

Whitepaper CO₂-Vererbung

Profitabler Klimaschutz für Endkunden

Rock-Farm GmbH | CEO: Dr. Tobias Brett

Juli 2025

Zusammenfassung

CO₂-Vererbung ist eine neue Form des Klimaschutzes, die nicht kostet, sondern zurückzahlt. Urlauber, Schrauber, Biker und Alltagshelden können damit steigende CO₂-Preise abfedern – nicht durch Verzicht, sondern durch Teilhabe. Hinter jedem klimageld²-Button arbeitet eine Maschine, die CO₂ bindet und dabei ihren eigenen Nachfolger erschafft. Was entsteht, ist kein Offset – sondern eine Wertschöpfungskette aus Stein. CO₂ wird zum Produktionsfaktor, der sich vererbt. Dieses System folgt keiner Spendenlogik, sondern der Koppelproduktformel: Rückfluss für den Nutzer, Replikationskapital für das System. Klimaschutz wird industriekompatibel – durch kapitalistische Produktionslogik.

Beta-Version – Working Paper zur Evaluation durch Stakeholder und Fachexperten

Übersicht

1	Der Button, der zurückzahlt – CO ₂ -Vererbung im Alltag	7	Warum Enhanced Weathering hier nicht der Maßstab ist	12
2	Die strukturelle Blockade des Carbon-Removal-Marktes	8	Technische Umsetzung – neun strategische Hebel	13
3	Technologiekonzept Rock-Cell	9	Nachhaltigkeit und regulatorische Einordnung	21
4	Der CO ₂ zu Cash Prozess	10	Grenzen und Abgrenzungen	22
5	CO ₂ -Vererbung als dominante Systemlogik	11	Ausblick und gesellschaftliche Bedeutung	23
6	Wirtschaftliche Logik und Koppelproduktformel	9		

1 Der Button, der zurückzahlt – CO₂-Vererbung im Alltag

Fliegen, campen, tanken, heizen – die CO₂-Kosten steigen. Doch statt zu verzichten, können Menschen jetzt zurückbekommen, was sie zahlen: durch CO₂-Vererbung.

Der klimageld²-Button funktioniert wie ein persönlicher Rückkanal. Einmal berührt, zeigt er, was im Hintergrund für dich arbeitet: eine Maschine, die CO₂ aus Abgas bindet, es in Gestein verwandelt – und daraus den Grundstoff für ihre eigene Nachfolgerin gewinnt. Der Button ist kein Gagdet, sondern ein Zugang: zu einer neuen Infrastruktur, die Klimaschutz nicht verspricht, sondern liefert – automatisch, fortlaufend, sichtbar. Ohne Abo. Ohne Login. Nur ein Stein – der verbindet, was bislang getrennt war: Klimaschutz und Kapitalfluss. Ein Scan mit dem Smartphone – genau dort, wo sonst die CO₂-Steuer zugreift: an der Zapfsäule, beim Heizölkauf, am Urlaubsort. Nicht als Appell, sondern als Antwort. Nicht symbolisch – sondern zählbar.



Fliegen, Campen, Tanken, Heizen.
CO₂-Steuer belastet.
Dieser Button gibt etwas zurück.
Auszahlung aus CO₂-Speicherung.

Abbildung 1: *

Zentrale Botschaft; NFC-fähiger Stein-Button mit Logo: klimageld²

Schmerzpunkt

Die CO₂-Steuer greift nicht im Kopf, sondern im Bauch: beim Tanken, beim Reisen, beim Leben. Wer für sein Hobby zahlen muss, zahlt doppelt – finanziell und emotional. Doch dieser Preis ist nicht naturgegeben. Er lässt sich zurückholen.

Vision

CO₂-Vererbung beginnt dort, wo Klimaschutz greifbar wird. Nicht im Kontoauszug, sondern im Kofferraum. Hinter jedem klimageld²-Button arbeitet eine Maschine, die CO₂ bindet – und mit diesem Material ihre Nachfolgerin baut. Kein Account, kein Interface. Nur ein physischer Stein, der für dich arbeitet – über Jahre.

Rolle im Energiemix

Diese Technologie ersetzt keine Photovoltaik, kein Windrad. Sie ergänzt – dort, wo Wandel nicht über Infrastruktur funktioniert, sondern über Alltag. Dort, wo Verzicht sozial nicht durchsetzbar ist, macht sie Rückfluss möglich.

Zielgruppe

Biker, Camper, Offroader, Piloten, Heizölkundschaft – Menschen mit emissionsintensiven Hobbys, die nicht aus Trotz handeln, sondern aus Überzeugung. Wer Technik liebt, will nicht bremsen – sondern umsteigen. CO₂-Vererbung schafft genau dafür eine neue Plattform: nicht zur Moral, sondern zur Teilhabe.

Zugang über Emotion und Einfachheit

Der Einstieg ist kein Text, sondern ein Moment: ein Bild, ein Scan, ein Betrag auf dem Display. Kein Dashboard, kein Passwort. Nur ein physisches Symbol mit echter Wirkung – sofort erfahrbar, später verständlich.

2 Die strukturelle Blockade des Carbon-Removal-Marktes

Warum entsteht kein Massenmarkt für negative Emissionen?

Weil der Markt zwar Wirkung erzeugt, aber keine Verbindung zum Eigentum daran herstellt. Wer heute CO₂ aus der Atmosphäre entfernt, gibt den wirtschaftlichen Bezug daran mit dem

Zertifikatsverkauf aus der Hand. Die Wirkung bleibt, aber der wirtschaftliche Bezug endet. Eine lineare Einbahnstraße für eine zirkuläre Aufgabe.

Zertifikate sind Verbrauchsgüter – nicht für Endkunden gemacht

Der Carbon-Removal-Markt beruht bisher auf einer Logik des Verbrauchs: Zertifikate werden erzeugt, verkauft und gelöscht. Das ist klimabuchhalterisch korrekt – aber aus Endkundensicht ökonomisch unzureichend. Wer ein Produkt verkauft, dessen Wirkung sich nicht mit ihm verbindet, besitzt kein wachsendes System, sondern einen Einmalmoment. Unternehmen können mit dieser Logik umgehen. Endkunden brauchen eine andere: Besitz ohne Pflicht, Wirkung ohne Verwaltungsaufwand – eine Verbindung, die bleibt.

CO₂-Vererbung als Eigentumsmodell

CO₂-Vererbung ersetzt den Einmalverkauf durch ein wachstumsfähiges Besitzmodell. Die Entfernung von Kohlenstoff bleibt nicht bloß ein Datenpunkt – sie wird zur Grundlage eines Systems, das sich fortpflanzt. Was du anstößt, vermehrt sich: als technische Infrastruktur, als Rückfluss, als Erbe. Der Button gehört dir. Die zugeordnete Rock-Cell arbeitet für dich – nicht in deinem Besitz, aber in deinem Namen.

Warum Endkunden bisher nur zahlen – aber nicht verdienen

Solange Unternehmen Zertifikate einkaufen müssen, verteuert jede Form von Klimaschutz am Ende das Produkt. Ob durch CO₂-Steuer, Kompensation oder Carbon Removal – die Kosten landen beim Endkunden. Das heutige System kennt nur eine Richtung: zahlen.

CO₂-Vererbung dreht diese Logik um. Wenn Endkunden selbst Gutschriften erzeugen, nehmen sie nicht nur teil – sie profitieren. Die Wertschöpfung passiert nicht über den Preisaufschlag, sondern über Rückfluss. Der Button macht sichtbar, was sonst nur Fachleute sehen: Wer speichert, verdient. Nicht später. Jetzt.

Vom Marktversagen zur Marktinnovation

Es ist kein Versagen des Marktes, dass Carbon Removal unzureichend skaliert – es ist die Folge falscher Systemannahmen. CO₂-Vererbung bringt eine neue These in den Raum: Klimaschutz funktioniert nicht als Verbrauch, sondern als Vermögensform. Wirkung, die nicht gelöscht wird, sondern bleibt. Rückfluss, der wächst. Maschinen, die sich selbst vermehren – nicht als Utopie, sondern als Betriebsmodell.

3 Technologiekonzept Rock-Cell

Einführung: Technologie als Träger ökonomischer Logik

Rock-Cell ist mehr als eine Maschine. Sie ist ein neues Produktionsprinzip – eine technische Plattform, die industrielle Prozesse mit Klimaschutz und wirtschaftlicher Selbständigkeit verknüpft. Im Zentrum steht das Prinzip der CO₂-Vererbung: Eine Maschine produziert nicht nur ein Produkt, sondern fast vollständig ihre eigene Nachfolgeneration – aus CO₂.

Aufbau: Kompakte CO₂-Speicherzelle

Die Rock-Cell misst etwa 2 Meter und hat eine berechnete Nennleistung von 1 tCO₂e pro Installationseinheit. Ihr zentrales Funktionsprinzip basiert auf dem Einsatz von CO₂ als Rohstoff

zur Herstellung eines karbonisierten Baumaterials – im Wesentlichen einem technisierten Mineralisationsprozess.

Die Replikation erfolgt über die Mineralisation von Wasser unter Einsatz von Kohlensäure aus CO₂-Gas. Additive Fertigung (z. B. Belt Printing) wird verwendet, um die Mechanik zu drucken, diese wird dann mit ebenfalls gedruckten Robotern gesteuert. Das Konstruktionsprinzip folgt einer dezimal degressiven Logik:

- 90 % Repliziert: Aus CO₂-gebundenem karbonatischem Gestein (z.B. hydromagnetisch zu magnetisch petrifiziert) für die Tragstruktur (Schotter-Schnur-Mauerverbundverfahren)
- 9 % Kreislauffähig: Gedruckt am Stück aus wiederverwendbarem PETG für robotische Komponenten und Ventilboard
- 0,9 % Klassisch: Externe Teile (Motoren, Elektronik und mit minimalem Zeitanteil Cobot und Belt Printer)

Standortabhängigkeit

Die tatsächliche Leistung einer Rock-Cell variiert je nach Standort:

- Umweltfaktoren: Temperatur, Sonneneinstrahlung, Staublast, Qualität des natürlichen Inputgesteins, unerwünschte biologische Prozesse im Wasser
- Standortfaktoren: Qualität der CO₂-Quelle (z. B. Biogas), Topologie, regionale Landnutzungsverträge
- Nachfrage: Aktivierung durch Nutzerinteresse (z. B. Bestellung weiterer Rock-Cells)

Rock-Cells werden bevorzugt in regionalen Biogasbetrieben aufgestellt. Dies verbindet Sichtbarkeit mit technischer Funktion und reduziert Transportemissionen. In Deutschland gibt es etwa 9000 Biogasbetriebe.

Funktionsweise: CO₂-Vererbung als System

CO₂-Vererbung wird nicht als Selbstzweck, sondern als neue Produktionslogik verstanden:

- Magnifizierte Mineralisierung: CO₂ wird in einem pH-zyklischen Prozess (pH4–pH9) in karbonatisches Gestein umgewandelt
- Passives Phasenmanagement: Nutzung langsamer, aber effizienter Sedimentationsprozesse statt energieintensiver Separation
- Reversibilität und Kreislauffähigkeit: Materialien lassen sich rückbauen, schreddern und neu drucken
- Print-on-Site & Print-in-Place: Teile werden direkt an Ort und Stelle gedruckt und eingesetzt

KPI: Rock output/input ratio = 162 %



Abbildung 2: Rock-Cell ist dezentral bei bestehenden Biogasbetrieben installierbar – allein in Deutschland gibt es rund 9000 geeignete Standorte.

Wirtschaftliches Design: CO₂-Vererbung durch Replikation

Rock-Cell nutzt generatives Wachstum:

- Alle laufenden Kosten werden dem replizierten “Kind” zugeordnet
- Die CO₂-Credits verbleiben beim “Elternteil” und können vom Bestandskunden wirtschaftlich genutzt werden
- Durch den Verkauf der neuen Rock-Cells amortisiert sich der Vorbesitzer möglichst nach wenigen Jahren. Ziel ist eine Amortisationszeit wie bei Balkonkraftwerken oder kürzer.
- Ein Kreditfluss ohne Nachkauf entsteht: Die Maschine refinanziert sich über den Wert ihrer Nachkommen

KPI: Amortisationszeit pro Rock-Cell (Ziel: vergleichbar mit Balkonkraftwerken, d.h. 4–8 Jahre)

Plattformstrategie: Extensive Multiplikation

Rock-Cell ist nicht als zentralisierte Supermaschine gedacht, sondern als Plattform für dezentrale Industrieprozesse:

Selbst der langsamste Prozess gewinnt durch CO₂-Vererbung exponentiell.

Ein langsamer, aber günstiger Prozess skaliert über viele Instanzen – nicht über Intensität. Dies eröffnet neue Räume jenseits konventioneller Hochleistungsproduktion.

Zukunftsvision:

-
- Entwickler nutzen Rock-Cell als Kit zur Integration eigener Prozesse
 - Skalierung erfolgt durch Verteilung auf ein wachsendes Netzwerk installierter Zellen
 - Neue industrielle Ökonomie: extensive statt intensive Nutzung natürlicher Ressourcen

Permanenz: CO₂ in Gestein – für immer

Die Reaktion zwischen CO₂, Magnesium und Kalzium ergibt festes MgCO₃ bzw. CaCO₃. Diese Verbindungen sind:

- dauerhaft stabil
- nicht biologisch abbaubar
- formflexibel einsetzbar (Skulptur, Fundament, Oberfläche etc.)

KPI: Carbon removed per year = 1 tCO₂e (pro Zelle, unter den berechneten Standardbedingungen)

4 Der CO₂ zu Cash Prozess

Einleitung: Der Stein als Schnittstelle

Im Zentrum des Rock-Cell-Systems steht kein Dashboard, keine App – sondern ein Stein. Er fungiert als physische und symbolische Schnittstelle zwischen Nutzer und Technologie. Der Monolit-Stein symbolisiert nicht nur ein Stück CO₂-bindendes Material, sondern auch einen digitalen Schlüssel: Er wird gemeinsam mit der Rock-Cell hergestellt und zeigt exemplarisch, welche Gestaltungsmöglichkeiten durch CO₂-Vererbung entstehen – jenseits davon, nur das Wachstum der Technologie zu befeuern. Er trägt einen NFC-Chip, der mit einer konkreten Rock-Cell verbunden ist und die vor Ort erlebbar ist. Dies ermöglicht eine neue Art der Interaktion: Nicht intransparent, sondern überprüfbar für alle. Nicht Abonnement, sondern Teilhabe für alle.

Painpoint: Die CO₂-Steuer als unsichtbarer Vielfraß

Seit 2021 wird in Deutschland fossiler Kraftstoff durch eine nationale CO₂-Bepreisung kontinuierlich teurer – eine Entwicklung, die durch den ab 2027 greifenden europäischen Emissionshandel nochmals beschleunigt wird. Laut ADAC und anderen Quellen ist ab diesem Zeitpunkt mit einer jährlichen Verknappung der Zertifikate und damit steigenden Spritpreisen zu rechnen. Konkrete Schätzungen gehen von bis zu 19 Cent Mehrkosten pro Liter Benzin zusätzlich zu normalen Marktschwankungen aus.

Besonders betroffen sind all jene, die ihre Fahrzeuge nicht zur Arbeit, sondern zur Freude nutzen – etwa Motorradfahrer, Oldtimerliebhaber, Freizeitpiloten oder Wohnmobilbesitzer. Für sie greift weder die Entfernungspauschale noch das geplante Klimageld. Das bedeutet: Wer CO₂-intensive Hobbys pflegt, muss die steigenden Preise vollständig selbst tragen – obwohl die tatsächliche Jahresmenge an Emissionen oft gering ist (z. B. 0,8 tCO₂ bei typischer Motorradnutzung).

Der CO₂-Preis trifft derzeit ausgerechnet jene, die mit Leidenschaft und Verantwortung unterwegs sind – nicht zur Arbeit, sondern aus Überzeugung, Begeisterung und Verbundenheit zu Technik, Natur oder Gemeinschaft. Gerade im Freizeitbereich führt die CO₂-Bepreisung zu einer spürbaren Belastung, obwohl die Gesamtemissionen hier oft vergleichsweise gering sind. Ein Technologiewechsel ist in vielen dieser Bereiche noch nicht wirtschaftlich, und der empfundene Veränderungsdruck wirkt eher frustrierend als motivierend.

Doch genau hier liegt das Potenzial für eine neue Art von Lösung: Rock-Cell richtet sich an all jene, die ihr Hobby nicht aufgeben wollen – und dafür eine eigenständige, technische Antwort auf die CO₂-Kosten suchen. Die Technologie erzeugt CO₂-Gutschriften, deren Wert mit der Steuer wachsen kann – und eröffnet damit erstmals eine Option, die nicht auf Verzicht, sondern auf Verantwortung und Teilhabe setzt. Wer sein Fahrzeug liebt, kann jetzt mehr als nur kompensieren: Er kann zeigen, wie Fortschritt auch anders geht.

Prozesskette: Von der Luft zur Auszahlung

Die Wertschöpfung beginnt mit dem atmosphärischen CO₂ und endet mit der finanziellen Rückvergütung. Der Prozess verläuft in vier Schritten:

1. **CO₂ speichern:** Die Rock-Cell bindet CO₂ aus biogenem Abgas durch mineralische Umwandlung in karbonatisches Gestein.
2. **Carbon Credit erzeugen:** Die gebundene CO₂-Menge wird in Form eines digitalen Carbon Credits abgebildet.
3. **Credit verkaufen:** Der Credit wird auf freiwilligen oder regulierten Märkten veräußert.
4. **Auszahlung an Kunden:** Der Erlös fließt anteilig an die Eigentümer der Rock-Cell zurück – sichtbar gemacht durch die NFC-Stein-Interaktion.

Der Zugang: Scannen statt Einloggen

Durch das Scannen des NFC-Steins mit einem Smartphone kann der Kunde die Nutzung auslösen: Ein Betrag wird eingegeben (z. B. für einen Tankvorgang), und der Stein zeigt, ob dieser Betrag bereits durch CO₂-Wertschöpfung gedeckt ist. Dies geschieht ohne Account, ohne App-Download, ohne komplexe Verwaltung. Der Stein ist die Benutzeroberfläche.

Kundenbindung: Symbolik und Erlebnis

Die Rock-Cell kann besucht, personalisiert und erlebt werden. Nutzer können ihre Zelle auf einem regionalen Biogasbetrieb aufsuchen, sie anfassen, ihr beim Arbeiten zuhören oder ein eigenes Logo auf ihr verewigen. Der Prozess wird damit greifbar: Klimaschutz als Handlung, nicht als Abstraktion.

Technologische Vertrauensebene

Durch den Bezug zur realen Maschine entsteht ein neues Vertrauensverhältnis: Der Kunde weiß, dass „sein“ Stein an eine reale, physisch arbeitende Zelle geknüpft ist. Die CO₂-Vererbung wird dadurch plausibel, sichtbar und langfristig erfahrbar.

Fazit

CO₂ wird nicht nur gespeichert, sondern transformiert – in Baumaterial, in Credits, in finanzielle Entlastung. Und das alles beginnt mit einem Handgriff: Stein scannen. Geld zurück. Gerade in einem Umfeld steigender CO₂-Preise bietet Rock-Cell eine zukunftssichere Perspektive: Wer heute CO₂-Gutschriften erzeugt, kann morgen die CO₂-Steuer damit ausgleichen – vielleicht sogar vollständig. So bleibt das Hobby erhalten – nicht trotz Klimaschutz, sondern dank aktiver Teilhabe daran.

5 CO₂-Vererbung als dominante Systemlogik

Einleitung: Vom globalen Ziel zum individuellen Nutzen

Carbon Removal galt lange als globale Aufgabe ohne lokalen Hebel. Die Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre ist zweifellos notwendig, um die planetaren Grenzen nicht zu überschreiten. Doch solange die Wirkung nur im Kollektiv zählt, fehlt dem Einzelnen der direkte Anreiz zur Beteiligung. CO₂-Vererbung – also CO₂-Entnahme mit eigenem Wertstrom – verändert genau das: Es macht Klimaschutz individuell erfahrbar, lohnenswert und ökonomisch anschlussfähig.

Definition: Was bedeutet CO₂-Vererbung?

CO₂-Vererbung bezeichnet einen technisch-industriellen Prozess der stofflichen CO₂-Bindung, bei dem eine Maschine oder ein vernetztes Maschinensystem kontinuierlich neue Instanzen seiner selbst hervorbringt. Ziel ist die fortlaufende Skalierung der Carbon-Removal-Kapazität durch ein weitgehend autarkes Vererbungsprinzip von Baumaterial, bei dem mindestens 90 % der Masse der Nachfolgeeinheiten aus dem durch CO₂ gebundenen Material besteht. Die monetäre Selbsttragfähigkeit ergibt sich daraus, dass die Erlöse aus den CO₂-Gutschriften und potenziellen Verkäufen der nachfolgenden Instanzen zur Finanzierung von Betrieb, Amortisation und ggf. Ertragsausschüttung der Vorgängersysteme genutzt werden. Damit entsteht ein geschlossener Wertkreislauf, der ökologische Wirkung mit wirtschaftlicher Selbstständigkeit verknüpft. Das System basiert auf drei Grundprinzipien:

1. Technik statt Abonnement: Die Rock-Cell erzeugt CO₂-Gutschriften, die verkauft werden können.
2. Rückfluss statt Ablass: Die Erlöse gehen nicht an einen Zwischenhändler, sondern direkt an die Nutzerin bzw. den Nutzer.
3. Replikation statt Verbrauch: Rock-Cell bindet CO₂ in karbonatisches Baumaterial, das nicht für externe Märkte produziert wird, sondern direkt in den Aufbau neuer Rock-Cells fließt. Das System nutzt also seine eigene stoffliche Leistung, um sich selbst zu skalieren – unabhängig von der Preisakzeptanz Dritter.

Weil Rock-Cell zugleich Materialproduzent und Materialabnehmer ist, entsteht ein stabiler Binnenmarkt mit kalkulierbarem Wert. Neue Kunden wissen: Der Preisverfall ist nicht eingepreist, sondern bewusst ausgeschlossen – zugunsten eines fairen, wachstumsfähigen Carbon-Removal-Marktes.

Wertschöpfung durch Technik

Das System unterscheidet sich grundlegend von klassischen CO₂-Kompensationsmodellen. Dort zahlt der Kunde für eine versprochene Entnahme, deren Details oft unklar bleiben. Bei Rock-Cell hingegen ist die Wertschöpfung technikbasiert, sichtbar und nachverfolgbar. Die Maschine bindet CO₂ in karbonatisches Gestein, generiert daraus ein handelbares Gut und lässt die Erträge zurückfließen.

Da der Endkunde die CO₂-Steuer nicht unmittelbar selbst abführt, sondern sie in Form höherer Preise erlebt, liegt der Fokus auf dem Rückfluss. Die von Rock-Cell erzeugten CO₂-Gutschriften werden daher bevorzugt an Unternehmen verkauft, die die CO₂-Steuer direkt begleichen müssen – während der finanzielle Rückfluss den Endkunden zugutekommt. So trägt das System zur Entlastung bei, ohne dass die Nutzer selbst in komplexe Marktprozesse eingreifen müssen.

Das Ergebnis ist eine neue ökonomische Kategorie: Die Kombination von Umweltwirkung und Kapitalfluss. Kunden werden nicht nur zu Unterstützern einer Technologie, sondern zu aktiven Teilnehmern an einem klimapositiven System.

Vergleich zu klassischen Kompensationssystemen

Kriterium	Klassische Carbon Credits	Rock-Cell (2 m Self-Monetizing Unit)
Amortisation	Keine	Hohe Wahrscheinlichkeit
Nutzungsform	Verbrauchsprodukt	Vermögenswert
Lebensdauer	Kurz	Lang
Wertentwicklung	Moderat	Sehr hoch
Repräsentation	Digitaler Account	Physisches, greifbares Objekt
Risikoexposition	Indirekt, unberechenbar	Direkt, berechenbar

Diese Eigenschaften unterscheiden Rock-Cell fundamental von klassischen CO₂-Kompensationsangeboten: Statt symbolischer Beteiligung an einem Prozess bietet sie physisch greifbare, strategisch einsetzbare und ökonomisch anschlussfähige Teilhabe.

Die Swap-Logik: Wenn der Preis steigt, steigt der Schutz

Ein zentrales Element des Rock-Cell-Modells ist die sogenannte Swap-Logik: Wenn die CO₂-Steuer steigt, steigen voraussichtlich auch die Marktpreise für CO₂-Gutschriften. Wer eine Rock-Cell besitzt, erzeugt damit also nicht nur Gutschriften, sondern auch eine Art Inflationsschutz für seine Freizeitaktivitäten. Mit jeder verkauften Gutschrift können reale Kosten – etwa beim Tanken oder Reisen – kompensiert werden.

Der Effekt: Die Nutzer werden unabhängiger von politischen Schwankungen und gewinnen eine neue Form von Kontrolle über ihre persönliche CO₂-Bilanz. CO₂-Vererbung wird so zu einem Werkzeug der Resilienz.

Fazit: Eine Technologie mit sozialer Funktion

Rock-Cell zeigt, dass technischer Fortschritt nicht nur dem Klimaschutz dient, sondern auch dem gesellschaftlichen Zusammenhalt. Menschen, die sich sonst als Verlierer einer politischen Steuerlogik fühlen, werden zu Mitgestaltern einer technischen Gegenwelt. Sie erfahren Teilhabe, statt Verzicht. Und sie können ihren Beitrag zum Klimaschutz nicht nur sehen – sondern auch spüren. Im Portemonnaie, im Alltag, in der Haltung.

6 Wirtschaftliche Logik und Koppelproduktformel

Einleitung: Warum Skalierung ohne Kostenexplosion möglich ist

Durch CO₂-Vererbung entsteht eine neue Kostenarchitektur: Die jährlichen Betriebskosten (OPEX) werden über die Lebensdauer und künftige Generationen verteilt, wodurch Skalierung die Kosten der CO₂-Bindung direkt senkt. Kosten, die bislang der CO₂-Bindung zugeordnet wurden, erscheinen nun als Teil von Investitionen in Vermögenswerte (CAPEX) – konkret in die nächste Rock-Cell-Generation. Dieser Vermögenswertaufbau ist kein Nullsummenspiel, sondern eine Plattformstrategie für CO₂-Vererbung, die die klassische Produktionslogik der Industriellen Revolution marktübergreifend herausfordert.

Grundkonzept: Zwei Ausnahmen in der ökonomischen Kostenrechnung

Traditionelle Kostenrechnung setzt voraus, dass alle Prozesskosten aggregiert werden. Es gibt jedoch zwei bekannte Ausnahmen:

- **Parent-Child-Beziehungen:** Natürliche oder technische Replikation erzeugt neuen Output, ohne lineare Verrechnung aller Ursprungsaufwände. Beispiel: Prusa-3D-Drucker drucken Teile für neue Drucker.
- **Koppelprodukte:** Ein Prozess liefert mehrere Produkte in fixem Verhältnis (z. B. Benzin und Diesel in Raffinerien). Die Gesamtkosten werden produktspezifisch aufgeteilt.

Rock-Cell nutzt **beide Prinzipien kombiniert**: Eine Maschine bindet CO₂ (Produkt A: Gutschrift) und produziert gleichzeitig Baumaterial für ihre eigene Folgegeneration (Produkt B).

Formelwerk: Ableitung der Koppelproduktlogik

Die wirtschaftliche Bewertung technischer CO₂-Entfernungsverfahren folgt in ihrer Grundstruktur der klassischen betriebswirtschaftlichen Kalkulation von Stückkosten in kapitalintensiven Projekten. Die Investitionskosten (CAPEX) werden gleichmäßig über die wirtschaftliche Nutzungsdauer (L) verteilt und mit den laufenden Betriebskosten (OPEX) pro Jahr kombiniert. Daraus ergibt sich die folgende Basisformel für die lineare Kostenstruktur technischer CO₂-Entfernung:

$$c_{\text{tCO}_2, \text{lin}} = \frac{c_{\text{CAPEX}}}{L} + c_{\text{OPEX, Jahr}} \quad (1)$$

Basierend auf Gleichung (1) kann der Gesamtkostensatz nicht unter die Betriebskosten (OPEX) fallen. In der ökonomischen Theorie existieren jedoch zwei Ausnahmekonzepte, die eine Neustrukturierung der Kostenarchitektur ermöglichen: *Parent-Child-Beziehungen* und *Koppelprodukte*.

Zunächst zu den Parent-Child-Beziehungen: In klassischen industriellen Prozessen werden alle Kosten aggregiert. In der Landwirtschaft hingegen wird die Photosynthese als natürliche Leistung nicht bilanziert. Der Grund liegt nicht allein in der „Kostenlosigkeit der Natur“, sondern im Prinzip der Reproduktion: Eltern-Kind-Beziehungen – ob natürlich oder künstlich – können kostenfrei erfolgen. Auch in der Industrie finden sich erste Ansätze, etwa bei Prusa Research oder im RepRap-Projekt, wo 3D-Drucker Komponenten für den Bau neuer 3D-Drucker produzieren. Ebenso nutzt Franka Emika Roboter zur Montage neuer Roboter. Allerdings bleibt die ökonomische Wertschöpfung durch diese Strategien bisher gering, typischerweise unter 10 % der konventionellen Wertschöpfung.

Das zweite Ausnahmekonzept betrifft Koppelprodukte. Hier entstehen aus einem Produktionsprozess zwangsläufig mehrere Produkte in einem fixen Verhältnis – wie Diesel und Benzin bei der Rohölraffination. Für Koppelprodukte existieren spezifische Verfahren zur Kostenverteilung, da die Prozesskosten keinem einzelnen Produkt direkt zugeordnet werden können.

Auf Basis dieser beiden Konzepte reorganisieren wir die Kostengleichung: Es wird ein Maschinensystem entwickelt, das zwei Koppelprodukte erzeugt – (A) Kohlenstoffzertifikate durch Bindung von CO₂ und (B) ein Baumaterial, das das gebundene CO₂ enthält und zum Bau von Replikaten des Systems genutzt wird.

Wir definieren eine Nennproduktionsrate von 1 tCO₂e pro Jahr (Produkt A) und ein fixes Verhältnis d für das Baumaterial (Produkt B). Die Zuordnung der Kosten erfolgt gemäß Koppelproduktlogik: Alle Betriebskosten werden dem Baumaterial B, alle Investitionskosten dem Kohlenstoffzertifikat A zugeordnet. Daraus ergeben sich folgende Gleichungen:

Für Produkt A (Carbon Credit):

$$c_A = \frac{c_{\text{CAPEX}}}{L \times Q_A} \quad (2)$$

mit $Q_A = 1$ (1 Tonne CO₂e pro Jahr)

$$\Rightarrow c_A = \frac{c_{\text{CAPEX}}}{L} \quad (3)$$

Für Produkt B (Baumaterial):

$$c_B = \frac{c_{\text{OPEX}}}{Q_B} \quad (4)$$

mit $Q_B = d \times Q_A$

$$\Rightarrow c_B = \frac{c_{\text{OPEX}}}{d} \quad (5)$$

wobei L die Lebensdauer des Systems ist.

Im nächsten Schritt nehmen wir an, dass c_B nicht nur die Kosten für die Herstellung des Baumaterials abbildet, sondern auch einen Großteil der Kosten für die Replikation und Installation einer Kind-Version des Maschinensystems trägt. Wir führen hierfür einen festen Replikationsfaktor r ein und erhalten:

$$r \cdot c_{\text{CAPEX, Kind}} = c_{B, \text{Eltern}} \quad (6)$$

Diese Beziehung bedeutet: Ein Anteil r der Investitionskosten für das nächste System (Kind) ist bereits in den Betriebskosten des Elternsystems enthalten – konkret im Produkt B (dem Baumaterial). Ist $r = 1$, liegt vollständige Selbstreplikation vor; bei $r < 1$ ist die Replikation nur teilweise und muss extern ergänzt werden.

Geht man davon aus, dass das Kindsystem baugleich ist (also $c_{\text{CAPEX, Kind}} = c_{\text{CAPEX}}$), lässt sich Gleichung (6) umstellen zu:

$$r = \frac{c_B}{c_{\text{CAPEX}}} \quad (7)$$

Diese Darstellung verknüpft die Replikationsfähigkeit direkt mit der zugrundeliegenden Kostenstruktur: Je höher der Anteil der Replikationskosten, der über das Produkt B gedeckt wird, desto größer ist der Replikationsfaktor r – bis hin zur vollständigen Replikation bei $r = 1$.

Basierend auf der Koppelproduktlogik und der Replikationsbeziehung aus Gleichung (6) lässt sich nun eine alternative Kostenstruktur für Systeme mit CO₂-Vererbung ableiten.

Im Gegensatz zum linearen Modell (vgl. Gleichung 1) entfällt bei einem replizierenden System die separate Anrechnung der Investitionskosten, da diese anteilig über das Produkt B (Baumaterial) bereits enthalten sind. Die Kosten der CO₂-Entfernung ergeben sich somit ausschließlich aus den Betriebskosten (OPEX), verteilt auf die Replikationswirkung über Lebensdauer und Outputverhältnis.

Ausgehend von:

- Betriebskosten pro Jahr: c_{OPEX}
- Replikationsfaktor: r (Anteil des CAPEX, der durch Produkt B gedeckt wird)
- Verhältnis des Baumaterials zur CO₂-Bindung: d
- Lebensdauer des Systems: L

ergibt sich folgende Formel für die spezifischen Kosten der CO₂-Entfernung im Replikationsmodell:

$$c_{tCO_2,rep} = \frac{COPEX}{r \cdot d \cdot L} \quad (8)$$

Damit wird deutlich: Während das lineare Modell (1) eine strukturelle Kostenuntergrenze durch die OPEX-Komponente nicht unterschreiten kann, erlaubt das replizierende Modell (8) eine systemische Umverteilung der Betriebskosten – und damit eine kumulative Kostenreduktion, die sich über Generationen hinweg verstärkt.

7 Warum Enhanced Weathering hier nicht der Maßstab ist

Eine neue Kostenarchitektur verändert das Spiel.

Denkfalle: „EW = teuer“ – warum das hier nicht gilt

Enhanced Weathering (EW) gilt in der öffentlichen und wissenschaftlichen Debatte oft als vergleichsweise teure Methode zur CO₂-Entfernung. Der Grund: Mineralische Prozesse sind schwer skalierbar, verursachen hohe Transport- und Mahlkosten und binden CO₂ nur langsam. Doch diese Sichtweise greift zu kurz – weil sie von einem linearen Kostenmodell ausgeht. Sie betrachtet den Prozess rein als Dienstleistung: Input rein, CO₂ raus – zu einem Preis pro Tonne.

Rock-Cell sprengt dieses lineare Paradigma. Durch CO₂-Vererbung und die monetäre Integration von CO₂ in reale Vermögenswerte wird die klassische Kostenstruktur systemisch verschoben. Statt steigender Grenzkosten eröffnet sich die Möglichkeit, die effektiven Kosten der CO₂-Entfernung um Faktor 10 zu senken – trotz mineralischer Basisprozesse. EW bleibt, aber seine Kostenlogik wird transformiert: vom teuren Dienstleistungsprozess zur skalierbaren, produktiven Infrastruktur. Die Denkfalle „EW = teuer“ greift hier nicht mehr – sie wird umgekehrt.

Formelwerk: EW um Faktor 10 günstiger durch CO₂-Vererbung

Die chemische Grundlage der Mineralisierung und Petrifikation folgt der folgenden Reaktionsgleichung:



Aus der Massenbilanz ergibt sich ein Materialverhältnis von $d = 1,62$, das angibt, wie viel fester Output pro gebundener Tonne CO₂ entsteht. Dieser Wert beschreibt den fixen Outputfaktor des Baumaterials (Koppelprodukt B) relativ zur CO₂-Senkenleistung (Produkt A).

Der Replikationsfaktor wird auf $r = 0,9$ gesetzt. Er gibt an, welcher Anteil der Investitionskosten des Kindsystems über das Produkt B (Baumaterial) des Eltersystems bereits gedeckt ist. Der Replikationsgrad spiegelt somit die angestrebte Replikationsquote durch CO₂-Vererbung wider.

Die gewählte Lebensdauer beträgt $L = 6,86$ Jahre. Dieser Wert ist so gesetzt, dass bei den obigen Parametern eine rechnerische Kostenreduktion um den Faktor 10 im Vergleich zum linearen Modell erreicht wird:

$$c_{tCO_2,rep} = \frac{COPEX}{r \cdot d \cdot L} = \frac{COPEX}{10} \quad (9)$$

Damit zeigt sich: Durch CO₂-Vererbung und die Nutzung des mineralischen Outputs als strukturelles Koppelprodukt lassen sich die spezifischen Kosten der CO₂-Entfernung im Vergleich zum klassischen Enhanced Weathering um eine Größenordnung senken.

8 Technische Umsetzung – neun strategische Hebel

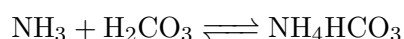
Viele Prozesse wurden historisch als unwirtschaftlich eingestuft, da sie extensive Ressourcen erforderten. Mit der Einführung CO₂-vererbender Systeme, wie der Rock-Cell-Technologie, können solche Prozesse nun effizient skaliert und wirtschaftlich genutzt werden. Petrifikation ist ein solcher Prozess und die Rock-Cell wurde dafür ausgelegt.

1. Passive Phasentrennung: Steuerung von Gas-, Flüssig- und Festphasen

In Abbildung 3 zeigen die Nummern 1 bis 12 Ventile. 14 und 17 zeigen die Druck-Vorkammerzylinder. 13, 15, 16, 18 zeigen die Expansionskörper zum Verschluss der Druck-Vorkammerzylinder. Im Dissolution Containment wird das Rohmaterial sedimentiert auf einem Haufen, darunter befindet sich ein Becken, das mit dem unteren Teil der Druck-Vorkammer verbunden ist. Das vorbereitete Wasser tröpfelt auf den Haufen.

Gedruckte Roboter können von oben mit mobilen Sensoren in die Druck-Vorkammer hineinmessen und die Ventile bedienen. Unter Druck kann Wasser in der Vorkammer mit CO₂ begast und auf pH 4 gesenkt werden. Unter Vakuum kann restliches CO₂ entgast werden (pH 7), und durch Zugabe von Ammoniak kann der pH-Wert auf pH 9 erhöht werden.

Dabei wird das Ammoniak nicht verbraucht, sondern geht in der Druck-Vorkammer 14 mit gelösten CO₂ eine reversible Reaktion zu NH₄HCO₃ ein:



Im sauren Milieu (pH 4) liegt es als Salz vor und trägt temporär nicht zur Basizität bei. Beim Umschalten auf Vakuum wird CO₂ ausgetrieben, und das Ammoniak wird wieder basisch aktiv. Dies ermöglicht einen zyklischen pH-Regelprozess mit minimalem Substanzverbrauch.

Bedeutung dieses technischen Hebels

Die hier vorgestellte Architektur zur passiven Phasentrennung zeigt, dass Rock-Cell keine monofunktionale Speziallösung ist, sondern ein systemisch steuerbarer Prozessraum. Die Fähigkeit, Druck, Vakuum und chemische Milieus kontrolliert zu modulieren, erlaubt eine präzise Steuerung der Reaktionsbedingungen – bei minimalem Energieeinsatz. Damit wird eine Grundlage gelegt für adaptive Materialproduktion: Statt nur ein Reaktionsprodukt zu liefern, kann Rock-Cell situativ verschiedene Ausgangsstoffe, Prozessprofile und Materialformen unterstützen – ohne mechanischen Umbau.

2. Formstabile Permanenz: Formgebung und Verkrustung als Versteinerung

Im traditionellen Kunsthandwerk der Petrifikation wird seit Jahrhunderten mineralreiches Wasser genutzt, um Objekte aus Stein zu formen. Ausgezeichnet als UNESCO Kulturerbe produziert das Unternehmen *Fontaines Pétrifiantes* aus Formen innerhalb eines Jahres bis zu 1 cm dicke Steinobjekte. Die Ergebnisse zeichnen sich durch eine extrem glatte Oberfläche, hohe Härte, feinste Detailtreue und gleichmäßige Farbgebung aus [Fon25].¹

Die Skalierbarkeit dieses Verfahrens ist jedoch begrenzt – durch die Verfügbarkeit stark mineralisierten Quellwassers und die lange Produktionszeit von zwölf Monaten. Diese Einschränkungen überwindet Rock-Cell.

Im *Precipitation Containment* gemäß Abbildung 3 wird das Baumaterial direkt gebildet und gelagert. Die Rock-Cell verpresst biogenes CO₂ in einen geschlossenen Wasserkreislauf mit

¹Reportage zur natürlichen Petrifikationstechnik der Fontaines Pétrifiantes de Saint-Nectaire (Auvergne, Frankreich), einer traditionellen Gesteinsbildungsmanufaktur mit vulkanischem Quellwasser.
YouTube-Video: <https://www.youtube.com/watch?v=PzizJ7YEGdc>

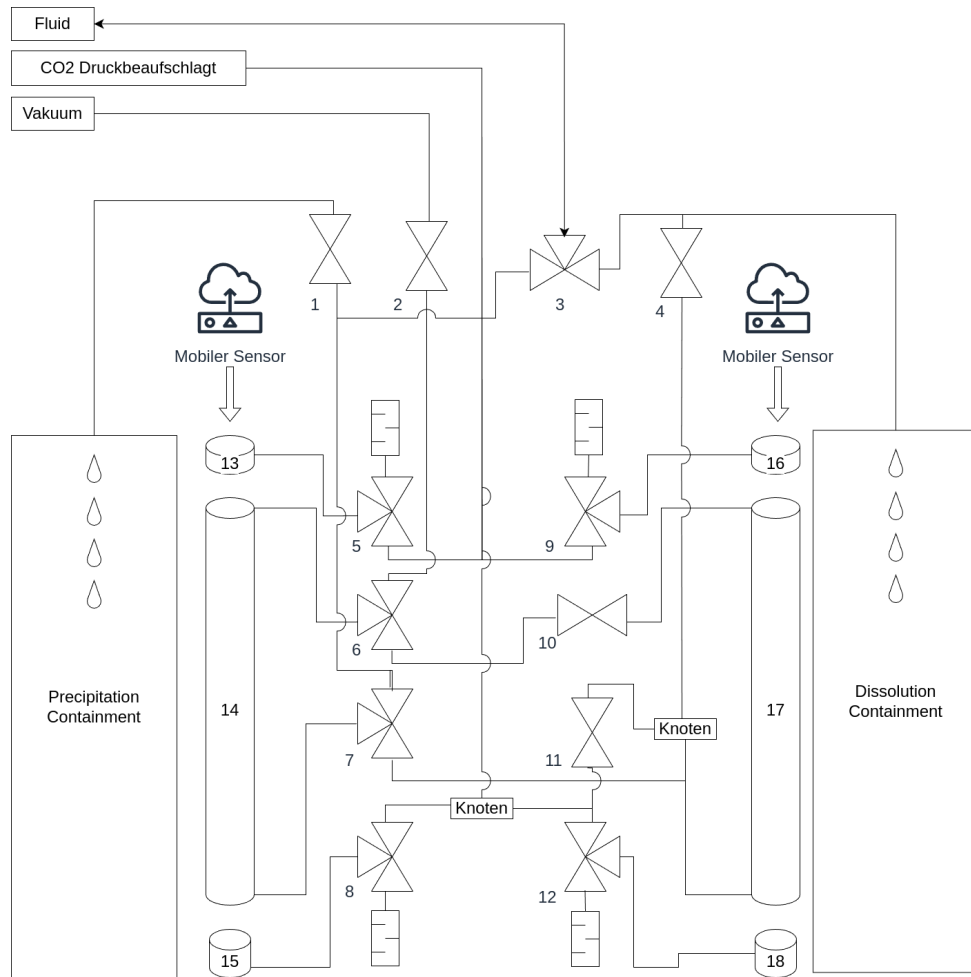


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Rock-Cell (vereinfacht)

wechselnden pH-Phasen, die in der Vakuum-Vorkammer (14) und im Containment zur gezielten Mineralabscheidung führen. Über eine Vakuumleitung wird verbleibendes CO₂ gesammelt, rückgeführt und zur kontrollierten Pulverbildung – insbesondere von Hydromagnesit aus Dunit-Gestein – genutzt.²

Alternativ kann Ca₂SiO₄/MgO aus dem Kanan-Prozess [CK25] in die Rock-Cell eingebracht werden, um im Containment die gezielte Verkrustung von Formen und Strukturen zu ermöglichen – ähnlich dem Prinzip der Petrifikation nach [Fon25].

Zur Markteinführung konzentrieren wir uns auf pulverförmiges Material, das im nächsten Zyklus zu Magnesit reagiert und im Schottverbund strukturell aushärtet – für dauerhafte Formstabilität. Pulver ist in der Frühphase essenziell, da 162 % Replikation allein nicht ausreichen, um den Materialbedarf zu decken. Für einen wirksamen Klimabeitrag muss Rock-Cell frühzeitig stark skalieren – auch unter Einbeziehung herkömmlicher Baustoffe wie Schotter. Mit den ersten Kundenanlagen machen wir den entscheidenden Schritt: Wir qualifizieren die Schotter-Produktion vor Ort in einer Kaskade aus Rock-Cells und ebnen den Weg zur CO₂-Speicherung im Formstein. Denn Formstein-Petrifikation ist mehr als Wissenschaft – sie ist ein Handwerk. Eines, das praktische Erfahrung erfordert – auch für Roboter und künstliche Intelligenz.

Strategische Relevanz dieses Prinzips

Dieses Kapitel dokumentiert eine klare Strategie zur schrittweisen Erweiterung der Rock-Cell-Funktionalität: Vom Pulverprodukt zur Objektverkrustung bis hin zur Formsteinproduktion.

Damit wird ein Prinzip eingeführt, das weit über technische Machbarkeit hinausweist: Kundenanlagen entwickeln sich zur Plattform. Jede neue Anwendung – ob mit eigenen Formen, Substraten oder Partnerprozessen – stärkt das System. Rock-Cell wächst nicht nur in Stückzahlen, sondern auch in Funktionstiefe.

3. Verstärkte Mineralisierung: pH₄-/pH₉-Zyklen zur CO₂-Bindung

Der Aufbau der Rock-Cell folgt einem gespiegelten Design. Dadurch kann der geschlossene Wasserkreislauf umgekehrt oder durch Verschaltung mehrerer Rock-Cells kaskadiert werden – um eine dynamische pH-Zyklisierung in den Containments zu realisieren. Im Einzelbetrieb mit konstantem pH-Milieu wird die Effizienz der Gesteinsverwitterung durch die Ausbildung passivierender Silikatschichten begrenzt. Erst durch zyklische Änderungen zwischen pH 4 und pH 9 lassen sich diese Schichten entfernen – bei gleichzeitig gesteigerter Magnesiumfreisetzung.

1. **Zeit bei** $R = \frac{1 \cdot 10^{-9} \text{ mol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$:

Konservativer Konsenswert für *Enhanced Weathering over Land* unter natürlichen Bedingungen.

2. **Zeit bei** $R \approx \frac{2 \cdot 10^{-9} \text{ mol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$:

Dieser Wert ist angelehnt an [Str+18], basierend auf optimierten pH-Bedingungen. Die Dissolutionsrate reflektiert dabei ein realistisches Potenzial unter feldnahen Verbesserungen.

3. **Zeit bei** $R = \frac{1 \cdot 10^{-8} \text{ mol}}{\text{m}^2 \text{ s}}$:

Unter Laborbedingungen bei pH-Zyklen (pH 4–9) sind stark erhöhte Raten realistisch. Die Entfernung der amorphen Silikatschicht durch basische Spülung steigert die Reaktionsleistung signifikant.

²Langfristige geochemische Permanenz wird durch die kontrollierte Umwandlung von Hydromagnesit zu Magnesit sichergestellt – siehe Abschnitt zur pH-Zyklisierung.

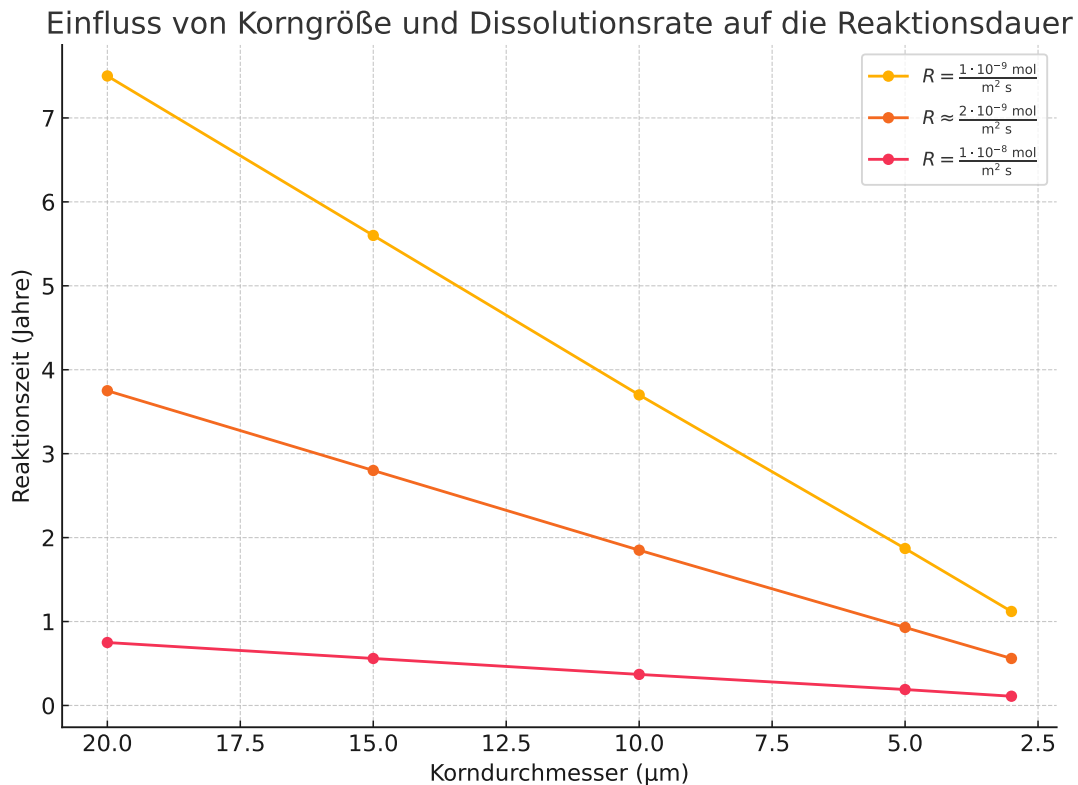


Abbildung 4: Reaktionszeit in Abhängigkeit von Korngröße und Dissolutionsrate. Kleine Körner und hohe Raten führen zu signifikant schnellerer CO₂-Bindung.

Auch die Petrifikation profitiert erheblich von einer Verschaltung vieler Rock-Cells für die gezielte pH-Zyklisierung: Die Rock-Cell erzeugt zunächst amorphe und hydratisierte Karbonate wie Hydromagnesit. Erst durch gezielte und wiederholte pH-Zyklen – insbesondere zyklische Entsäuerung und Realkalisierung – entsteht ein hoher Magnesit-Anteil (MgCO₃), der mit jeder Wiederholung höher wird, so dass über 90 % erreicht werden [Van21]. Dieses Mineral gilt geochemisch als dauerhaft stabil und ist in geologischen Formationen über Jahrmillionen erhalten. Damit ist die Rock-Cell nicht nur aktiv, sondern auch dauerhaft wirksam.

Strategische Relevanz dieses Prinzips

Rock-Cell ist nicht nur dezentral skalierbar und CO₂-vererbend – sie ist auch verschaltbar. Die gezielte pH-Zyklisierung über vernetzte Einheiten hebt die Dissolutionsleistung um **eine bis zwei Größenordnungen** – abhängig von Korngröße, pH-Steuerung und Reaktionsbedingungen. So wird aus langsamer Gesteinsverwitterung ein aktiver Hebel der CO₂-Bindung – optimiert für Replikation, Output und Wirtschaftlichkeit.

4. Dezimale Skalierung: Replikative, zirkuläre und lineare Stoffströme

Die dezimale Skalierungslogik der Rock-Cell bedeutet: **90 %** des Materials sind strukturell repliziert (z. B. karbonatisches Gestein), **9 %** zirkulär gedruckt und vollständig rezyklierbar (z. B. PETG für Ventilgehäuse und Schlauchgeometrien), und nur **0.9 %** verbleiben als klassische lineare Komponenten (z. B. Motoren, Elektronik). Jede dieser Stoffströme folgt dabei einer eigenen technischen und wirtschaftlichen Logik – gemeinsam bilden sie das Rückgrat einer strategisch skalierbaren CO₂-Infrastruktur.

Der scheinbare Widerspruch – dass die Mechanik selbst nicht vollständig repliziert wird – löst sich bei Betrachtung der Replikationskette auf: Entscheidend ist nicht die ästhetische Totalreplikation, sondern die ökonomische Bindung des Systems an seinen eigenen Output. Die zentrale Zusicherung lautet:

Neue Rock-Cells werden vorrangig aus dem Material bestehender Rock-Cells gefertigt.

Dieses Prinzip – wirtschaftlich verankert und technisch umsetzbar – stellt sicher, dass jede Generation in das gleiche Materialnetzwerk eingebunden ist. Die Käuferstruktur profitiert direkt: Wer eine Rock-Cell besitzt, weiß: Nachfolgende Rock-Cell-Kunden sind auf sein Material angewiesen. Der strukturelle Output jeder bestehenden Einheit ist die einzige Quelle für den Aufbau der nächsten – und somit alternativlos.

Konkret bedeutet das: Komplexe Bauteile wie Ventilinseln werden im sogenannten Print-in-Place-Verfahren hergestellt, bei dem mehrere ineinandergreifende Bauteile in einem einzigen Druckvorgang entstehen und sich im Betrieb mechanisch gegeneinander bewegen (dieser Begriff wird im übernächsten Kapitel ausführlicher erläutert), und nach planmäßigem Ablauf (z. B. 3000–10000 Zyklen) vollständig geschreddert, zu Filament recycelt und in verbesserter Form erneut verwendet. Der Schlauch selbst ist druckoptimiert und erreicht mit geometrischer Optimierung Zyklenzahlen, die bisher nur bei Industriestandardkomponenten realisiert wurden. Dies ermöglicht eine vollständig automatisierbare Kreislaufkette innerhalb des PETG-Anteils – einem Material, das auch bei Temperatur- und Witterungsschwankungen formstabil bleibt.

Funktionale und ökonomische Relevanz

Durch dezimale Skalierung entsteht ein Produktionssystem mit extrem hoher Hebelwirkung: Eine Größenordnung mehr bei den replikativen Anteilen – eine weniger bei den kritischen. Die Rock-Cell ersetzt nicht die Industriekomponenten von heute, sondern entwickelt den Materialfluss von morgen: zirkulär, verlässlich und strukturell abgesichert.

5. Unbegrenzte Lebensdauer: Vorwärts- und Rückwärtsproduktion

Das Schotter-Schnur-Verbundsystem der Rock-Cell ist vollständig reversibel, modular und zirkulär. Die Struktur verzichtet auf Beton – vermeidet also nicht nur klassische CO₂-Emissionen, sondern erhält die volle Rezyklierbarkeit der mineralischen Materialien.

Der Aufbau basiert auf karbonatisiertem Schotter, der durch eine durchgehende Basaltfaser-Schnur zu einem stabilen Raumgefüge verspannt wird. Im Rückbau genügt das Freilegen und Aufwickeln des Schnurendes: Die Struktur zerfällt, das Material bleibt nutzbar. Anders als bei Naturstein-Beton-Mischungen gibt es keine verklebten Rückstände. Der Schotter behält seine ursprüngliche Qualität.

Diese Technik orientiert sich am "Rock Print Prinzip der ETH Zürich, das erstmals im Rock Print Pavilion öffentlich demonstriert wurde.³ Die dortige Struktur trug ein Stahldach von einer Tonne Gewicht und durfte von Besuchern begangen werden. Auch historische Vorbilder wie Mauerreste in der Wüste Gobi zeigen: Faserverstärkte Schüttgutstrukturen sind extrem langlebig. Durch ihre Fähigkeit zur dynamischen Reorganisation bei Fundamentbewegungen entstehen keine Risse – ein Schlüssel zu praktisch unbegrenzter Lebensdauer.

Die Rock-Cell nutzt hierfür einen Yaskawa HC10 DT IP67 auf einer mobilen Plattform (Husarion Panther) mit einem gedruckten Multifunktionswerkzeug. Die Schottertraglast beträgt bis

³Rock Print Pavilion – Forschungsdemonstrator für robotergestützten Schüttgutbau, entwickelt von Gramazio Kohler Research (ETH Zürich) im Auftrag des Gewerbemuseums Winterthur. Projektteam: P. Aejmelaeus-Lindström, G. Rusenova (Leitung), H. Mayer, A. Mirjan, E. Lombardini, J. Medina Ibáñez. YouTube-Video

zu 8 kg die Taktzeit etwa eine Minute. Daraus ergibt sich eine Tagesleistung von rund 10 Metern Mauerwerk – im 24/7-Betrieb auch autark.

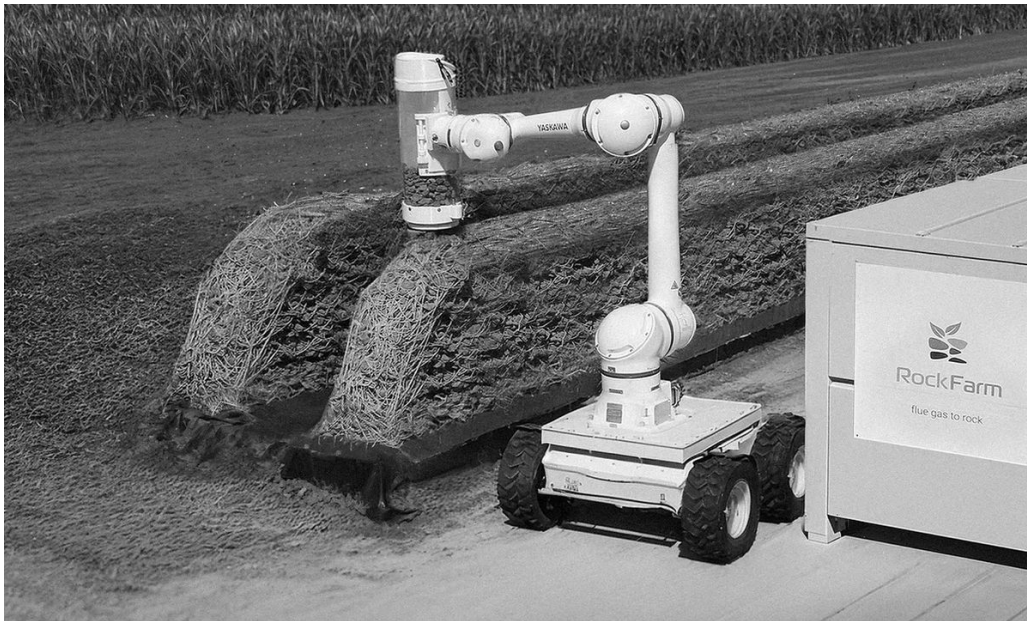


Abbildung 5: Autarker Aufbau durch mobiles Robotersystem: Materialentnahme aus Container, Positionierung, Strukturaufbau.

Bei Standortwechsel kann die Rock-Cell rückstandsfrei entfernt werden – ein Vorteil z.,B. bei Pachtverträgen.

Auch eine gestalterische Integration wurde automatisiert demonstriert: Fassadensteine ermöglichen ästhetisch anspruchsvolle Außenflächen nach Bedarf. Rock-Cell wird so nicht nur funktional, sondern landschaftlich anschlussfähig. Darüber hinaus lässt sich die Dachstruktur durch automatisiertes Farming landwirtschaftlich nutzen – somit kein Verbrauch von Ackerland. Rock-Cell kann Grünstreifen aufwerten. Mit integrierter Bewässerung und robotisch unterstützten Maßnahmen zur Förderung der Artenvielfalt – eine ökologische Aufwertung artenschwacher Ausgleichsflächen.

Fazit: Die eingesetzten Materialien altern nicht – sie können rückgebaut, geschreddert, neu eingesetzt werden. Rock-Cell schafft dauerhafte, aber reversible Werte – eine seltene Kombination in der Bauindustrie.

6. Radikale Maschinen: Universelle und unendliche Systeme

Die Rock-Cell verwendet nur zwei zentrale Baugeräte: einen Cobot auf mobiler Plattform und einen Infinity-Belt-Printer für robotische Strukturteile. Diese radikale Reduktion auf minimale maschinelle Infrastruktur ermöglicht ein robustes, wartungsarmes und hochgradig replizierbares Produktionssystem.

Kostenanalyse: Robotersystem

Bei einem Anschaffungspreis von 40.000€ für Roboter und Plattform (Yaskawa HC10 DT IP67 + Husarion Panther) ergibt sich bei betriebswirtschaftlicher Abschreibung über fünf Jahre ein Jahreskostenanteil von 8.000€. Bei 300 Betriebstagen und 3.000 m jährlicher Mauerleistung entsprechen die Roboterkosten ca. 2,67€ pro laufendem Meter – ein unschlagbarer Wert im Vergleich zu manueller Arbeit oder stationärer Infrastruktur.

Kostenanalyse: Belt-Printer

Der für Struktur- und Funktionsteile eingesetzte Infinity-Belt-Printer kostet ca. 1.000€ und wird für die additive Fertigung sämtlicher nicht-mineralischer Komponenten genutzt – etwa

der Ventilboards, Halterungen und Abdeckungen. Das eingesetzte PETG kostet im Einkauf unter 20€/kg (Großmengen ca. 15€/kg). Durch die "Print-in-Place-Strategie entfällt die Montage fast vollständig: Bauteile werden direkt an Ort und Stelle gedruckt, angepasst und eingesetzt. Sollte ein Teil versagen, wird es geschreddert und direkt neu gedruckt – Reparatur entfällt. Installationskosten sinken auf ein Minimum, und auch die Wartungslogik verändert sich grundlegend: Verschleiß wird durch zyklische Reproduktion ersetzt.

Plattformlogik durch Maschinenuniversalisierung

Die Kombination aus universellem Roboter und kontinuierlich arbeitendem Belt-Printer bildet das Fundament einer maschinellen Plattformstrategie: Ist ein Prozess einmal erfolgreich implementiert, lassen sich weitere extensive, niedrighschwellige Produktionsschritte auf derselben Hardware abbilden. Was heute mit karbonatischem Schotter funktioniert, kann morgen auch für andere Materialprozesse genutzt werden – ohne zusätzliche Maschinen, ohne neue Infrastruktur. Die Replikation der Produktionskapazität wird dadurch nicht nur günstiger, sondern auch universeller.



Abbildung 6: Erweitertes Rock-Cell-Modell: Fließbanddrucker und Roboter in separatem Tunnel mit gedruckter Dachstruktur, autark und unbeaufsichtigt.

Funktionale und ökonomische Relevanz

Die Rock-Cell ist mehr als eine Maschine – sie ist eine universelle Produktionsplattform. Ihre Strukturkomponenten werden direkt vor Ort gedruckt, ihre Prozesse benötigen keine klassischen Montageketten. So entsteht ein System, das nicht nur CO₂ bindet, sondern neue Wertschöpfung erschließt – durch maschinelle Selbstanpassung, Reproduzierbarkeit und kontinuierliche Erweiterbarkeit.

7. Minimale Montage: Vor-Ort- und In-situ-Druckstrukturen

Die Rock-Cell setzt auf radikale Reduktion des Installationsaufwands. Ihre Strukturkomponenten werden nicht vormontiert, sondern direkt vor Ort gefertigt – durch additive Fertigung mit Infinity-Belt-Druckern, die Bauteile millimetergenau in der Zielgeometrie erzeugen.

Diese „Print-in-Place“-Strategie spart nicht nur Logistik- und Lohnkosten, sondern senkt auch das Risiko: Es gibt keine komplexen Baugruppen mit klassischer Montage. Jeder Schritt ist

reversibel, jedes Teil recycelbar – PETG kann direkt geschreddert und erneut extrudiert werden. Sowohl die Installation, also auch der Abbau können autonom umgesetzt werden - und damit auch gleich sortenreines Recycling per Quellcode sicherstellen.

Dadurch entsteht eine neue Kategorie von Produktionslogik: nicht zentralisiert und industriell, sondern dezentral und regenerativ – mit minimalem Installationsbedarf und maximaler Wiederverwendbarkeit.

8. Inhärentes Wachstum: Energetisch tragfähig – wirtschaftlich anschlussfähig

Rock-Cell kann sowohl mit klassischem Silikatgestein (z. B. Dunit) als auch mit karbonatischem Material aus dem sogenannten Kanan-Prozess betrieben werden. Die Wahl des Inputmaterials hängt von Standortfaktoren ab. Während klassisches Direct Air Capture (DAC) sehr viel Energie erfordert, kommt der Kanan-Prozess mit deutlich weniger Energie pro Tonne CO₂ aus und Enhanced Weathering mit Dunit mit nochmal deutlich weniger. Beide Gesteinsarten sind in globalem Maßstab im Überfluss vorhanden und stellen somit keine begrenzenden Faktoren dar. [CK25] [Str+18] Aber dennoch wird DAC von Investoren stark bevorzugt, denn EW gilt als nicht anschlussfähig, da es keinen direkten B2B-nutzen entfaltet.

Warum Rock-Cell B2B-anschlussfähig ist

Rock-Cell schließt die bislang bestehende Lücke zwischen CO₂-Entnahme und realwirtschaftlicher Nutzbarkeit. Während klassische Enhanced-Weathering-Verfahren keine integrierte Wertschöpfung bieten, etabliert Rock-Cell einen B2B-fähigen Kanal durch ein dezentrales Kundenmodell:

- Endkunden (z. B. Nutzer von Tankstellennetzen) erwerben ihre eigene Rock-Cell oder eine anteilige Beteiligung daran.
- Die Rock-Cell erzeugt kontinuierlich CO₂-Gutschriften, die im B2B-Modell nicht durch Verkauf monetarisiert werden müssen.
- Stattdessen können die Gutschriften in einem Partnersystem (z. B. Tankstellennetz) in Rabatte, Bonuspunkte oder Loyaltätsvorteile umgewandelt werden.
- Für die Kunden bedeutet dies: Kein Gewerbe, keine Steuern, keine Komplexität – aber spürbare finanzielle Entlastung bei steigenden CO₂-Preisen.
- Für Unternehmen bedeutet dies: Kundenbindung durch technikbasierte Teilhabe und potenziell anrechenbare Gutschriften im Emissionshandel.

Rock-Cell als strategisches B2B-Werkzeug

Mit Rock-Cell entsteht ein neues Geschäftsmodell im Carbon-Removal-Markt: Endkunden finanzieren CO₂-Speicher, Unternehmen wandeln die entstehenden Gutschriften in Kundenbindung um. Das reduziert Kosten, erhöht Loyalität und ermöglicht regulatorische Anschlussfähigkeit – etwa durch künftige Anerkennung im ETS (z. B. als Teil eines dezentralen Maschinenparks).

9. Generationenhebel: Parent-Child-Logik in technischer Reproduktion

CO₂-Vererbung ist mehr als technische Skalierung – sie ist eine ökonomische Hebelstruktur. Jede Rock-Cell erzeugt nicht nur Gutschriften, sondern auch Vermögenswerte: neue Rock-Cells. Diese „Kind-Zellen“ arbeiten autonom weiter, erzeugen wiederum Gutschriften und Material – und tragen entscheidend zur Amortisation der „Eltern-Zelle“ bei.

Was in der Landwirtschaft durch Saatgut selbstverständlich ist, wird hier technologisch rekonstruiert: Ein Replikationszyklus als ökonomischer Multiplikator.

Pilotprojekte, Entwicklerkits und Zugang für Dritte

Um gezielte Forschung im Bereich vererbender CO₂-Speichertechnologien zu ermöglichen, bieten wir ein speziell angepasstes Developer Kit für Universitäten und Forschungseinrichtungen an. Es basiert auf dem Rock-Cell-Prinzip, wurde in modularer Bauweise für akademische Anwendungen konzipiert und ermöglicht die Untersuchung skalierbarer Clusterstrukturen im Realbetrieb. Die Fähigkeit zur Serienfertigung dieses Developer Kits wurde am Standort Brandenburg erfolgreich getestet. Damit steht Forschungsteams ein erweiterbares Testfeld zur Verfügung, das reale Materialflüsse, pH-Zyklen und Replikationspfade unter kontrollierten Bedingungen erfahrbar macht – ohne dass dafür ein Markteintritt oder Zertifizierungsprozess durchlaufen werden muss.⁴

9 Nachhaltigkeit und regulatorische Einordnung

Nachhaltigkeit durch mineralische Speicherung

Die Rock-Cell-Technologie bindet CO₂ dauerhaft durch Mineralisierung. Im Gegensatz zu biologischen Verfahren wie Aufforstung oder Humusaufbau ist die Speicherform chemisch stabil, nicht biologisch abbaubar und potenziell über Jahrtausende lagerfähig. Dies ist entscheidend für die langfristige Wirksamkeit von Carbon-Removal-Prozessen, insbesondere wenn sie in politische Zielsysteme wie Netto-Null-Strategien integriert werden sollen.

MRV: Messbarkeit, Überprüfbarkeit und Berichterstattung

Für das MRV wird derzeit eine Methode entwickelt, die besondere Transparenz bietet. Nicht das CO₂ wird gemessen, sondern der Input und Output an festem Material und dessen chemische Zusammensetzung per Laborproben. Im Grunde sollen die Anforderungen nicht höher sein als bei klassischer Qualitätsprüfung in der Industrie. Denn Input und Output liegen im selben Jahr, beide sind zugänglich, das Material kann gewogen werden und die chemische Struktur kann jederzeit per Laboranalyse geprüft werden. Das bedeutet mehr Transparenz bei weniger Aufwand.

Ziel ist die Integration in bestehende freiwillige Kohlenstoffmärkte sowie eine anschlussfähige Struktur für zukünftige regulierte Märkte (ETS 2 ab 2027).

Rechtlicher Rahmen: Immissionsschutz und Anlagensicherheit

Für den Einsatz der Rock-Cell an Biogasanlagen ist das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) relevant. Da es sich um eine nachgeschaltete Abgasbehandlung handelt, ist grundsätzlich eine Genehmigung nach BImSchG denkbar, insbesondere wenn zusätzliche chemische Prozesse (z.,B. pH-Zyklen, Filtration) eingebunden sind. Eine rechtliche Bewertung muss im Einzelfall erfolgen und hängt von konkreten Standortfaktoren ab.

Im Hinblick auf bauliche Sicherheit gelten die Vorgaben der Maschinenrichtlinie sowie ggf. die Druckgeräterichtlinie (DGRL), falls bestimmte Druckverhältnisse im Reaktor erreicht werden. Durch das Design mit Druckbehälter stets vom Menschen durch eine Mauer getrennt, wird eine vereinfachte Genehmigung angestrebt. Lediglich von oben besteht eine hypothetische Zugänglichkeit für Menschen, aber hier hat der Druckbehälter elastische Materialien, die nicht splittern - das ist gut für die Zulassung.

⁴Weitere Informationen und Zugänge für Forschungspartner finden sich unter www.rock-cell.com/academic

Anerkennung auf dem Emissionsmarkt (ETS)

Langfristig ist die Integration der Rock-Cell in das europäische Emissionshandelssystem (ETS) anzustreben. In einem zukünftigen ETS für den Gebäudesektor oder die Landwirtschaft könnte die Technologie als Baustein einer negativen Emissionsstrategie anerkannt werden – vorausgesetzt, es existieren validierte Methoden für Removal-Kompensationen (Carbon Removal Certification Framework, CRCF). Bis dahin fokussiert sich Rock-Cell auf die freiwilligen Märkte, schafft aber zugleich eine auditierbare technische Grundlage für spätere regulatorische Anerkennung. Für freiwillige Märkte gilt, dass Zertifikate von Marktplätzen häufig erst erteilt werden, wenn die FOAK-Anlage im Probebetrieb läuft.

Ausblick

Rock-Cell ist als Technologie so konzipiert, dass regulatorische Komplexität minimiert und gleichzeitig Anschlussfähigkeit an relevante Gesetzesrahmen maximiert wird. Nachhaltigkeit bedeutet hier nicht nur Speicherstabilität, sondern auch politische Zukunftsfähigkeit.

10 Grenzen und Abgrenzungen

Technische Grenzen: 10 % externe Materialien bleiben erforderlich

Trotz eines Replikationsgrades von 90 % ist Rock-Cell auf externe Komponenten angewiesen – insbesondere Elektronik, Robotik, Mahlanlagentechnik. Diese Teile lassen sich nicht replizieren und müssen aus industriellen Lieferketten bezogen werden. Der Replikationsfaktor bleibt dennoch hoch, da diese Bauteile in der Gesamtmasse eine untergeordnete Rolle spielen. Ihre Versorgung kann bei Unterbrechung jedoch zum temporären Stillstand führen.

Skalierungsgrenzen durch Logistik und Regulierung

Wesentliche Engpässe bei der großflächigen Verbreitung sind:

- **Zugang zu geeignetem Rohmaterial** (z. B. Dunit) in ausreichend feiner Körnung und regionaler Nähe
- **Regulatorische Unsicherheit**, z. B. bezüglich Carbon Credit Anerkennung, Abgasbehandlung oder Immissionsschutz
- **Technologische Reife** des Gesamtsystems, insbesondere bei der vollständigen Automatisierung der Replikation

Diese Grenzen sind jedoch keine strukturellen Blockaden, sondern skalierungsabhängige Reibungspunkte, die durch Forschung, Investitionen und Partnerschaften aufgelöst werden können.

Abgrenzung zu Pyramidensystemen

Rock-Cell ist ein technisches System zur CO₂-Entfernung – kein Finanzprodukt. Rückflüsse entstehen nicht durch den Verkauf an neue Investoren, sondern durch real erzeugte, messbare CO₂-Gutschriften und physisch produziertes Baumaterial. Es gibt:

- keine Vertriebshierarchien,
- keine Versprechen auf garantierte Gewinne,

- keine systemische Abhängigkeit von Neuinvestitionen.

Replikation ist hier ein technisches, kein finanzielles Prinzip. Es ersetzt die industrielle Produktionskette – nicht das Marktmodell.

Realistische Erwartungen statt Visionäres Framing

Die Technologie verspricht keine Wunder, sondern folgt einem realwirtschaftlichen Prinzip: Günstige Prozesse skalieren über Anzahl, nicht über Intensität. Diese Logik ist neu, aber solide begründbar. Frühzeitige Pilotierungen sollen Transparenz und empirische Datenbasis schaffen – ohne Marktübertreibung oder Hype-Narrativ.

Grenzen benennen, Vertrauen schaffen

Offenheit über Replikationsgrenzen und regulatorische Hürden ist Teil der Strategie: Rock-Cell ist nicht fehlerfrei, aber lernfähig – und transparent dokumentiert. So entsteht Vertrauen durch nachvollziehbare Begrenzung statt überhöhtes Versprechen.

11 Ausblick und gesellschaftliche Bedeutung

Perspektivsatz: Durch CO₂-Vererbung wird Carbon Removal wirtschaftlich eigenständig. Diese neue Wirtschaftlichkeit macht CO₂-Speicherung zur selbstverständlichen Infrastruktur – dezentral, regional und integraler Bestandteil einer regenerativen Wirtschaft. Carbon Removal entwickelt sich damit zu einem Wachstumstreiber, der nicht nur bestehende Märkte transformiert, sondern neue Märkte schafft. Was früher das schwarze Gold war, wird künftig Kohlenstoff sein – intelligent gebunden in Vermögenswerte, die marktübergreifend Wachstum ermöglichen.

Von Verzichtsnarrativen zu Teilhabelogiken

In der öffentlichen Diskussion wird Klimaschutz häufig mit Einschränkung und Verzicht gleichgesetzt. Technologien wie Rock-Cell kehren diese Perspektive um: Wer CO₂ speichert, wird nicht zum „Kompensierer“, sondern zum Teil eines positiven, sichtbaren Transformationsprozesses – inklusive wirtschaftlichem Rückfluss.

Diese Form der Teilhabe ermöglicht neue gesellschaftliche Allianzen, insbesondere mit Zielgruppen, die bislang eher skeptisch gegenüber Klimapolitik eingestellt waren. Dort, wo emotionale Bindung an Technik, Freiheit oder Mobilität besteht, entsteht plötzlich Anschlussfähigkeit: Nicht durch Moral, sondern durch Mitsprache und Nutzen.

Der Stein als Symbol: Ein neues Statusobjekt?

Der NFC-fähige Stein, der jeder Rock-Cell zugeordnet ist, ist mehr als eine Benutzeroberfläche – er ist ein Symbol für Besitz, Verbundenheit und Transparenz. Er verknüpft das Immaterielle (Digitalisierung, Kohlenstoffmärkte) mit dem Greifbaren (Material, Maschine, Ort).

Statt intransparentem Offset entsteht eine neue Form technischer Präsenz im Alltag: sichtbar, kontrollierbar, identifizierbar. Es ist denkbar, dass sich daraus neue Rituale und Identitäten entwickeln – ähnlich wie bei Photovoltaikanlagen oder Elektroautos: Wer besitzt, partizipiert – und zeigt Haltung.

Regionale Verankerung und neue Produktionsräume

Rock-Cell ist dezentrale Infrastruktur. Jede Maschine steht an einem konkreten Ort, in Verbindung mit regionalen Partnern, Landwirten, Energieversorgern, Handwerksbetrieben. Diese Sichtbarkeit ist kein Nebeneffekt, sondern bewusst gestaltetes Element – denn nur so kann gesellschaftliche Akzeptanz entstehen.

Die neue industrielle Wertschöpfung verlagert sich: weg von zentralisierten Großstrukturen, hin zu modularen, skalierenden Inseln. Dort, wo früher Biogasanlagen, Kiesgruben oder Windparks allein wirtschaftlich betrieben wurden, entstehen nun hybride Produktionsorte – sichtbar, zugänglich, kommunizierbar.

Skalierung mit gesellschaftlichem Rückhalt

Skalierung ist nicht nur eine technische Herausforderung, sondern eine soziale. Rock-Cell begegnet ihr durch Transparenz, Modularität und aktiven Einbezug von Endnutzern. Der Zugang über den persönlichen Stein, die Besichtigung der Maschine, das eigene Narrativ („meine Zelle arbeitet für mich“) sind zentrale Bausteine einer neuen ökologischen Ökonomie.

Dort, wo soziale Akzeptanz heute oft kippt – beim Netzausbau, bei CO₂-Steuern, bei individuellen Einschränkungen – entsteht mit Rock-Cell eine gegenteilige Dynamik: Die Technik ist nicht Belastung, sondern Angebot.

Fazit: Vom Klimakostenfaktor zum Teilhabeobjekt

Rock-Cell ist nicht nur Technologie, sondern Infrastruktur einer neuen Generation: Sie schafft Rückfluss statt Belastung, Beteiligung statt Ermahnung, Präsenz statt Intransparenz. Und sie zeigt, dass selbst die abstrakteste Form von Klimaschutz – CO₂-Entfernung – konkret, erfahrbar und gesellschaftlich wirksam werden kann.

Literatur

- [CK25] Yuxuan Chen und Matthew W. Kanan. „Thermal Ca²⁺/Mg²⁺ exchange reactions to synthesize CO₂ removal materials“. In: *Nature* 638.8052 (2025), S. 972–979. DOI: 10.1038/s41586-024-08499-2. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08499-2>.
- [Fon25] Fontaines Pétrifiantes. *Savoir-Faire – Artisanat de la pétrification*. Zugriff am 30.04.2025. 2025. URL: <https://www.fontaines-petrifiantes.fr/artisanat/savoir-faire/>.
- [Str+18] Jessica Streffer u. a. „Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks“. In: *Environmental Research Letters* 13.3 (2018), S. 034010. DOI: 10.1088/1748-9326/aaa9c4.
- [Van21] V. Vandeginste. „Effect of pH Cycling and Zinc Ions on Calcium and Magnesium Carbonate Formation in Saline Fluids at Low Temperature“. In: *Minerals* 11.7 (2021), S. 723. DOI: 10.3390/min11070723.