

Zukünftige “natürliche und technische” CDR-Methoden für Deutschland

Ein ambitioniertes Szenario und ein ganzheitlicher Bewertungsrahmen

Felix Havermann und das CDRterra Team

Wissenschaft trifft Wirtschaft V, Forum 9: CDR in Nordrhein-Westfalen:
Möglichkeiten für eine regionale und industrielle Umsetzung

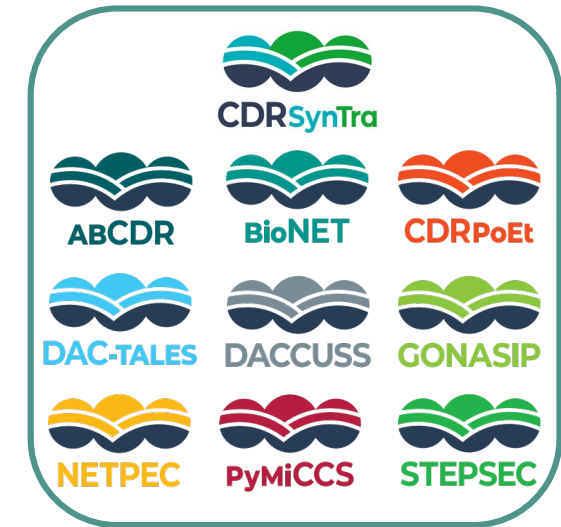
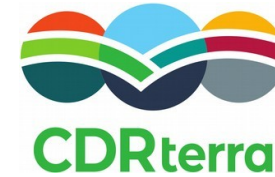
17 September 2026
Wissenschaftspark Gelsenkirchen

Das CDRterra Forschungsprogramm

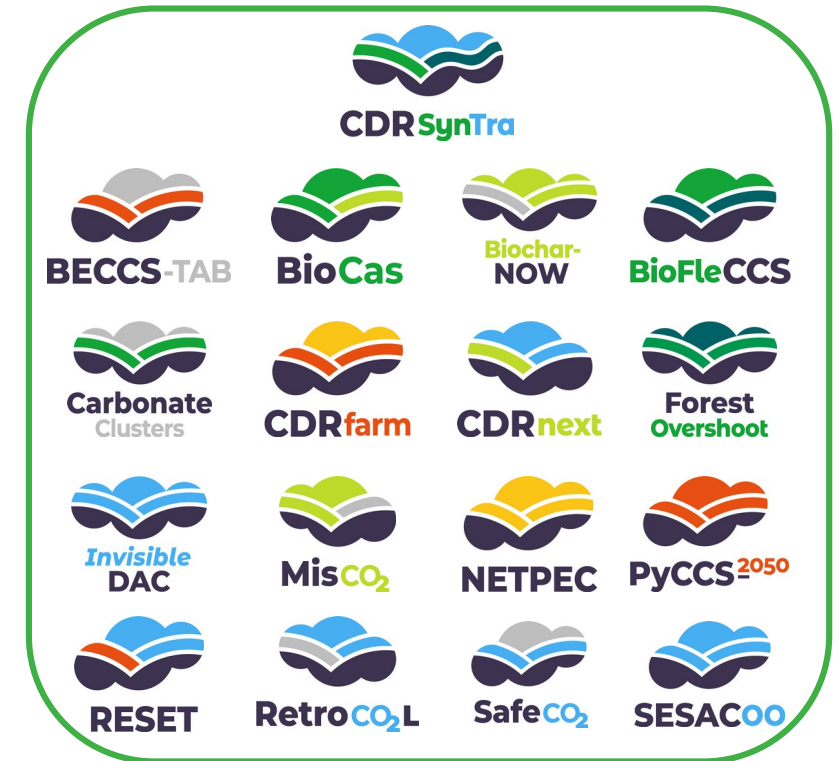
- Personen, die an den Arbeiten und Ergebnissen beteiligt waren:
 - Ein großes Team (~100 Personen) aus interdisziplinären Forschenden von CDRterra
 - Mehrere Kolleg*innen aus dem Partnerforschungsprogramm CDRmare
 - Interessenvertreter*innen aus deutschen Ministerien, der Industrie und der Zivilgesellschaft
- Diverse Formate zur Entwicklung:
 - Wissenschaftliche Workshops
 - Stakeholder Workshops
 - Systematische Literatur Reviews
 - Individuelle Expert*innentreffen



Phase I
(2021-2025)



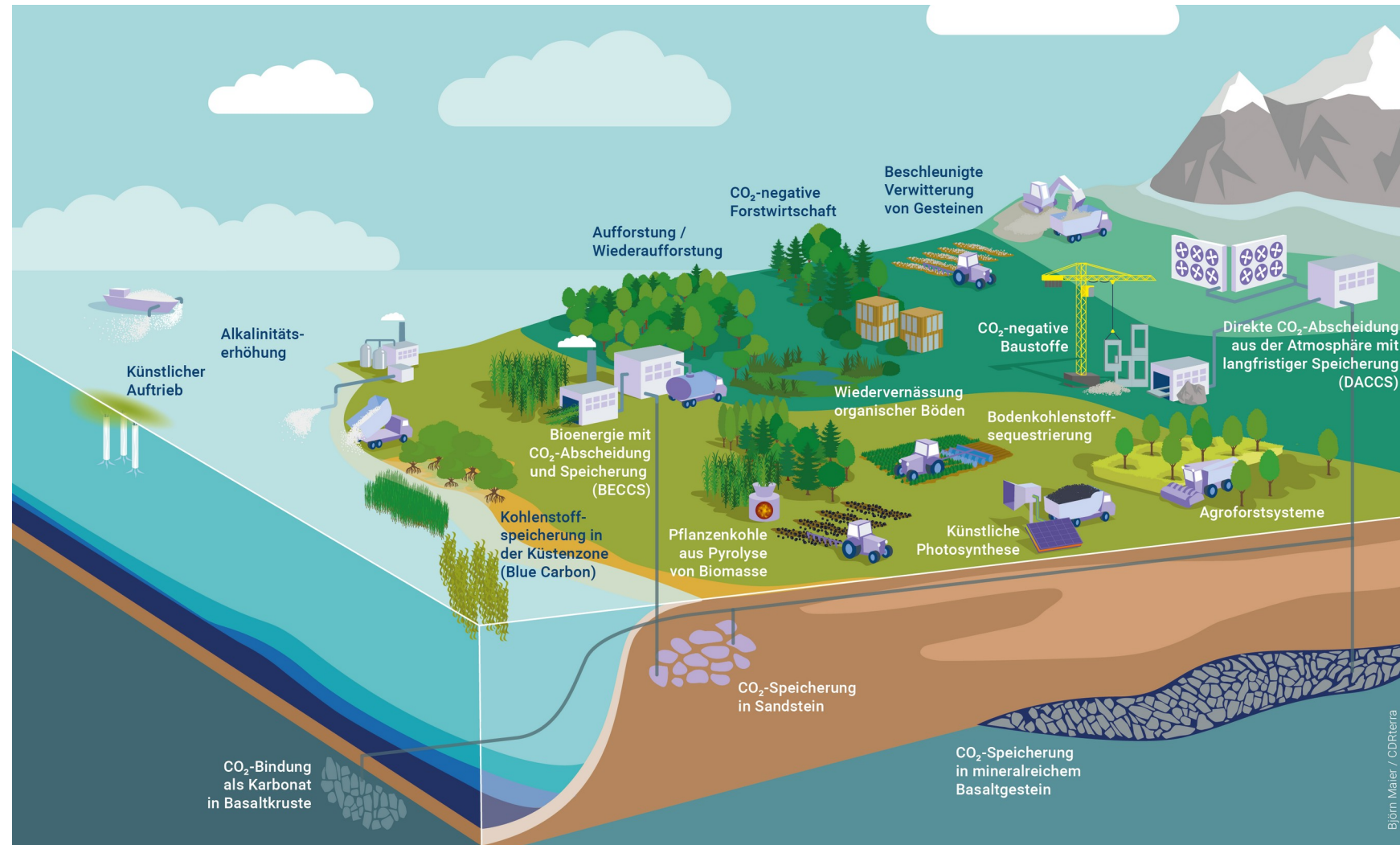
Phase II
(2025-2028)



Was ist Carbon Dioxide Removal (CDR)?

Klimaschutzmaßnahmen:

1. Reduktion aller Treibhausgasemissionen (v.a. CO_2): schnell, tiefgreifend und nachhaltig
2. CDR: Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre und dauerhafte Speicherung

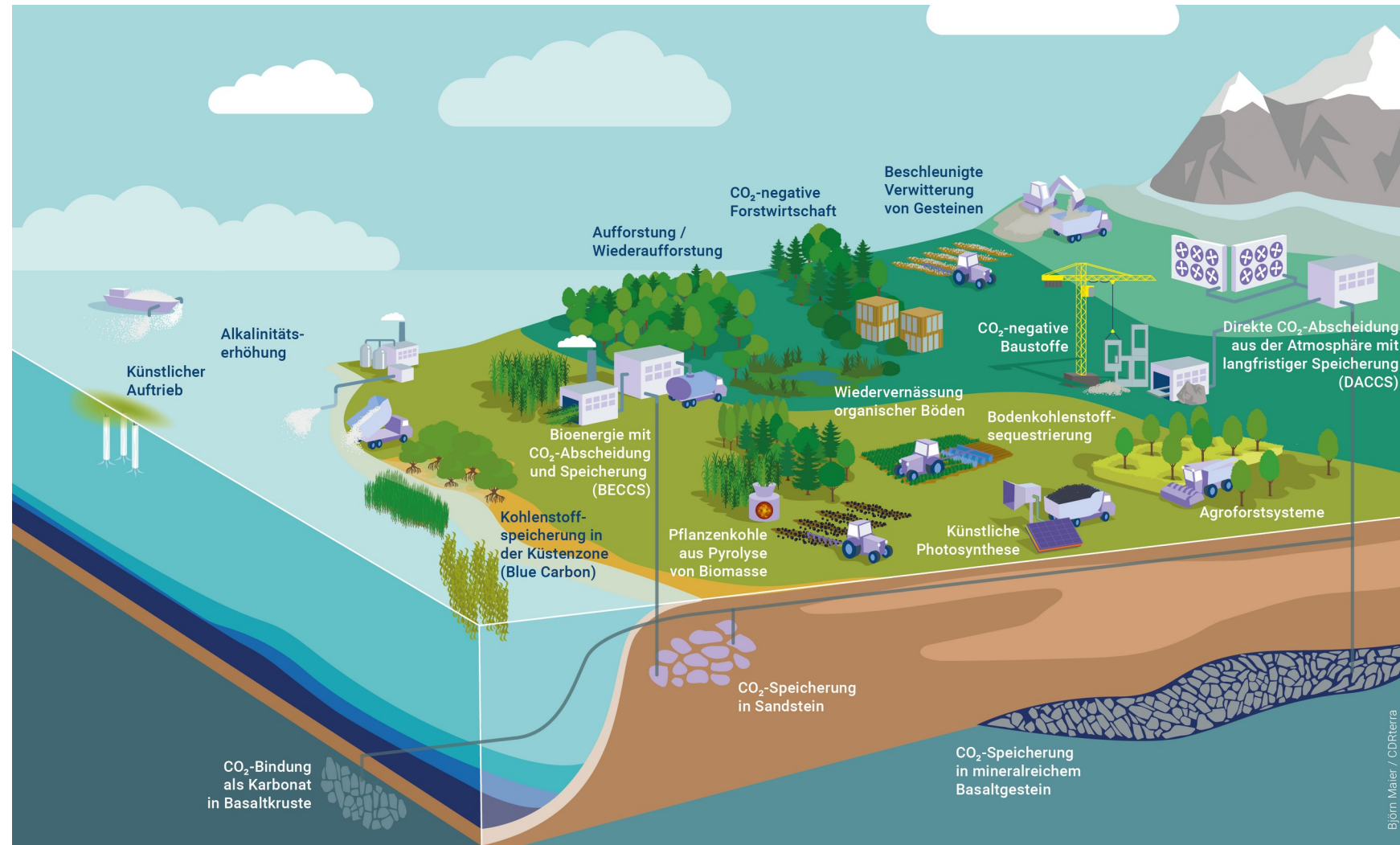


Quelle: Björn Maier (CDRterra)

Was ist Carbon Dioxide Removal (CDR)?

Unterschiede zwischen landbasierte CDR-Methoden:

- **Art der Entnahme:**
Biologisch und (Geo-)chemisch
- **Erforderliche Zwischenschritte:**
Pflanzlicher Stoffwechsel, Pyrolyse, Produktion von Biogas, CO₂-Abscheidung, CO₂-Transport zum Speicher, ...
- **Unterschiedliche Speicher:**
Vegetation, Böden, (marine) Sedimente, Mineralien, geologische Formationen, Baumaterialien, ...
- **Nutzung diverser Ressourcen:**
Wasser, Energie, Landfläche (für Entnahme, Speicherung, Infrastruktur und Transport für Zwischenschritte), ...

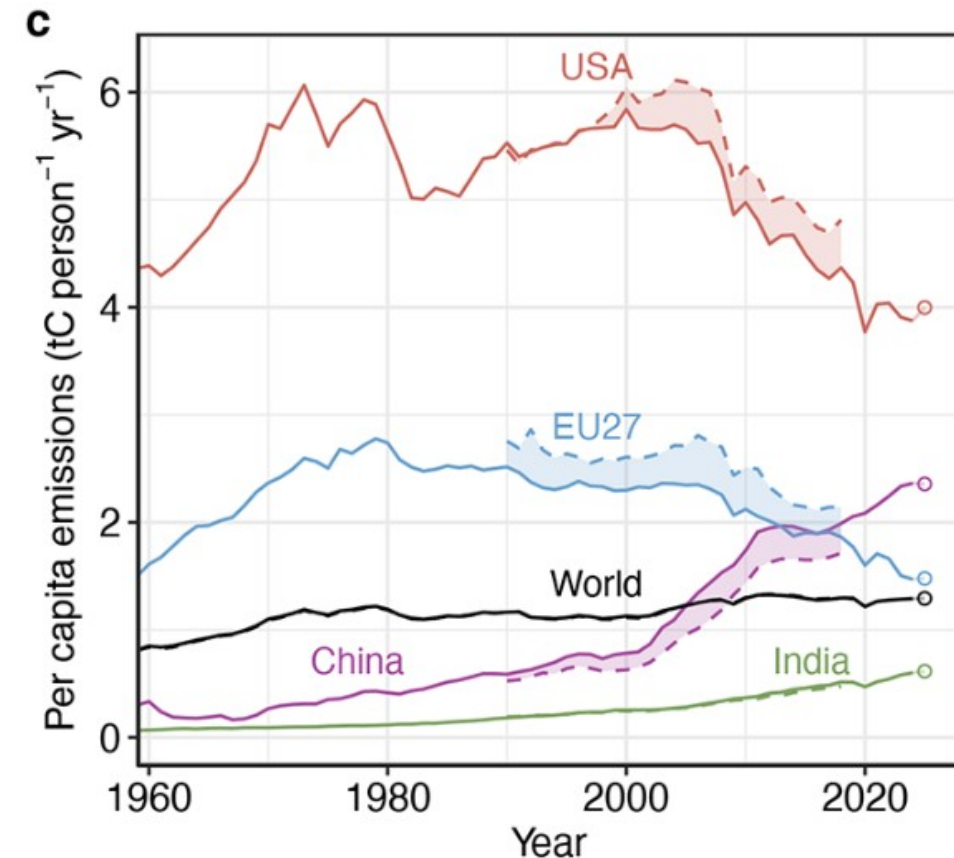
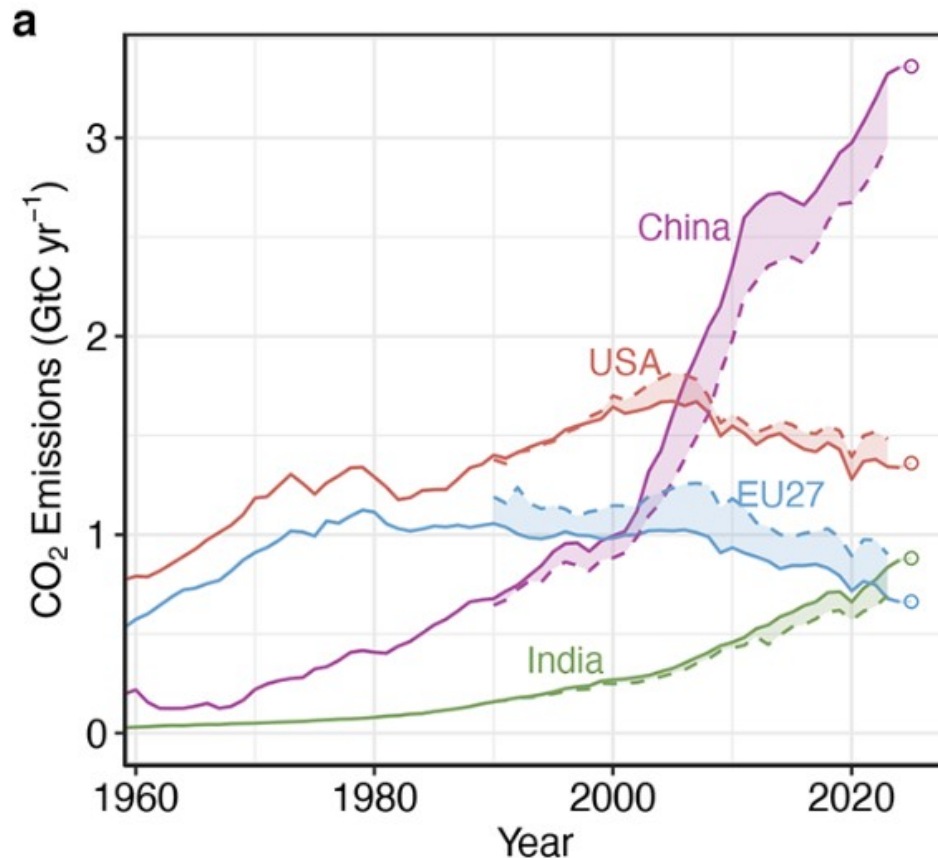


„Natürliche und technische Optionen“ greift zu kurz

Quelle: Björn Maier (CDRterra)

Warum brauchen wir CDR (in Deutschland)?

- Negative Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels werden sich weiter verstärken
→ Extremereignisse werden häufiger, intensiver und länger
- 11 Jahre nach dem Pariser Klimaschutzabkommen (1,5–2°C-Ziel) zeigen die globalen (!) Emissionen keinen Abwärtstrend



Warum brauchen wir CDR (in Deutschland)?

- Negative Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels werden sich weiter verstärken
→ Extremereignisse werden häufiger, intensiver und länger
- 11 Jahre nach dem Pariser Klimaschutzabkommen (1,5–2°C-Ziel) zeigen die globalen Emissionen keinen Abwärtstrend

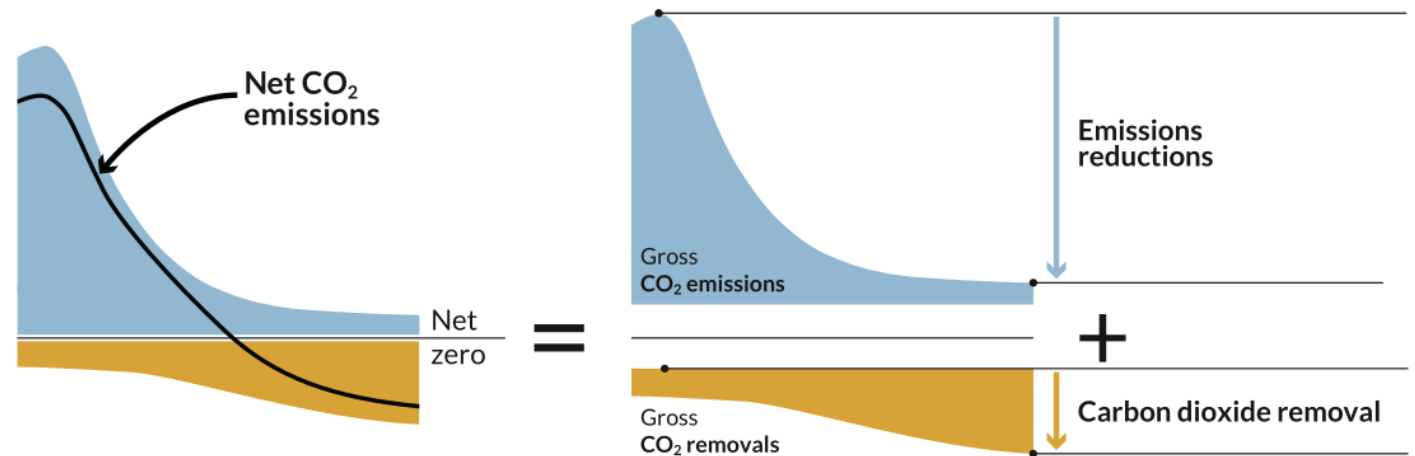
Wie lässt sich 1.5°/Netto-Null/Netto-Negativ erreichen?

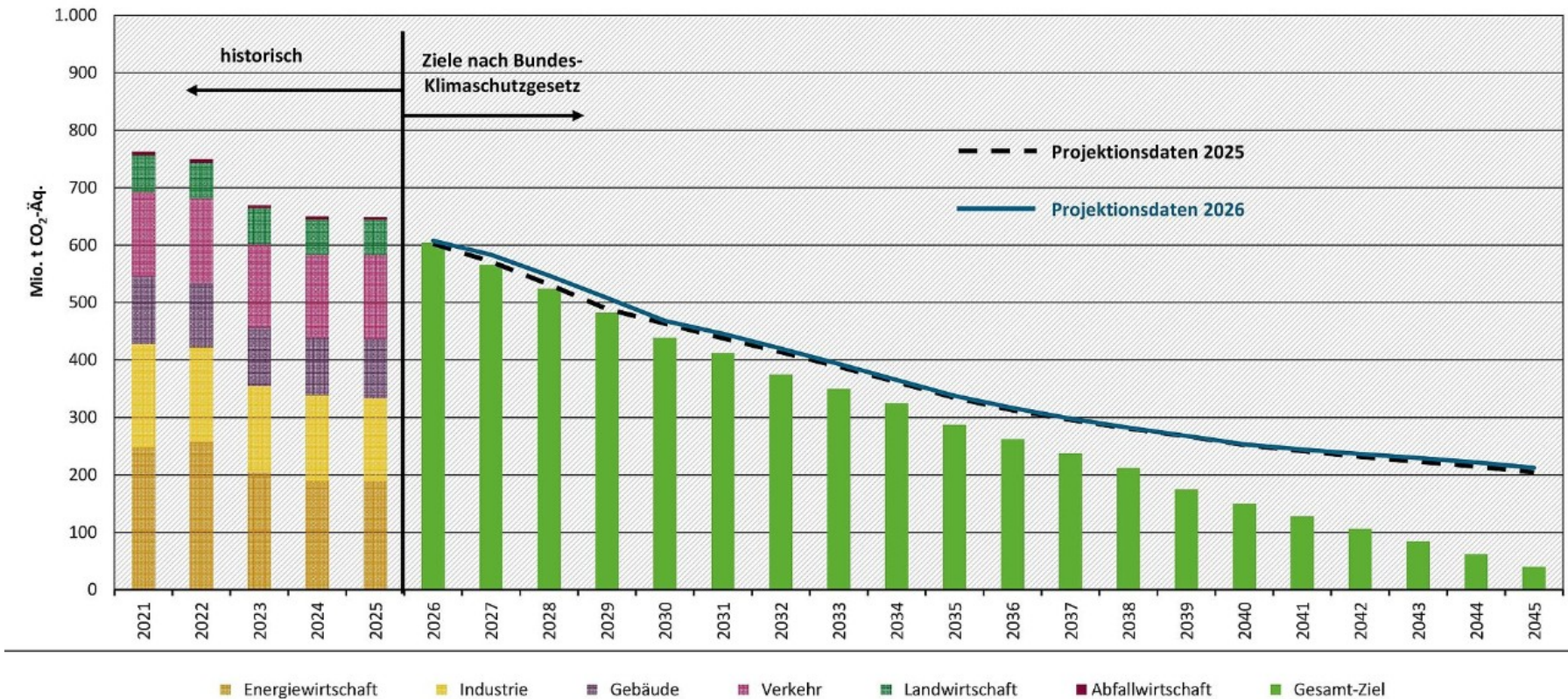
1. Schnelle, tiefgreifende und nachhaltige Reduktion der Treibhausgasemissionen
2. CDR um verbleibende Restemissionen auszugleichen

THG Emissionen in Deutschland:

- **Jetzt:** ~650 MtCO₂e a⁻¹
- **Im Jahr 2045 (=Netto-Null Ziel)**
60-200 MtCO₂e a⁻¹
geschätzte Restemissionen

Both carbon dioxide removal (CDR) and emissions reductions are needed to reach climate targets





Hinweis: Für 2021-2025 wurden die Emissionsdaten 2026 und ab 2026 die rechnerisch angepassten Jahresemissionsmengen verwendet.

Quelle: Eigene Darstellung, Umweltbundesamt; auf Basis historischer Daten Umweltbundesamt THG-Inventar; Projektionen: Öko-Institut, Fraunhofer ISI, Prognos, M-Five, IREES, Thünen-Institut

THG Emissionen in Deutschland:

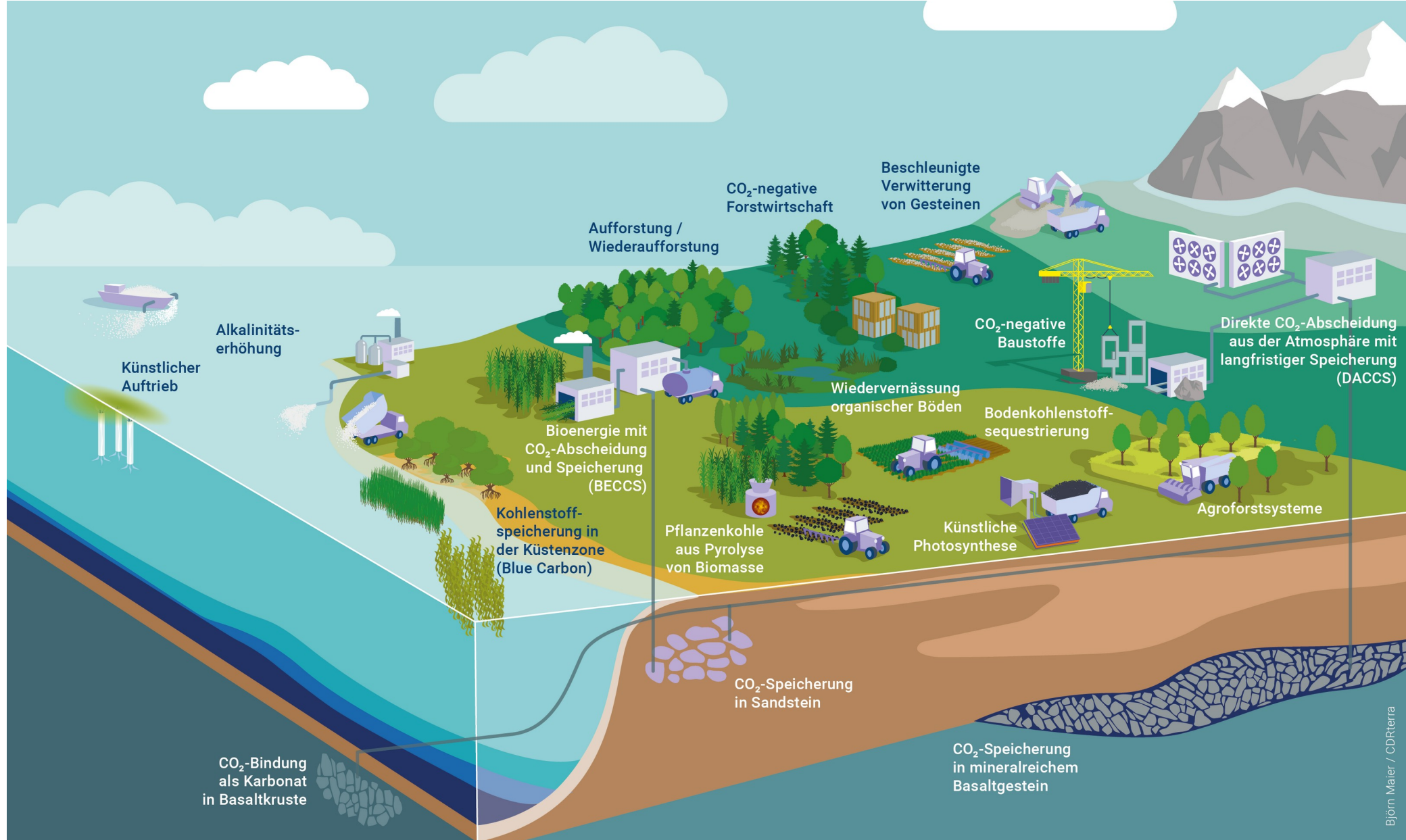
- **Jetzt:** ~650 MtCO₂e a⁻¹
- **Im Jahr 2045 (=Netto-Null Ziel)**
60-200 MtCO₂e a⁻¹
geschätzte Restemissionen

Sektoren mit schwer vermeidbare Emissionen:

- Landwirtschaft (CH₄, N₂O)
- (Fracht-)Transport
- Industrie (Eisen, Stahl und Zement)

1. Welche Optionen stehen zur Auswahl?
2. Ein ambitioniertes Szenario für Deutschland
3. Ein ganzheitlicher Bewertungsrahmen für CDR-Methoden

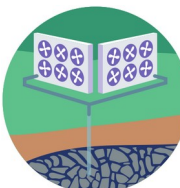
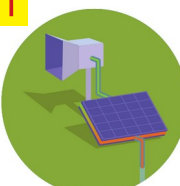
Welche CDR-Methoden stehen zur Auswahl?



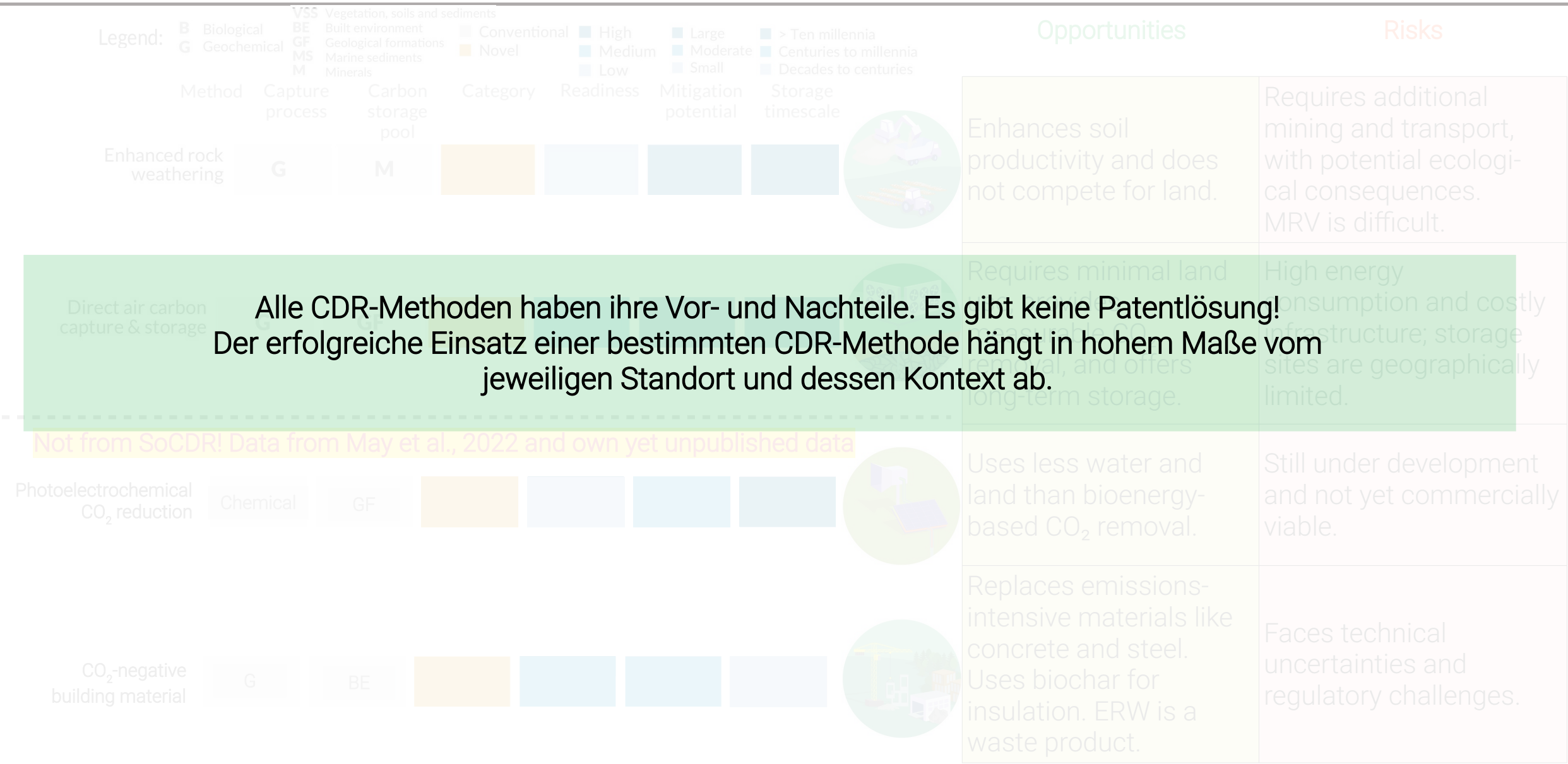
						Potenziale	Risiken	
Method	Capture process	Carbon storage pool	Category	Readiness	Storage timescale			
Afforestation, reforestation, forest management	B	VSS					Fördert die Biodiversität, erhöht die lokale Klimaresilienz und ist kosteneffizient.	Benötigt Land, konkurriert mit der Landwirtschaft und ist anfällig für Waldbrände und Krankheiten.
Agroforestry	B	VSS					Fördert Biodiversität, verbessert Widerstandsfähigkeit gegenüber Extremwetter.	Komplex in der Umsetzung und weniger finanziell unterstützt.
Soil carbon sequestration in croplands & grasslands	B	VSS					Verbessert die Bodenqualität und verringert die Erosion.	Schwierigkeiten bei der Bestimmung der langfristigen C-Speicherung
Biochar soil amendment	B	VSS					Verbessert Bodenfruchtbarkeit, Wasserrückhaltung und speichert Kohlenstoff.	Konkurriert mit Nutzung von Biomasse und setzt bei der Herstellung Partikel frei.
Bioenergy with carbon capture & storage	B	GF					Bioenergie ersetzt fossile Energien und gewährleistet langfristige Speicherung.	Benötigt Land, Wasser und Ressourcen; potenzieller Verlust an biologischer Vielfalt.

Source: Adapted from [Edwards et al. 2026: State of CDR](#)

Source: Adapted from [Edwards et al., 2026: State of CDR](#)

						Potenziale	Risiken	
Method	Capture process	Carbon storage pool	Category	Readiness	Storage timescale			
Enhanced weathering	C	M, MIOC					Verbessert die Bodenproduktivität und konkurriert nicht um Land.	Erfordert zusätzlichen Abbau und Transport mit potenziellen ökologischen Folgen. MRV ist schwierig.
Direct air carbon capture & storage	C	GF					Geringe Flächen-nutzung, einfach zu Messen, ermöglicht eine langfristige Speicherung.	Hoher Energieverbrauch und teure Infrastruktur; Speicherorte sind geografisch begrenzt.
Nicht aus SoCDR! Daten aus May et al., 2022 und noch unveröffentlichen Daten								
Photoelectrochemical CO ₂ reduction	C	VSS, GF					Verbraucht weniger Wasser und Land als die CO ₂ -Entfernung auf Basis von Bioenergie.	Noch in der Entwicklung und noch nicht kommerziell nutzbar.
CO ₂ -negative building material	C	BE					Ersetzt emissionsintensive Materialien wie Beton und Stahl. Verwendet Biokohle zur Isolierung. ERW ist ein Abfallprodukt.	Steht vor technischen Unsicherheiten und regulatorischen Herausforderungen.

Welche CDR-Methoden stehen zur Auswahl?



Source: Adapted from Smith et al., 2024: State of CDR 2nd Edition; May et al., 2022; Own unpublished data

2. Ein ambitioniertes Szenario für Deutschland

Welchen Annahmen? Welche Transformationen sind nötig?

Grundsätzliche Annahmen unseres möglichen Szenarios:

- **Ambitioniert:** Relevanter Beitrag zu geschätzten Restemissionen in D (Gesamt CDR > 60 MtCO₂ in 2045)
- **Konsistent:** Begrenzten Ressourcen und Randbedingungen der verschiedenen Methoden werden berücksichtigt
- **Alle CDR-Methoden miteinbeziehen:** Keine Methode wird a priori ausgeschlossen
- **Politikrelevant:** Bezug zu Deutschlands politischen Zielen und Klimastrategien

Wie sieht die Transformation dafür aus?

- **Grundlegende Rahmenbedingungen pro CDR:**
In Deutschland müssen grundlegende politische, infrastrukturelle und regulatorische Rahmenbedingungen geschaffen werden.
- **Multifunktionale landwirtschaftliche Flächen:**
Nahrungsmittel, Rohstoffe oder Energie zum Teil in Agroforstsystemen produzieren unter zusätzlicher Einarbeitung von Pflanzenkohle oder Ausbringung von Gesteinsmehl
- **Konsequenter Anbau von Zwischenfrüchten während Brachzeiten**
- **Anstieg der Biomassenutzung**
- **Großskalige geologische Speicherung von CO₂ ermöglichen**
An Land und unter der deutschen Nordsee (vorbereitet im KspTG) sowie Kooperation zur geologischen Speicherung mit EU Partnern
- **Ausreichen überschüssige erneuerbare Energie für DAC produzieren** (nach Elektrifizierung von Wärme und Mobilität)
- **Nutzung von CO₂-negativen Baumaterialien**
- **Weitere Forschung und Anwendung von künstlicher Photosynthese**

Mengen der CO₂-Entnahme

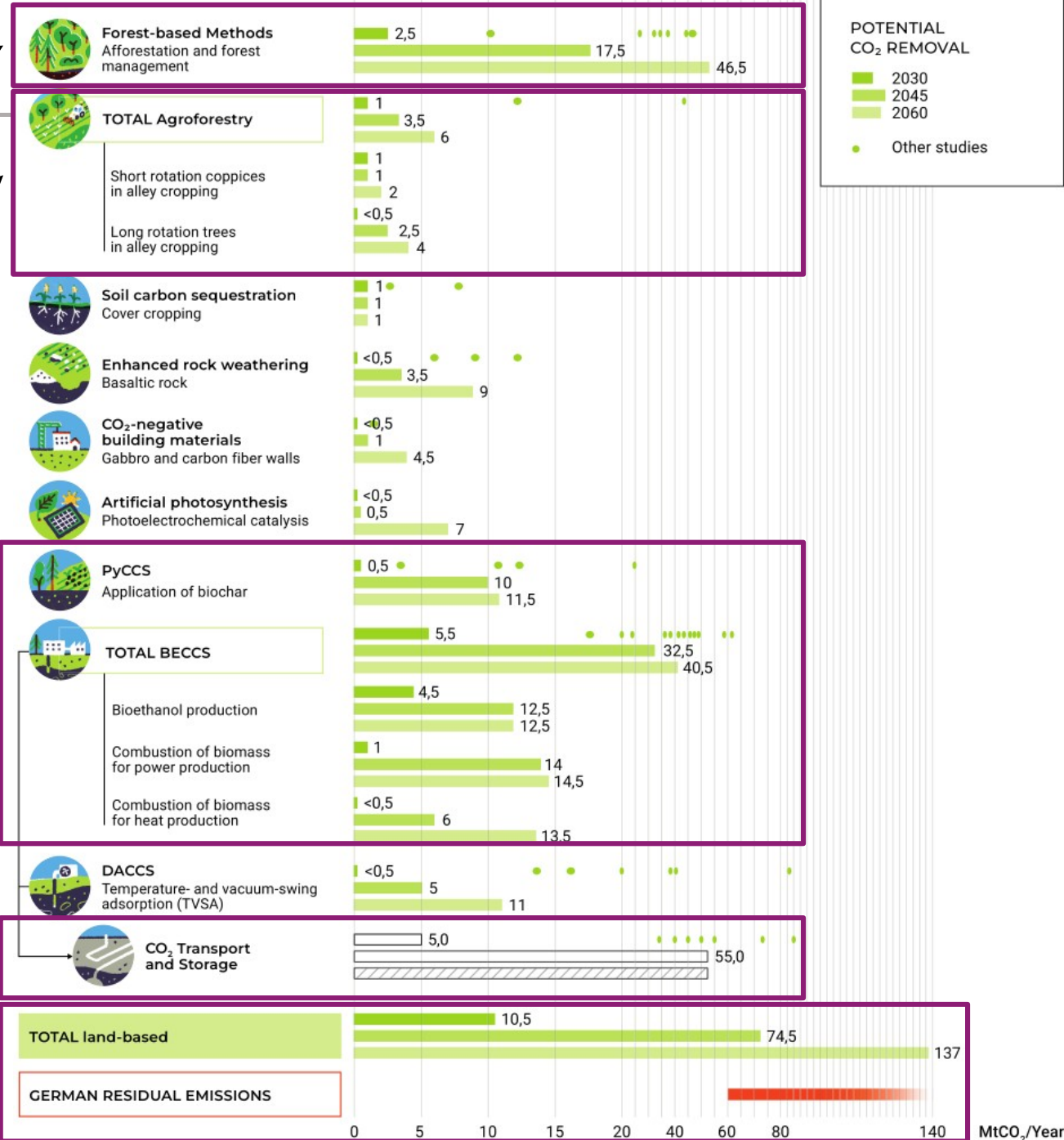
Aufforstung um ca. 7% der aktuellen Waldfläche + verändertes Waldmanagement

Agroforstsysteme werden bis 2045 auf 10% der aktuellen Ackerflächen implementiert

Biomassennutzung steigt von aktuell ~1.1 auf ~1.5 EJ/a in 2045

Geologische Speicherkapazität wird im In- und Ausland aufgebaut.
Priorisierung von CDR.

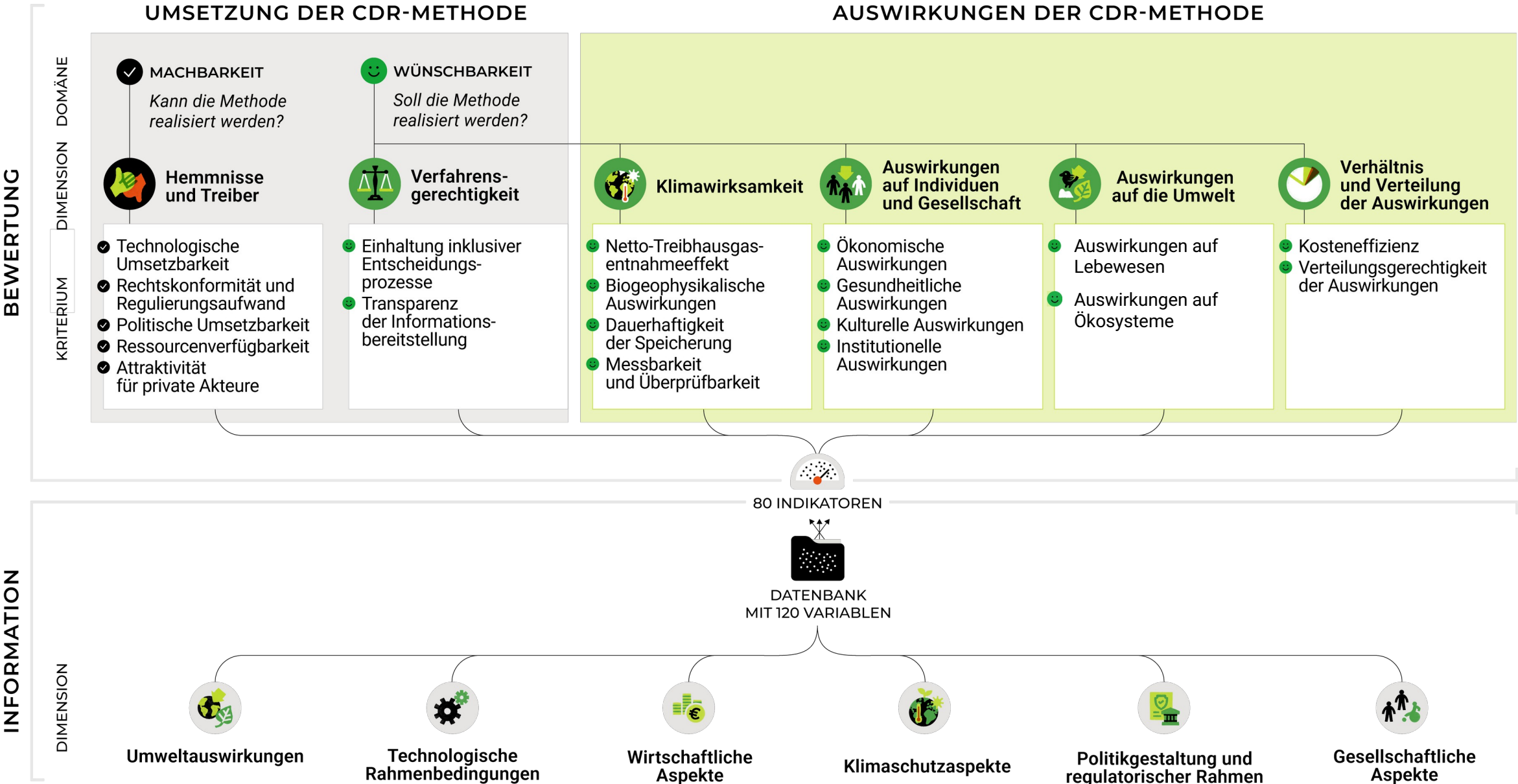
CDR kompensiert Restemissionen vollständig (bei hoch ambitionierten Maßnahmen zur Emissionsreduktion)

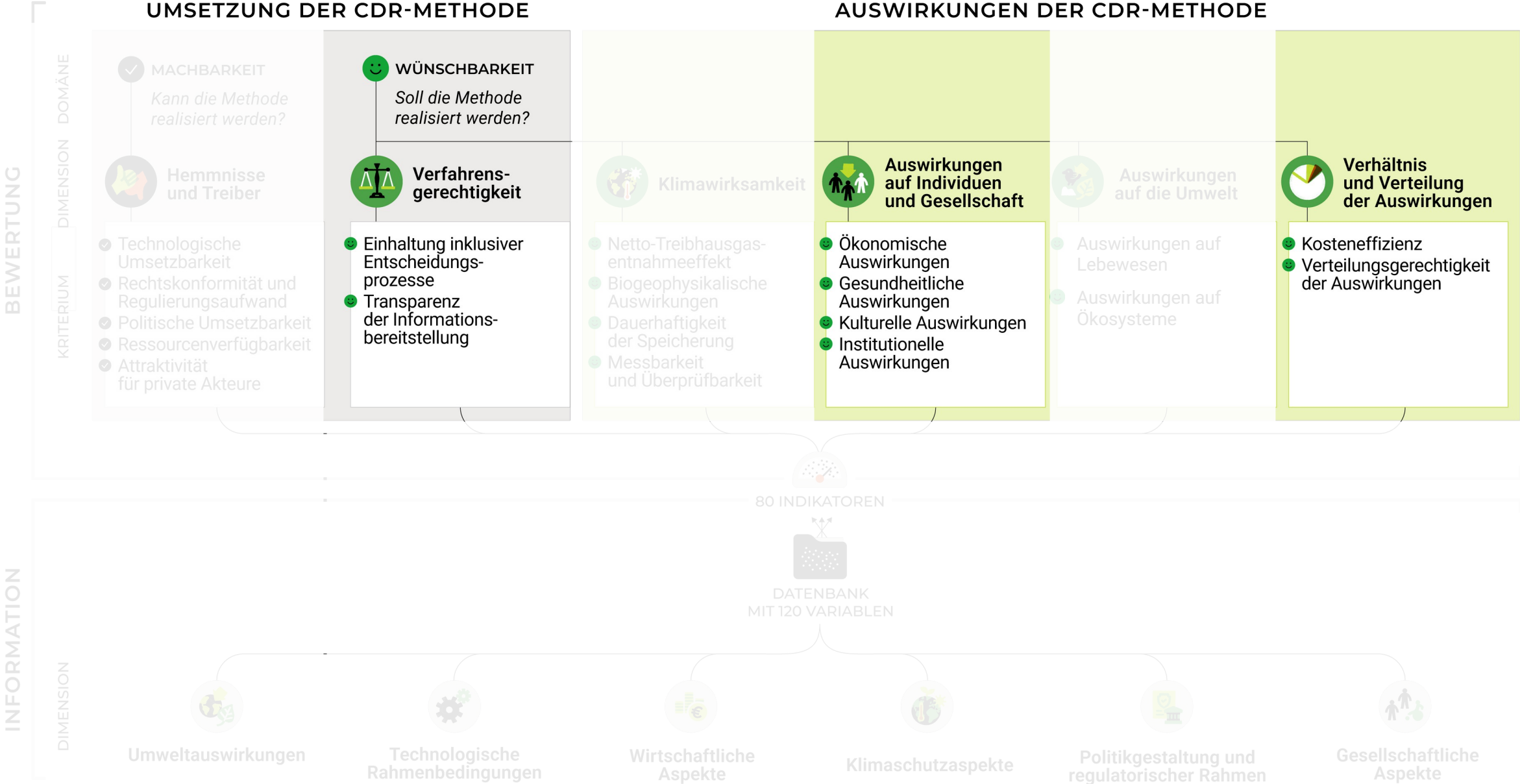


3. Ein ganzheitlicher Bewertungsrahmen für CDR-Methoden

Gibt es ein Problem mit CDR?

- **Allgemein:** Keine Klimaschutzmaßnahme ist universell „gut“ oder „schlecht“
→ Alle haben unterschiedliche Auswirkungen und können Synergien und Zielkonflikte mit sich bringen.
 - **Auswirkungen auf, sowie Synergien und Zielkonflikte mit:**
 - Umwelt (Biodiversität, Luft-, Boden- und Wasserqualität usw.)
 - Biogeophysik (Strahlungsaustausch an der Erdoberfläche)
 - Biogeochemie (Spurengase, Bodenchemie usw.)
 - Gesellschaft (Akzeptanz, Auswirkungen auf Gesundheit, Produktion von Nahrungsmittel, nachwachsenden Rohstoffen, Energieerzeugung)
 - Wirtschaft (Preise für Energie, Lebensmittel und nachwachsende Rohstoffe)
 - Gerechtigkeit (gerechte Verteilung der Auswirkungen, Verfahrensgerechtigkeit)
- Eine ganzheitliche Bewertung von CDR-Methoden ist erforderlich!



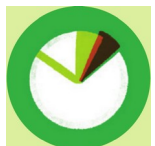


Welche Fragen der Gerechtigkeit müssen beachtet werden?



Verfahrens-/Prozeduralgerechtigkeit

- Einhaltung inklusiver Entscheidungsprozesse
 - Möglichkeit der Teilnahme während des Umsetzungsprozess
 - Welche politischen und administrative Ebenen sind beteiligt
- Transparente Informationsbereitstellung
 - Gesellschaftliche Wahrnehmung und Einstellung/Akzeptanz
 - Bereitstellung/Zugang zu Informationen über den Prozesses



Verhältnis und Verteilung der Auswirkungen

- Kosteneffizienz
 - Kohlenstoffpreis, Bruttokosten für Entnahme, Einnahmen aus Nebenprodukten
 - Buchhaltungskosten, Transaktionskosten
- Gerechte Verteilung der Auswirkungen
 - Gerechte Verteilung von Vorteilen und Lasten
 - Einfluss auf Menschenrechte (Eigentum, Rechte indigene Völker)

- Große Vielfalt an unterschiedlichen CO₂-Entnahme Methoden für Deutschland
 - Einteilung der CDR-Methoden “natürlich vs technisch” führt zu kurz
(Entnahmeprozess, Welche Zwischenschritte, Art der Speicherung, Speicherdauer)
 - CDR hat unterschiedliche Auswirkungen:
 - Implementierung (Auswirkungen auf CDR)
 - Effekte der CDR-Methoden (Auswirkungen von CDR)
- Es gibt keine Patentlösung! Erfolg abhängig von Standort und dessen Kontext
- Gerechtigkeitsfragen ebenso wichtig wie techno-ökonomisch-ökologische Aspekten
 - Ausgleich von Restemissionen in D (~75 MtCO₂) ist möglich, ABER nur durch:
 - Ein breit gefächertes Portfolio sich ergänzender CDR-Ansätze
 - Förderliche politische Rahmenbedingungen, Infrastruktur, Ausbau erneuerbarer Energien sowie groß angelegter CO₂-Transport und -Speicherung
 - Ehrgeizige Umstellungen in den Bereichen Landwirtschaft und Energie mit Schwerpunkt auf der effizienten Nutzung begrenzter Ressourcen