ladustamise võimalused, sh transport ladustamispaika on võrreldes CO₂ kohapealse kasutamisega märkimisväärselt kallimad. Seetõttu on Eestis mõistlik eelkõige arendada CCU-d, mitte CO₂ kinnipüüdmist ja sobivatesse säilitamiskohtadesse transportimist. Ka mujalt CO₂ Eestisse transportimine on kulukas ning seetõttu tuleb tervikahelate väljatöötamisel lähtuda olemasolevatest ja potentsiaalsetest CCUS-i mahtudest. Samas on oluline, et taristu arendamisel tehtaks koostööd laiemal regiooniga ning Eesti oleks osa võimalikust CO₂ transportimise ühenduskoridorist, kui vastavat taristut hakatakse EL-is välja ehitama (Euroopa Komisjon on vastava ettepanekuga välja tulnud nii kestlike süsinikuringete kui ka tööstusliku süsinikumajanduse teatises). Sellisel on võimalik mujal ja ilmselt konkurentsivõimelisema hinnaga kinnipüütud CO₂ siia transportida, kui Eesti ettevõtetel peaks tulevikus CCU-ga seonduvalt vajadus tekkima. Kinnipüütud CO₂ peab vastama kvaliteedinõuetele kasutamiseks toodetes ja olema komprimeeritud või veeldatud ning sobilik transpordiks. Puhtalt elektri hinna seisukohast on ilmselt Põhjamaades võimalik CO₂ kinni püüda oluliselt väiksemate kuludega kui Eestis.

CCUS tehnoloogiate kasutuselevõttu mõjutab ka konkurents EL-i väliste tootjatega. Nii CO₂ tekitajatele kui ka kasutajatele on oluline tagada kindlus pikaajalise nõudluse ja pakkumise osas. Ühelt poolt kindlus, et on olemas vastavad ettevõtted, ja teiselt poolt, et säiliks ka järjepidevus ja õiguskindlus regulatsioonide osas. CO₂ kasutajate jaoks võib olla oluline ka CO₂ päritolu. Biogeense CO₂ kasutamisel saab tootele omastada vastava

kestlikkuse märgise ning teatud tooteid on võimalik sertifitseerida vabatahtlikul süsinikuturul. Hetkel ei toeta EL regulatsioonid fossiilse CO₂ kinnipüüdmist ja kasutamist pikaajalistes toodetes või alternatiivkütustes. Selleks on sobilik biogeenne CO₂ ning nende toodete nimekiri, mida loetakse EL HKS-is süsinikku püsivalt siduvaks, on väga piiratud. Siin aitaks lisamotivatsiooni tuua nimekirja täiendavate toodete lisamine või ka see, kui muudetakse nende toodete EL HKS-is arvestamise aluseid (nt lisatakse ka süsiniktorude ja CaCO₃ tootmine) ja metoodikat (nt arvestades heite vähendamist, püsivat süsiniku sidumist jm tõendatud arvutuste ja sertifikaatide järgi sarnaselt taastuenergia direktiivile). EL HKS-is ei saa praegu arvestada ka negatiivseid heitkoguseid näiteks juhul kui rakendatakse BECCS-i või DACCS-i. Sellise ettepanekuga tuleb komisjon välja 2026. aastal. Samuti puudub regulatsioonides selge suund ja ootus kaugemale kui 2030, mõningal juhul ka 2035. aasta. See on aga vajalik investeerimiskindluse loomiseks ja hinnasignaalsiks.

Seega kokkuvõtlikult võib öelda, et Eestis on olemas mõningane perspektiiv CCUS tehnoloogiate kasutuselevõtuks, kuid seda eelkõige biogeense CO₂ kinni püüdmise ja toodetes kasutamise osas. Eelduseks on fossiilkütuste kasutamisest väljumine. CCUS tehnoloogia kasutuselevõtu võimaldamiseks ja tervikahela välja arendamiseks on vajalikud nii EL ja riiklikud toetused, katseprojektid ja koostöö lähiriikidega kui ka EL regulatsioonide täiustamine, et luua vajalikud stiimulid ja majanduslik tasuvus CCUS investeeringute tegemiseks. Lisaks sellele, et EL üleselt on vaja tekitada stiimul biogeense CO₂ kinni püüdmiseks, tuleb Eestis tegeleda ka taastuenergia kättesaadavuse ja kõrge elektri hinnaga. Lisaks mõningasele biogeense CCUS potentsiaalile tuleb arvestada, et kliimanetraalsusele üleminekuks võib tulevikus CCUS tehnoloogiaid vajada ka fossiilseid energiaallikaid kasutav tööstussektor (klaas, ehitusmaterjalid jt). Ei ole oodata, et vastavad tehnoloogiad Eestis välja töötatakse, vaid pigem on siin perspektiiv võtta kasutusele mujal välja töötatud ja end tõestanud tehnoloogiaid. Selleks aga on vaja võimaldada tööstusettevõtetal teha investeeringuid fossiilsete varadega seonduvalt ning ühtlasi stimuleerida ka sellise fossiilse CO₂ kasutuselevõttu toodetes. Hetkel seavad sellele piirangud nii EL taksonoomia määrus kui ka püsivalt süsinikku siduvate toodete limiteeritud nimekiri EL HKS-is.

4. CCUS TEEKAART AASTANI 2035

Alljärgnevalt on Tabel 9 nimetatud peamised valdkonnad ja tegevused, mis on vajalikud tervikliku CCUS väärtusahela välja arendamiseks Eestis. Eestis CCUS tehnoloogiate kasutuselevõtu arendamisel kuni aastani 2035 tuleks keskenduda eelkõige poliitika-meetmetele ja võimaldava õigusraamistiku väljatöötamisele ning erinevate teadus-arendus- ja katseprojektide elluviimisele.

CCUS tervikahela väljaarendamine ei ole Eestis hetkel majanduslikult tasuv ning seetõttu on riigi rahaline toetus ettevõtjate motivatsiooni ja nõudluse-pakkumise suurendamiseks väga oluline. Riigi poolt toetatavad katse- ja näidisprojektid on oluliseks sisendiks edasiste tegevuste planeerimisel ja nende kaudu on võimalik hankida kogemusi väärtusahelate toimimiseks vajalike majanduslike ja tehnoloogiliste eelduste, rahvusvaheliste koostöö-võimaluste ja õigusruumi kujundamise vajaduste kohta.

Väga oluliste sammudena tuleb eraldi välja tuua tegevused, mis aitavad kujundada ja luua regulatiivset raamistikku, mis suurendaks energeetika- ja tööstusettevõtete motivatsiooni CCUS tehnoloogiate arendamiseks ja kasutuselevõtuks, aga ka kinnipüütud CO₂ kasutamiseks toodetes. Eelkõige tuleb siinkohal teha lobitööd EL suunal, et vajalikud muudatused saaksid sisse viidud olemasolevatesse regulatsioonidesse ning ka uued EL algatused arvestaksid meie ettevõtete vajaduste ja arendustegevustega.

Tabel 9. CCUS tehnoloogiate kasutuselevõtu teekaardi tegevused aastani 2035

Eesmärk	Tegevused ja vastutajad	Ajaraam
Poliitilise visiooni loomine	Töötada välja riiklik CCUS teekaart (nt osana Kliimakindla majanduse seadusest) ning seada selge kvantifitseeritud eesmärk tööstusliku CCUS tehnoloogia arendamisele ja rakendamisele Eestis, sh võimalik vahe-eesmärk aastaks 2040. Seatud CCUS eesmärk peab olema osa pikaajalisest poliitilisest visioonist ja seotud teiste pikaajaliste eesmärkidega, sh nii tööstus-, energia- kui ka kliimapolitikas. Lisada CCUS arenguks Eestis vajalikud eeldused ja tegevused riiklikesse strateegiadokumentidesse nagu nt Eesti 2035, ENMAK 2035, Kliimakindla majanduse seadus, Kliimapolitika põhialused aastani 2050 jne. Koostöös huvirühmadega kujundada vastavad poliitikad ja meetmed, mis toetavad CCUS eesmärgi saavutamist, ning viia need sisse siseriiklikesse strateegiadokumentidesse ja regulatsioonidesse. Pikaajalise eesmärgi seadmine aitab suurendada ettevõtete investeerimiskindlust ja motivatsiooni seonduvalt CCUS-iga. [Vabariigi Valitsus, Kliimaministerium]	2025 – 2026

Eesmärk	Tegevused ja vastutajad	Ajaraam
Õigusliku raamistiku loomine	Siseriikliku CCUS-i alase õigusekspertiisi loomine ja arendamine, sh tulenevalt uutest EL algatustest ja siseriiklikust strateegiast (sh eesmärgid, poliitika ja meetmed). Õigusraamistiku, sh selle puuduste ja võimaluste kaardistus ja nende kõrvaldamine koostöös ettevõtetega katseprojektide elluviimise raames. [Kliimaministerium, Rahandusministerium]	2025 – 2027
	Aktiivne osalemine EL-i õigusloomes, sh töötades selle nimel, et Eestile sobivad meetodid ja tooted jõuaksid EL regulatsioonidesse. Fossiilse CO ₂ korral tuleb tegeleda eelkõige sellega, et EL HKS-is arvestatavate püsivalt süsinikku siduvate toodete nimekiri täieneks Eesti ettevõtetele sobivas suunas (vt nt UP Catalyst OÜ ja Ragn-Sells AS tooteid, tulevikus võib see nimekiri täieneda) ning taksonoomia määrus ja riigiabi reeglid võimaldaksid investeringuid seonduvalt fossiilse CCUS-iga. Biogeense CO ₂ korral on oluline, et EL HKS-is oleks võimalik arvesse võtta negatiivseid heitkoguseid (BECSS, DACCS) ja laiendataks nimekirja püsivalt süsinikku siduvate toodete osas. Samuti tuleks Eestil töötada selle nimel, et süsiniku sidumise ja sertifitseerimise määruse raames välja töötatavad meetodid toetaksid Eesti ettevõtete arenguid ja arendusprojekte. [Kliimaministerium]	2025 – 2026
	Seire-, aruandluse- ja vabatahtliku sertifitseerimise nõuete sätestamine riiklikul tasemel, sh lähtudes EL-i süsiniku sidumise ja sertifitseerimise määruse nõuetest, aga ka teistest seire- ja aruandluse nõudeid sätestatavatest EL regulatsioonidest (nt RED, EL HKS jne). [Kliimaministerium, Majandus- ja Kommunikatsiooniministerium, EAK]	2025 – 2027
	Erinevate tehniliste nõuete, toodete kvaliteedikriteeriumide ja ohutusnõuete ülevaatamine ning nende puudumisel vajalike nõuete kehtestamine riiklikul tasemel CO ₂ kinni püüdmisele, hoiustamisele, transportimisele ja toodetes kasutamisele. [Majandus- ja Kommunikatsiooniministerium, TTJA]	2025 – 2028
	EL tasemel CO ₂ transporditaristu edendamine, sh seistes selle eest, et Eesti oleks osa sellest üle-	2025 – 2030

Eesmärk	Tegevused ja vastutajad	Ajaraam
	<p>euroopalisest taristust (juhul kui sellist EL-is arendama hakatakse), et meie ettevõtetel tekiks võimalus mujal kinnipüütud CO₂ siin toodete tootmises kasutada. Selleks on vajalik lisaks lobitööle ka regionaalse koostöö arendamine ja ühisprojektid.</p> <p>[Kliimaministeerium]</p>	
Hariduse ja teadlikkuse suurendamine	<p>Tõsta ühiskonna ja ettevõtete teadlikkust CCUS tehnoloogiast ja nende rakendatavusest. Katseprojektide elluviimine, õppekäikude ja koolitusprogrammide korraldamine koostöös Eesti teadusarendusasutustega, sh kaasates ettevõtteid, kogukondi jt huvirühmasid.</p> <p>[Kliimaministeerium, Haridus- ja Teadusministeerium, ETAG, EIS, Eesti ülikoolid]</p>	2025 – 2030
	<p>Suurendada ettevõtete ja teadusarendusasutuste teadlikkust EL-i ülestest tugivõrgustikest ja toetusmeetmetest. Jätkata Eesti ettevõtete ja teadusarendusasutuste abistamisega EL rahastusvahendite hankimisel ja konkurssidel osalemisel.</p> <p>[Kliimaministeerium, Haridus- ja Teadusministeerium, EIS, ETAG, KIK]</p>	2025 – 2027
Rahastusvõimaluste pakkumine	<p>Arendada edasi riiklike toetusi nii teadusarenduseks ja innovatsiooniks kui ka investeringuteks CCUS katseprojektide ja tervikahelate välja arendamiseks. Täna on juba mitmeid toetuskeeme, kuid ka tulevikus on vaja nendega jätkata, sh suunata investeringutoetusi CCUS-ile, et need projektid ei peaks konkureerima energeetika- ja tööstussektoris teiste, sh palju kulutõhusamate projektidega. Võimalikud CCUS projektid ja toetusvajadused on väga hästi kaardistatud Ida-Viru maakonna CO₂ kasutamise arengustrateegias 2021–2030+ ja seetõttu on soovitatav lähtuda konkreetsete riiklike toetusmeetmete disainimisel nimetatud dokumendis toodud detailidest ja numbrilistest väärtustest.</p> <p>[Kliimaministeerium, Haridus- ja Teadusministeerium, Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, ETAG, EIS, KIK]</p>	2025 – 2027
	<p>Töötada selle nimel, et EL järgmine rahastusperiood 2028–2034 võimaldaks suunata rahastust Eesti jaoks olulistesse CCUS tehnoloogiatesse ja vastavatesse</p>	2025 – 2027

Eesmärk	Tegevused ja vastutajad	Ajaraam
	<p>arendusprojektidesse. Võimalusel teha siin koostööd ka lähiriikidega suurema rahastuse ja laiahaardelisemate projektide kindlustamiseks, sh nt transporditaristu välja arendamiseks.</p> <p>[Rahandusministeerium, Kliimaministeerium]</p>	
<p>Regionaalse koostöö edendamine</p>	<p>Laialdasem infovahetus ja koostöö regionaalsete partnerite ja lähiriikidega, et suurendada teadmisi tehnoloogia arengutest, lähiturgude vajadustest ja investeerimisvõimalustest ning koostööprojektides osalemist. Selleks on juba täna loodud mitmeid võrgustikke ja infovahetuse platvorme, kus tasub jätkuvalt ja vastavalt võimalustele osaleda ning suhtlust ja regulaarset infovahetust hoida – see võib kätte tuua nii mõnedki huvitavad ideed, projektid ja koostöövõimalused. Eraldi üksust, suunda või konkreetset tegevuskava koostöö edendamiseks vaja ei ole, vaid eeldus on et ministeeriumid ja allasutused jätkavad nende tegevuste ja suhtlusega, mis juba täna töös.</p> <p>[Kliimaministeerium, Rahandusministeerium, Haridus- ja Teadusministeerium, ETAG, EIS, KIK]</p>	<p>2025 – 2035</p>

SUMMARY

The European Union (EU) has set a goal of reducing greenhouse gas (GHG) emissions by 55% by 2030 and achieving climate neutrality by 2050. Innovative technologies, including CO₂ capture and storage/use (CCUS), play a central role in achieving these goals, helping to reduce carbon emissions and also allowing it to be used as a valuable resource. Several EU regulations have been developed and existing ones amended to enable this. The European Commission plans to continue this in the coming years, as can be read in the Clean Industrial Deal published at the end of February. In 2024, a study on the Estonian GHG budget found that without additional technological CCUS technology in the energy and industrial sectors, Estonia will not be able to comply with the GHG budget that would allow it to stay within the 1.5°C temperature target. Thus, CCUS technologies play an important role in achieving climate neutrality in the energy and industrial sectors, as well as the entire economy.

This roadmap focuses on how CCUS technologies can be implemented in Estonia, including taking into account the local environmental context. The purpose of compiling the CO₂ capture roadmap is to identify the prerequisites necessary for the introduction of industrial or technological carbon capture and storage (CCS) and utilization (CCU) technologies in Estonia until 2035. This timeframe was chosen because of the rapid development of technologies, making longer-term planning less practical. The roadmap addresses the industrial capture and storage/use of both biogenic and fossil CO₂, and the capture of CO₂ from existing installations as well as directly from the air (DAC). The roadmap is based on the research task presented by the Ministry of Climate, previous studies on CO₂ capture and use, international scientific literature and EU regulations. Several companies and experts were involved in the process of compiling the roadmap to ensure the practicality and applicability of the roadmap.

RELEVANCE IN THE ESTONIAN CONTEXT

The relevance of CCUS in Estonia is highlighted by the fact that in 2023, Estonia's stationary installations emitted 5.8 million tonnes of fossil CO₂. The largest sources are in Northeastern Estonia and are primarily linked to energy and oil shale production. Fourteen largest installations emitting over 100,000 tonnes of CO₂ annually account for approximately 79% of total emissions. Annual emissions from the largest sources can exceed 0.5 million tonnes of CO₂. Biogenic CO₂ emissions from these major sources reach 3.17 million tonnes annually, or around 55% of fossil CO₂ emissions. Installations emitting less than 10,000 tonnes annually contribute about 480,000 tonnes in total, roughly equivalent to the emissions of one major source.

Estonia and the EU have both expressed a clear long-term goal to phase out fossil fuels (such as local oil shale in Estonia) and transition to renewable energy. Although energy installations that co-fire biomass and oil shale can be equipped with CO₂ capture technology to ensure constant baseload electricity generation with potentially negative CO₂ emissions, Estonia has instead opted to build gas power plants (up to 1200 MW) that run on imported fossil gas—a decision that raises questions about energy security. Burning

this gas would generate about 400,000 tonnes of CO₂ per year. Unlike local oil shale or biomass, which have relatively predictable prices, this imported solution does not ensure energy security. In the industrial sector, although emissions are relatively small, continued use of fossil fuels is necessary for production. Thus, CCUS deployment by 2050 will likely be essential—unless fossil CO₂ emissions are offset with captured biogenic CO₂ from other facilities. All of this underlines the need to analyse and develop the CCUS field in Estonia.

CCUS TECHNOLOGIES

CCUS comprises a chain of technologies for capturing, transporting, utilizing, and storing CO₂, each with its own challenges and opportunities. Every stage may involve different technology combinations, chosen based on technical and economic considerations.

Given the current technology readiness levels (TRL) of CO₂ capture methods and the nature of installations in Estonia, post-combustion capture technologies — particularly chemical absorption and membrane technologies — are the most promising for use in existing combustion plants. Chemical absorption effectively captures CO₂ from large combustion sources (e.g. Auvere Power Plant) at a cost of €40–120 per tonne of CO₂. Membrane technology is better suited for process gases with higher CO₂ partial pressure, such as those from biomethane production (CO₂ content >15%). The cost per tonne of CO₂ captured in biomethane upgrading units (around 5000 tCO₂/year) is roughly €50, about half of which is capital cost.

Most technological processes, including baseload power plants, are optimized for continuous operation. With growing renewable energy capacity, CO₂ capture technologies must be adaptable to load variations. Membrane systems offer modular scalability, unlike chemical absorption, which faces higher capital costs due to the need to maintain specific gas/absorbent flow ratios. Absorption systems are also unsuitable for frequent start-stop operation, making them impractical for reserve/peak power plants. For new large combustion units, oxy-fuel combustion with in-process capture could be a better solution, with estimated costs of €35–90 per tonne of CO₂. This method allows full-range load operation and negative emissions when biomass is used as fuel.

Direct Air Capture (DAC) costs remain high (well over €100/tCO₂), largely due to electricity prices, and is unlikely to be feasible in Estonia soon.

CO₂ transport options include pipelines, trucks, ships, and rail—technologies with TRL 9. The transport method depends on source and destination locations and volume. Given Estonia's current CO₂ potential and existing installations, road transport is the most suitable short-term option (€1/tCO₂/km). For larger volumes, cross-border infrastructure for storage or utilization must be developed. For long distances (>500 km), shipping is most cost-effective (€0.10/tCO₂/km). Successful international transport depends heavily on cooperation with neighbouring countries and participation in EU-wide CO₂ infrastructure planning.

Storage is required for captured but unused CO₂. Storage options include natural (via photosynthesis or mineral precipitation) and Artificial (geological storage, mineral binding with industrial residues, etc.). Estonia lacks geological storage capacity, making CCS

technologies unfeasible domestically. However, CCS is being developed in Europe and globally, with Norway hosting the first commercial geological storage project. Estimated storage costs are around €15/tCO₂.

Thus, Estonia should focus on producing long-lived, carbon-storing products (CCU) from captured CO₂. CO₂ is an important feedstock in the chemical industry, with expanding uses. These include traditional and newly developed products/chemicals and unmodified CO₂ applications. CO₂ can be stored in products short-term (e.g. fuels) or long-term (e.g. building materials). Producing organics like methanol, methane, or syngas from CO₂ requires hydrogen, making production costs highly dependent on electricity prices — especially for green hydrogen. These products often cost at least twice their current market price. EU regulations favor producing carbon-storing materials and alternative fuels (e.g. methanol, syngas).

CCUS REGULATION

Despite the emphasis in EU strategies on the importance of industrial CO₂ capture, current regulations do not sufficiently incentivize investment into CCUS. The EU has outlined steps to address these issues. Key regulatory challenges include:

- Accounting for captured CO₂ within the EU Emissions Trading System (ETS), especially biogenic and negative emissions;
- Expanding the list of permanently carbon-storing products in the ETS and establishing uniform certification procedures;
- Regulating CO₂ recycling for producing advanced synthetic fuels, chemicals, polymers, or minerals under the Renewable Energy Directive, which currently prioritizes biogenic CO₂;
- Restrictions on CCUS investment under the Taxonomy Regulation (e.g., for fossil-based CCUS).

As CCUS is still a relatively new and partly unregulated field, several new EU initiatives are expected in the coming years, and Estonia must actively participate with clearly defined positions.

CCUS PERSPECTIVES IN ESTONIA

By 2035, Estonia should:

- Develop various national support measures, including for full CCUS chains, and raise public awareness;
- Create a political vision and set clear national targets, including long-term CCUS goals and advocacy towards EU regulatory development;
- Support companies in accessing EU funding and shape a regulatory framework to encourage CCUS development and deployment, as well as the use of captured CO₂ in products.

Following EU CCUS initiatives, Estonia's most promising CO₂ source is biogenic CO₂ (e.g. from biomethane production). In 2023, Estonia produced 3.2 million tonnes of biogenic CO₂, but its dispersion and smaller facility volumes make investment costly. Biogas plants offer more cost-effective capture compared to biomass CHP plants. There are currently 8 biomethane plants in Estonia, with a combined capture potential of around 46,000 tonnes CO₂. Additional sources include industrial biogas plants, wastewater facilities, and landfills. The theoretical national production of biogenic CO₂ could reach 200,000 tonnes/year. Viable CCUS application depends on emitter size (>40,000 t/year preferred), location, and transport options.

There is already market demand for biogenic CO₂, supported by EU regulations. However, the ETS list of permanently carbon-storing products should be expanded (e.g. to include products planned by Estonian companies such as UP Catalyst OÜ and Ragn-Sells AS) or the accounting methodology revised (e.g., based on specific durability and reduction criteria).

Based on shortcomings in domestic political decision-making and the constraints set by the EU's regulatory framework on the use of fossil CO₂, the consensus in CO₂-related discussions is that fossil-based resources should be phased out at all costs. However, in 2025, Estonia made significant decisions related to CO₂ (such as the construction of gas power plants) that considerably increase the country's dependence on imported fossil natural gas. On one hand, this contradicts the EU's climate policy, and on the other hand, it poses a direct threat to energy security. At the same time, Estonia has domestic energy resources—oil shale and biomass—as well as existing mines and infrastructure.

Given the overall turbulence and unpredictability of the economic and security environment, Estonia should prioritize the use of domestic resources in combination with CCUS (carbon capture, utilization, and storage) technologies. This combination would allow for a significant reduction in CO₂ emissions, enable a negative CO₂ emissions balance, keep energy production revenues within the state budget, and ensure supply security during crises.

This approach has:

- a significant geopolitical rationale, as in the event of a health, security or political crisis, access to imported natural gas could be interrupted, whereas the potential production volume of Estonian biogas is estimated to reach up to 1 TWh. Energy production based on local resources ensures better preparedness and reduces dependence on foreign countries;
- an economic rationale, since the cost of producing electricity from oil shale without the price of the European CO₂ allowances is 30–40 €/MWh, whereas producing electricity from natural gas costs 120–150 €/MWh. Meaning that even if implementing the CCUS technology for Oil Shale power production the electricity price will be comparable with natural gas or even less. Moreover, the revenue remains in Estonia, supporting the state budget and local jobs.

The construction of gas power plants that can later be converted to hydrogen depends on the development of hydrogen production and storage technologies. If hydrogen production becomes widespread, ammonia can be produced from it for use in existing oil shale boilers.

Given the evolving health, security and climate policy landscape, supporting the use of oil shale in conjunction with CCUS technologies is both justified and strategically sensible. This approach would ensure energy security, support the local economy, and help to meet climate goals.

KASUTATUD KIRJANDUS

Aspelund, A., Mølnevik, M. J., & De Koeijer, G. (2006). Ship Transport of CO₂: Technical Solutions and Analysis of Costs, Energy Utilization, Exergy Efficiency and CO₂ Emissions. *Chemical Engineering Research and Design*, 84(9), 847–855. <https://doi.org/10.1205/CHERD.5147>

Becattini, V., Gabrielli, P., Antonini, C., Campos, J., Acquilino, A., Sansavini, G., & Mazzotti, M. (2022). Carbon dioxide capture, transport and storage supply chains: Optimal economic and environmental performance of infrastructure rollout. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 117, 103635. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103635>

Brownsort, P. A. (2015). Ship transport of CO₂ for Enhanced Oil Recovery – Literature Survey.

Brunsvold, A., Jakobsen, J. P., Mazzetti, M. J., Skaugen, G., Hammer, M., Eickhoff, C., & Neele, F. (2016). Key findings and recommendations from the IMPACTS project. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 54, 588–598. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2016.07.003>

Callahan, K., Goudarzi, L., Wallace, M., & Wallace, R. (2014). A Review of the CO₂ Pipeline Infrastructure in the U.S. <https://doi.org/10.2172/1487233>

Carbon Dioxide Removal Mission. (2022). Carbon Dioxide Removal Technology Roadmap: Innovation Gaps and Landscape Analysis (Issue August). <https://explore.mission-innovation.net/wp-content/uploads/2022/09/Carbon-Dioxide-Removal-Mission-Roadmap-Sept-22.pdf>

Cui, X., Yan, Y., Ma, Y., Ma, L., & Han, X. (2016). Localization of CO₂ leakage from transportation pipelines through low frequency acoustic emission detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, 237, 107–118. <https://doi.org/10.1016/J.SNA.2015.11.029>

d'Amore, F., Romano, M. C., and Bezzo, F. 2021. "Optimal Design of European Supply Chains for Carbon Capture and Storage from Industrial Emission Sources Including Pipe and Ship Transport." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 109:103372. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103372>.

Decarre, S., Berthiaud, J., Butin, N., & Guillaume-Combecave, J. L. (2010). CO₂ maritime transportation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(5), 857–864. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2010.05.005>

DNV. (2021). Design and operation of carbon dioxide pipelines, Recommended practice.

Han, X., Zhao, S., Cui, X., & Yan, Y. (2019). Localization of CO₂ gas leakages through acoustic emission multi-sensor fusion based on wavelet-RBFN modeling. *Measurement Science and Technology*, 30(8), 085007. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/AB1025>

IPCC. (2018). Global Warming of 1.5 oC. <https://www.ipcc.ch/sr15/>

ISO. (2016). ISO 27913:2016, Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Pipeline transportation systems. INTERNATIONAL STANDARD.

Kaufmann, K. D. (2008). Carbon Dioxide Transport in Pipelines - Under Special Consideration of Safety-Related Aspects. Pipeline Technology Conference.

Kearns, D., Liu, H., and Consoli, C. (2021). Technology Readiness and Costs of CCS.

Kjärstad, J., Skagestad, R., Eldrup, N. H., & Johnsson, F. (2016). Ship transport—A low cost and low risk CO₂ transport option in the Nordic countries. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 54, 168–184. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.08.024>

Knoope, M. M. J., Ramírez, A., & Faaij, A. P. C. (2013). A state-of-the-art review of techno-economic models predicting the costs of CO₂ pipeline transport. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 16, 241–270. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.05.013>

Knoope, M. M. J., Ramírez, A., & Faaij, A. P. C. (2015). Investing in CO₂ transport infrastructure under uncertainty: A comparison between ships and pipelines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 41, 174–193. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.07.013>

Kujanpää, L., Linjala O., and Sampo M. 2024. *Outlook of CO₂ Logistics in Finland for CCUS*.

Lee, S. G., Choi, G. B., Yoon, E. S., Han, C., & Lee, J. M. (2012). Modeling and Simulation of Ship Transport of CO₂. *Computer Aided Chemical Engineering*, 31, 785–789. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59507-2.50149-9>

Li, H., Dong, B., Yu, Z., Yan, J., & Zhu, K. (2019). Thermo-physical properties of CO₂ mixtures and their impacts on CO₂ capture, transport and storage: Progress since 2011. *Applied Energy*, 255, 113789. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113789>

Lu, H., Ma, X., Huang, K., Fu, L., & Azimi, M. (2020). Carbon dioxide transport via pipelines: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121994. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121994>

Martynov, S., Brown, S., & Mahgerefteh, H. (2013). An extended Peng-Robinson equation of state for carbon dioxide solid-vapor equilibrium. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 3(2), 136–147. <https://doi.org/10.1002/GHG.1322>

Mathews W. (n.d.). Failure Investigation Report - Denbury Gulf Coast Pipelines, LLC - Pipeline Rupture/ Natural Force Damage.

Minervini, J., Burrows, J., Pinto, E., & Barlow, H. (2024). Building Our Way to Net-Zero: Carbon Dioxide Pipelines in the United States.

Moreno, D., Bang, A., Nielsen, S., and Thellufsen, J. Z. 2024. "Strategic Management of CO₂: A Scalable Model for CCS in Decarbonised Societies." *Journal of Environmental Management* 368:122175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122175>.

Rosa, Lorenzo, Daniel L. Sanchez, and Marco Mazzotti. 2021. "Assessment of Carbon Dioxide Removal Potential via BECCS in a Carbon-Neutral Europe." *Energy & Environmental Science* 14(5):3086–97. doi: [10.1039/D1EE00642H](https://doi.org/10.1039/D1EE00642H).

Munkejord, S. T., Hammer, M., & Løvseth, S. W. (2016). CO₂ transport: Data and models – A review. *Applied Energy*, 169, 499–523. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.100>

NECCUS and OGTC. WP3: Scale and Cost Reduction. Report for the Scottish Net Zero Roadmap. <https://snzr.co.uk/wp->

content/uploads/2021/09/scale_and_cost_reductions_with_technology_deployment.pdf

Neele, F., De Kler, R., Nienoord, M., Brownsort, P., Koornneef, J., Belfroid, S., Peters, L., Van Wijhe, A., & Loeve, D. (2017). CO₂ Transport by Ship: The Way Forward in Europe. *Energy Procedia*, 114, 6824–6834. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.03.1813>

Noothout, P., Wiersma, F., Hurtado, O., Macdonald, D., Kemper, J., & Van Alphen, K. (2014). CO₂ Pipeline Infrastructure – Lessons Learnt. *Energy Procedia*, 63, 2481–2492. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.11.271>

Ouvray, P., Burger, J., Roussanaly, S., Mazzotti, M., & Becattini, V. (2024). Multi-criteria assessment of inland and offshore carbon dioxide transport options. *Journal of Cleaner Production*, 443, 140781. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140781>

Onyebuchi, V. E., Kolios, A., Hanak, D. P., Biliyok, C., & Manovic, V. (2018). A systematic review of key challenges of CO₂ transport via pipelines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2563–2583. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.6>

Peletiri, S. P., Rahmanian, N., & Mujtaba, I. M. (2018). CO₂ Pipeline Design: A Review. *Energies* 2018, Vol. 11, Page 2184, 11(9), 2184. <https://doi.org/10.3390/EN11092184>

Platform, Z. E. (2020). A Trans-European CO₂ Transportation Infrastructure for CCUS: Opportunities & Challenges.

Rai, A., & Kim, J. M. (2021). A novel pipeline leak detection approach independent of prior failure information. *Measurement*, 167, 108284. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2020.108284>

RMI, & Bezos Earth Fund. (2024). Scaling Technological Greenhouse Gas Removal: A Global Roadmap tp 2050.

RMI. (2023). The Applied Innovation Roadmap for CDR. An independent perspective to guide RD&D funding.

Roussanaly, S., Skaugen, G., Aasen, A., Jakobsen, J., & Vesely, L. (2017). Techno-economic evaluation of CO₂ transport from a lignite-fired IGCC plant in the Czech Republic. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 65, 235–250. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2017.08.022>

Skaugen, G., Roussanaly, S., Jakobsen, J., & Brunsvold, A. (2016). Techno-economic evaluation of the effects of impurities on conditioning and transport of CO₂ by pipeline. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 54, 627–3Standard, C. (2018). Specifications for Engineering of Carbon Dioxide Pipeline Transportation. MIIT.

Tallinna Tehnikaülikool, & Tartu Ülikool. (2021). Kliimamuutuste leevendamine läbi CCS ja CCU tehnoloogiate (ClimMit).

Tan, Y., Nookuea, W., Li, H., Thorin, E., & Yan, J. (2016). Property impacts on Carbon Capture and Storage (CCS) processes: A review. *Energy Conversion and Management*, 118, 204–222. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.03.079>

Tartu Ülikool RAKE & Tallinna Tehnikaülikool (2024). Kestliku biogaasi tootmise ja kasutuselevõtu suurendamise võimaluste analüüs. <https://kliimaministeerium.ee/biogaas>

The European Parliament and the Council of the European Union. (2021). establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law'). Official Journal of the European Union. <https://doi.org/http://data.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj>

Tumara, D., Uihlein, A., & Hidalgo Gonzalez, I. (2024). Shaping the future CO₂ transport network for Europe. <https://doi.org/https://data.europa.eu/doi/10.2760/582433>

ÜRO. (2016). Pariisi kokkulepe. <https://www.riigiteataja.ee/akt/201112016003>

Wallace, M., Goudarzi, L., Callahan, K., & Wallace, R. (2015). A Review of the CO₂ Pipeline.

Wang, J., Ryan, D., Anthony, E. J., Wildgust, N., & Aiken, T. (2011). Effects of impurities on CO₂ transport, injection and storage. *Energy Procedia*, 4, 3071–3078. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2011.02.219>

Weihs, G. A. F., Kumar, K., & Wiley, D. E. (2014). Understanding the Economic Feasibility of Ship Transport of CO₂ within the CCS Chain. *Energy Procedia*, 63, 2630–2637. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.11.285>

Wetenhall, B., Aghajani, H., Chalmers, H., Benson, S. D., Ferrari, M. C., Li, J., Race, J. M., Singh, P., & Davison, J. (2014). Impact of CO₂ impurity on CO₂ compression, liquefaction and transportation. *Energy Procedia*, 63, 2764–2778. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.11.299>

Witkowski, A., Rusin, A., Majkut, M., Rulik, S., & Stolecka, K. (2013). Comprehensive analysis of pipeline transportation systems for CO₂ sequestration. Thermodynamics and safety problems. *Energy Conversion and Management*, 76, 665–673. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2013.07.087>