Whitepaper Generative Produktion

Aktivierung von Kautionsliquidität zur Dekarbonisierung

Rock-Farm GmbH | CEO: Dr. Tobias Brett

5. Oktober 2026

Zusammenfassung

Rock-Cell bindet CO_2 mineralisch und erzeugt dabei Baumaterial. Diese Koppelproduktion ist der Kern der Innovation: Weil jede Rock-Cell aus demselben Prozess gebundenes CO_2 und Baumasse liefert, kann die Wohnwirtschaft selbst zum Produzenten ihres Baustoffs werden – vertikale Integration ohne Baustoffwerk dazwischen. Die Baumasse geht zunächst in weitere Rock-Cells, nach der Qualifizierung als Formbaustoff in den Wohnungsbestand. Horizontal skaliert das Modell über die Mieter: Jede Mietkaution, die als Rock-Cell angelegt wird, fügt eine dezentrale Produktionseinheit hinzu, die weniger kostet als die Kaution selbst. Dieses Whitepaper beschreibt Technik, Stoffbilanz und Kostenlogik dahinter; alle Zahlen sind Modellrechnungen, keine Zusagen.

Status: TRL 7 – Strategisches Working Paper zur Aktivierung von Kautionsliquidität

Übersicht

1 Der Systemwechsel – Warum jetzt? 2
2 Wirtschaftliche Logik und Koppelproduktformel 4
Gate-Entscheidung und Exit-Szenarien . 7
3 Warum Enhanced Weathering hier nicht der Maßstab ist 8
4 Technische Umsetzung – neun strategische Hebel 10
5 Nachhaltigkeit und regulatorische Einordnung 18
6 Grenzen und Abgrenzungen 19
7 Ausblick und gesellschaftliche Bedeutung 20

1 Der Systemwechsel – Warum jetzt?

Szenariorahmen: Strukturprüfung unter gesetzten Annahmen

Dieser Abschnitt führt eine Strukturprüfung unter bewusst gesetzten Annahmen durch. Er fragt, wie ein System beschaffen sein muss, damit CO_2-Entfernung marktwirtschaftlich trägt – unabhängig davon, ob ein staatlich gesetzter CO_2-Preis existiert. Die Zahlen dienen der Prüfung dieser Struktur; wo sie in eine Ertragsrechnung münden, ist diese als Modellrechnung ausgewiesen und keine Zusage. Ein operatives Geschäftsmodell folgt aus der Strukturprüfung nicht unmittelbar – es wird im weiteren Verlauf dieses Abschnitts entwickelt und im *Protokoll* für Vermieter ausgeführt.

Maßstab. Wer extreme Klimaszenarien in Kauf nimmt, hat langfristige Stabilität als Ziel bereits aufgegeben. Das ist keine Prognose eines Zusammenbruchs: Mittelfristig bleibt die Ordnung tragfähig genug, dass ein Qualifizierungsverfahren von rund zehn Jahren darin Platz hat und eine Wachstumsphase sich entfalten kann. Die Aussage betrifft den Maßstab, an dem Risiken gemessen werden.

Verhältnismäßigkeit. Dauerhafte („novel“) CO_2-Entfernung – BECCS, DACCS, Biochar, beschleunigte Verwitterung, mineralische Karbonatisierung – liegt derzeit bei rund 2 Mt CO_2 pro Jahr. Paris-konsistente Szenariogruppen erreichen bis 2050 im Median 1,6 Gt, 2,2 Gt beziehungsweise 3,5 Gt CO_2 pro Jahr; die Einzelmodelle streuen dabei weit, mit Untergrenzen ab 0,6 Gt (*The State of Carbon Dioxide Removal*, 3. Ausgabe 2026, Tab. 8.2). Die auf die Szenariendatenbank des IPCC AR6 gestützte erste Ausgabe kam auf dieselbe Größenordnung. Auch am unteren Rand bleibt das eine Skalierung um mehr als zwei Zehnerpotenzen, im Median um rund drei. Skalierungsfähigkeit ist damit keine Zusatzeigenschaft, die eine Lösung haben darf, sondern eine Anforderung, die über ihre Relevanz entscheidet.

Dauerhaftigkeit. Mineralisch gebundener Kohlenstoff bleibt ohne fortlaufende Überwachung gebunden. Die Dauerhaftigkeit ist eine Eigenschaft des Materials, nicht einer Institution, die sie über Jahrzehnte bestätigen muss. Die Messung und Zertifizierung der Entnahme selbst bleibt davon unberührt.

In der neuen Welt der autonomen Produktion durch AI, Additive Manufacturing (AM) und Robotik wird Ertrag nicht mehr hart erarbeitet, sondern systemisch ausgeschüttet. Die konventionelle Produktion folgt einer veralteten linearen Logik: Produktentwicklung (CAPEX-Kapital), dann Fabrikbau (CAPEX-Kapital) und dann laufende Produktion (OPEX-Kapital). Da jeder dieser Schritte massiv Ressourcen verbraucht, kann das Endprodukt niemals kostenlos sein. Dieses Modell zwingt die Wohnwirtschaft in eine Spirale aus hohen Kosten und „toter“ Kaution.

Wir haben die Produktion für die Ära der Autonomie neu erfunden. Da klassische Fabriken zu schwerfällig für diese Vision sind, nutzt Rock-Cell den Stand der Technik, um den Prozess umzukehren: Weg von zentralen Fabrikanten, hin zur dezentralen, autonomen Wertschöpfung, die kostenlose Gutschriften erst möglich macht.

Die Aktivierung des Protokolls

Der Kautionsmarkt ist für generative Produktion ideal geeignet: Er ist gigantisch, aber auf Millionen Einzelkonten im Privatbesitz zersplittert, und er ist nur zugänglich, wenn Vermieter von der Sicherheit unserer Lösung überzeugt sind (Gatekeeper). Für Großinvestoren uninteressant – für unser Protokoll aber genau der richtige Hebel, weil die Kaution hier **zuerst Sicherheit bleibt**: Die Kaution des Mieters wird nicht zu Risikokapital, sondern zu einer ertragstragenden Sicherheit, die real an Wert gewinnt statt zu erodieren. Der Finanzierungseffekt für die generative Produktion ist ein Nebeneffekt dieser Sicherungsfunktion, keine Umwidmung von Mieterkapital in Kapital für Vermieter oder Betreiber.

So funktioniert die generative Produktionsmaschine (Rock-Cell)

- **Input (CO_2):** Wird unmittelbar in das erste Produkt (die CO_2-Gutschrift) umgewandelt.
- **Output (Material):** Fließt direkt in die physische Vermehrung der Produktionskapazität zurück.
- **Die Kosten-Innovation:** Während das Altsystem jede Rechnung auf den Kunden umlegt, finanziert bei Rock-Cell die bezahlte Bestellung einer neuen Zelle den laufenden Produktionszyklus der Mutter-Zelle. Betrieb und Wachstum sind dabei zyklusweise entkoppelt, nicht dauerhaft: Bleibt eine Bestellung aus, ruht der unfinanzierte Zyklus, vorhandenes Inventar puffert die Lücke, und die Zelle pausiert speicherbegrenzt (Kapitel 9).
- **Kostenbild:** Die Grenzkosten der Gutschrift sinken gegen null (Herleitung Kapitel 5); der Preis einer neuen Rock-Cell liegt bei 470,00 €.
- **17 % CO_2-Ertrag:** Jahreszielwert durch die Arbitrage zwischen den gegen null sinkenden Grenzkosten und dem Kalkulationswert von 80 €.
- **17 % Material-Prämie:** Direkte Teilhabe des Mieters am Jahresertragswert physisch produzierten Baustoffs: 80 € je gehaltener Unit (nachfrageabhängig).

Hebel & Rendite: Der Link zum Dossier

Die hier aufgeführten Zielwerte von **34 % p.a.** (aufgeteilt in 17 % CO_2-Yield und 17 % Material-Prämie) sind das Ergebnis einer spezifischen wirtschaftlichen Modellrechnung für die Wohnwirtschaft.
Technischer Hintergrund: Zwei unterschiedliche Größen stecken hinter den Zielwerten. Der Generationenhebel Faktor 1,6 ist das Bauverhältnis der Vermehrung: Der jährliche Schotter-Output einer Zelle deckt systemisch die Baumasse für 1,6 neue Produktionseinheiten. Davon zu unterscheiden ist das stöchiometrische Massenverhältnis der Mineralisierungsreaktion selbst, 1,62 (Kapitel 3) – beide Werte liegen numerisch nah beieinander, sind aber unabhängige Größen.
Wirtschaftliche Umsetzung: Die detaillierte Herleitung der Recovery-Rate (32 Monate) und die rechtliche Gestaltung der Kautions-Aktivierung sind im *Protokoll* für Vermieter beschrieben.

Die Vermehrung (Die Natur als Algorithmus)

In der Natur kostet Wertschöpfung nichts, weil sie auf echter Vermehrung basiert. Ein einzelner Baum wächst langsam, aber ein ganzer Wald produziert Tonnen an Material, ohne jemals eine Rechnung zu schreiben. Rock-Cell überträgt diese Null-Kosten-Logik auf Maschinen. Keine perfekte Vermehrung, aber 90 %. Wir setzen auf physikalische Hebel:

- **Faktor 1,6 – Der Generationenhebel:** Der Materialoutput einer Mutter-Zelle liefert je Jahr die Baumasse für 1,6 neue Zellen. Betrieb und Vermehrung sind zyklusweise entkoppelt: Ohne neue Bestellung ruht der unfinanzierte Zyklus, vorhandenes Inventar puffert die Lücke, und die Zelle pausiert speicherbegrenzt, bis sich ein Käufer findet (Kapitel 9).
- **Faktor 2 – Der Massehebel:** CO_2 wird im Material gebunden und verdoppelt die produzierte Materialmasse.
- **CO_2-Preishebel:** Steigt der CO_2-Preis, steigt die relative Wettbewerbsfähigkeit unseres Baumaterials gegenüber emissionsintensivem Zement – eine Modellannahme, kein hergeleiteter fester Faktor.
- **Faktor 200 – Der Zeithebel:** Zeit ist 200-mal billiger als für die konventionelle Produktion.

Marktinvasion über 17 Generationen

Durch die niedrigen Grenzkosten der generativen Produktion wächst dieses Protokoll ohne externe Finanzierung über 17 Jahre aus dem Kautionsmarkt (Modellrechnung). Ab dem Jahr 10 stellt das Protokoll von Vermehrung auf massive Baumaterialproduktion um. Sollte Carbon Removal künftig im ETS2 anrechenbar werden – eine deklarierte, politisch noch nicht beschlossene Perspektive, kein einkalkulierter Bestandteil des heutigen Modells –, wäre das zusätzliches Aufwärtspotenzial für den CO_2-Preishebel. Freiwillige Zertifikate erfüllen für sich genommen keine ETS-Pflichten.

Generativer Zement

Energieintensive Betonproduktion wird durch karbonatischen Zement ersetzt. Um 1,6 Tonnen $MgCO_3$ oder $CaCO_3$ pro Jahr zu generieren, berechnen wir den Puls der Rock-Cell so, dass sie etwa alle 20 Minuten neu prozessiert wird. pH-Wechsel durch Druckwechsel in der Vorkammer ist solide Ingenieurskunst – der „Puls“ der generativen Produktion.

Die Qualifizierungsphase

Rock-Cell nutzt die ersten 10 Jahre für die Qualifizierung von biomineralisiertem Material für die Wohnwirtschaft. Vom Porenstein zum Massivstein: Das Material selbst entsteht durch die mineralische Karbonatbildung im Rock-Cell-Prozess. Die Biomineralisierung setzt darauf auf – sie ist ein Härtungs- und Nachverdichtungsschritt am bereits gewachsenen Material, ausgeführt unter leichtem Einpressdruck, mit dem Ziel, die Festigkeit von Standardbeton zu erreichen oder zu übertreffen. Das Rock-Cell-Material ist validiert für den Bau neuer Rock-Cells.

Der Festigkeitspfad beruht dabei auf einem strukturellen Vorteil des Verfahrens: Biomineralisation – die mikrobiell induzierte Carbonatfällung, die als Methode zur Härtung und Selbstheilung von Beton etabliert ist – braucht vor allem eines: Zeit. In thermischen Produktionsketten scheitert sie genau daran, denn dort ist Zeit der teuerste Faktor. Der Rock-Cell-Prozess kehrt dieses Verhältnis um: Das Material reift ohnehin über einen Zyklus von 12 Monate im feuchten, pH-kontrollierten Milieu – die Bedingungen, unter denen Biomineralisation wirkt, liegen also bereits vor und lassen sich ohne zusätzlichen Prozessschritt nutzen. Derselbe Pfad steht grundsätzlich auch für die Nachbehandlung von Standardbeton offen. Daraus folgt ein Entwicklungspfad zu Material, das die Festigkeit von Standardbeton übertrifft – als Ziel der Qualifizierungsphase, belegt erst mit deren Material-Validierung.

2 Wirtschaftliche Logik und Koppelproduktformel

Einleitung: Koppelproduktion als Enabler der vertikalen Integration

Eine Rock-Cell liefert aus einem Prozess zwei Produkte: gebundenes CO_2 und Baumaterial. Dass beide gekoppelt anfallen, macht die vertikale Integration in die Wohnwirtschaft möglich. Die Baumasse geht zunächst in neue Rock-Cells und nach der Qualifizierung als Baustoff in den Bestand der Vermieter; der Wert des gebundenen CO_2 wird über den ETS 1 oder den freiwilligen Markt realisiert. Weil die Anlagen weniger kosten als eine Mietkaution und dezentral stehen, skaliert das Modell horizontal über die Mieter und ihre Kautionen statt über Werke mit hohem Durchsatz. Kosten, die sonst allein der CO_2-Bindung zugeordnet würden, fließen dabei zum Teil in den Aufbau der nächsten Rock-Cells. Die folgenden Abschnitte leiten diese Kostenlogik formal her. Die Zurechnung gemeinsamer Kosten auf zwei Koppelprodukte bleibt dabei eine Konvention, keine eindeutige Lösung.

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 CO_2 (Produkt A: Gutschrift) und produziert gleichzeitig Baumaterial für ihre eigene Folgegeneration (Produkt B).

Formelwerk: Ableitung der Koppelproduktlogik

Die wirtschaftliche Bewertung technischer CO_2-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 CO_2-Entfernung:

$$c_{\mathrm{tCO_2,lin}} = \frac{c_{\mathrm{CAPEX}}}{L} + c_{\mathrm{OPEX,Jahr}} \tag{1}$$

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 CO_2 und (B) ein Baumaterial, das das gebundene CO_2 enthält und zum Bau von Replikaten des Systems genutzt wird.

Wir definieren eine Nennproduktionsrate von $1\,\mathrm{tCO_2e}$ 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):

$$c_A = \frac{c_{\text{CAPEX}}}{L \times Q_A} \tag{2}$$

$$\text{mit} \quad Q_A = 1 \quad \text{(1 Tonne } CO_2\text{e pro Jahr)}$$

$$\Rightarrow c_A = \frac{c_{\text{CAPEX}}}{L} \tag{3}$$

Für Produkt B (Baumaterial):

$$c_B = \frac{c_{\text{OPEX}}}{Q_B} \tag{4}$$

$$\text{mit} \quad Q_B = d \times Q_A$$

$$\Rightarrow c_B = \frac{c_{\text{OPEX}}}{d} \tag{5}$$

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:

$$r \cdot c_{\text{CAPEX, Kind}} = c_{B,\text{Eltern}} \tag{6}$$

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:

$$r = \frac{c_B}{c_{\text{CAPEX}}} \tag{7}$$

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 Sachwertvermehrung durch CO_2-Bindung 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 CO_2-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 CO_2-Bindung: d
- Lebensdauer des Systems: L

ergibt sich folgende Formel für die spezifischen Kosten der CO_2-Entfernung im Replikationsmodell:

$$c_{\mathrm{tCO_2,rep}} = \frac{c_{\mathrm{OPEX}}}{r \cdot d \cdot L} \tag{8}$$

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.

Gate-Entscheidung und Exit-Szenarien

Die Replikationsphase ist endlich angelegt. Der Gesamtpfad umfasst 17 Jahre; in Jahr 10 fällt eine fest terminierte Gate-Entscheidung – unabhängig davon, ob die Zertifizierung des Materials bis dahin abgeschlossen ist. So kann sich die Entscheidung nicht schrittweise verschieben. Entschieden wird zwischen zwei Exits. Maßstab sind die beiden freien Variablen des Modells: der CO_2-Preis und die Qualifizierung des Materials.

Exit 1: stationärer Betrieb. Er wird gewählt, wenn eine der beiden Variablen ungünstig steht: Der CO_2-Preis stagniert (Szenario A, 80€/t), oder die Qualifizierung des Materials verzögert sich. Die Replikation endet. Die Bestandszellen schließen ihre Zyklen ab und laufen im selbstverzehrenden Betrieb bis zur Amortisation weiter (folgender Abschnitt). Neue Rock-Cells entstehen nur noch gezielt für Anwendungen mit vorliegender Zertifizierung. Weil keine neuen Zellen mehr verkauft werden, entfällt die Material-Prämie. Ist das Material später qualifiziert, kann die Flotte ohne technische Umrüstung in Exit 2 wechseln.

Exit 2: Markteintritt in den Baustoffmarkt. Er setzt voraus, dass beide Variablen günstig stehen: Das Material ist qualifiziert, und der CO_2-Preis erreicht mindestens Szenario C (150€/t), bei Materialkosten von rund 125€/t durch Skaleneffekte. Dann wird Wachstum zu einem wirtschaftlichen Optimierungsparameter: Rock-Cell liefert Baumaterial an die Wohnwirtschaft und tritt gegen thermisch hergestellten Zement an (Referenz rund 190€/t). Bei Szenario C liegt Grenzkosten-Parität zum konventionellen Baustoff; oberhalb von Szenario E (300€/t) wächst der Abstand. Stagniert der CO_2-Preis bei Szenario A, führt auch eine erfolgreiche Qualifizierung nicht in Exit 2; die Flotte bleibt in Exit 1. Nur auf dem Pfad von Exit 2 ist der Bezug von Baumaterial durch Vermieter über eine Netzwerk-Genossenschaft vorgesehen (Protokoll für Vermieter, Abschnitt 3.6).

Rechtzeitigkeit. Beide Exits sind geplante Übergänge. Wird ein Exit rechtzeitig umgesetzt, entsteht den Beteiligten daraus kein zusätzliches Risiko, denn die Absicherung der Kautionen hängt nicht am Wachstum (Protokoll für Vermieter, Kap. 3). Wird ein Exit verspätet umgesetzt – etwa eine Replikation über die tatsächliche Nachfrage hinaus –, können alle Beteiligten Nachteile erleiden: Mieter, Vermieter und Betreiber. Das Modell ist eine Strategie mit benannten Annahmen und einer verbindlichen Gate-Entscheidung, keine Prognose.

Der selbstverzehrende Betrieb: Kostenbasis des stationären Modus (Exit 1)

Die bisherigen Gleichungen beschreiben die *Replikationsphase*: Jede verkaufte Zelle bringt 470,00€ ein, von denen 420,00€ Herstellung, Betrieb und Marge decken. Endet die Replikation – der stationäre Modus des Protokoll-Exits 1 –, stellt sich die Kostenfrage neu: Was kostet der Weiterbetrieb einer Bestandszelle, wenn keine neuen Zellen mehr gefertigt werden?

Ausgangspunkt der Antwort ist die bekannte Kostenbasis der Replikationsphase: 420,00€ je Zelle und Jahr. Der stationäre Modus senkt sie ab, weil sein Ziel allein das *Erreichen der Amortisation* ist, nicht unbegrenzte Laufzeit: Das Equipment hält gerade noch durch und ist danach unbrauchbar – ein *selbstverzehrender* Betrieb ohne Langzeitinstandhaltung. Die folgenden Maßnahmen machen die Absenkung von 420,00€ auf den **Betreiber-Mindestumsatz**

im stationären Modus von 352,00 € je Unit und Jahr plausibel (vorläufige Schätzung; die Bezifferung der einzelnen Positionen steht aus). Diese Größe ist die Schwelle, ab der der Betreiber eine Bestandszelle weiterbetreibt – eine Kostengröße, keine Leistung und kein Ertrag:

- **Gesteinsmahlung mit Eisenkugeln statt Keramik.** Die Folgeschäden werden bewusst in Kauf genommen: Der hohe Eisengehalt im Wasserkreislauf schädigt die Pumpen, Inkrustation setzt die Rohrleitungen zu.
- **Gegebenenfalls gröbere Mahlung.** Sie verlangsamt die Reaktion; dieser Zeiteffekt wird hier bewusst nur qualitativ genannt und nicht beziffert.
- **Robotik auf Verschleiß.** Vorhandene Roboter laufen bis zum Ausfall, es wird nicht neu beschafft.
- **Keine neuen Drucker.** Der Filament-Kreislauf nutzt ausschließlich vorhandene Maschinen.
- **Sonderkonditionen mit Biogasbetrieben.** Abgesenkte Standortgebühren im stationären Modus sind ein realistisches Vertragsmodell, aber eine Mutmaßung – solche Verträge existieren noch nicht.

Die scheinbare Inversion. Auf den ersten Blick wirkt es widersprüchlich, dass die Basisrechnung des Modells mit 80 € je Tonne rechnet – bewusst *unterhalb* der beobachteten Marktspanne permanenter Removal-Zertifikate (350–450 €/t) –, während die Überlebensschwelle des stationären Modus bei 1 t CO_2e je Unit einem Tonnenerlös von 352,00 € entspricht und damit *oberhalb* des Kalkulationswerts, nahe am unteren Rand ebenjener Spanne liegt. Die Auflösung: Beide Größen beantworten verschiedene Fragen. Der Kalkulationswert 80 € ist die konservative Ertragsannahme der *Ertragsrechnung* in der Replikationsphase, in der der Betrieb über den Zellverkauf getragen wird. Die Schwelle dagegen misst, wann sich der *Weiterbetrieb ohne Zellverkauf* für den Betreiber trägt – und die Messlatte dafür ist der tatsächlich am Markt erzielbare Preis, nicht die konservative Rechenannahme. Hinzu kommt der Zeithorizont: Exit 1 steht frühestens mit der Gate-Entscheidung in Jahr 10 an. Ein CO_2-Preis, der bis dahin bei 80 € je Tonne stagniert, wäre ein Pfad, der die 2-°C-Ziele deutlich verfehlt; anerkannte Preispfade (etwa die *IEA Net Zero Roadmap*) planen den Anstieg über diesen Zeitraum ein. Die Schwelle wird also nicht allein am heutigen Marktboden gemessen, sondern am Preisniveau des Entscheidungszeitpunkts – ohne dass das Modell diesen Anstieg einpreist: Der Kalkulationswert der Basisrechnung bleibt 80 €. Alternativ trägt der Materialkanal die Schwelle allein bei 110 €/t auf den Jahresoutput von 3,2 t je Zelle.

Offen benannt: Die Schwelle liegt nur knapp über der Untergrenze der beobachteten Spanne – für sich genommen läge der Verdacht nahe, die Zahl sei rückwärts an die Marktspanne angepasst. Dagegen steht ihre Herleitungsrichtung: Sie ist nicht vom Markt her gewählt, sondern als Absenkung der bekannten 420,00 €-Kostenbasis über die vorstehende Maßnahmenliste begründet. Was aussteht, ist die Bezifferung der einzelnen Positionen; bis dahin trägt die Zahl den Status einer vorläufigen Schätzung.

3 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 CO_2-Entfernung. Der Grund: Mineralische Prozesse sind schwer skalierbar, verursachen hohe Transport- und Mahlkosten und binden CO_2 nur langsam. Doch diese Sichtweise greift zu kurz – weil sie von einem linearen Kostenmodell ausgeht. Sie betrachtet den Prozess rein als Dienstleistung: Input rein, CO_2 raus – zu einem Preis pro Tonne.

Rock-Cell sprengt dieses lineare Paradigma. Durch die Sachwertvermehrung mittels CO_2-Bindung und die monetäre Integration von CO_2 in reale Vermögenswerte wird die klassische Kostenstruktur systemisch verschoben. Statt steigender Grenzkosten eröffnet sich die Möglichkeit, die effektiven Kosten der CO_2-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 Sachwertvermehrung mittels CO_2-Bindung

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

$$\mathrm{Mg_2SiO_4 + 4\,CO_2 + 4\,H_2O \longrightarrow 2\,Mg^{2+} + 4\,HCO_3^- + H_4SiO_4 \longrightarrow 2\,MgCO_3(v) + SiO_2(v) + 2\,CO_2 + 4\,H_2O}$$

Die Stöchiometrie dieser Reaktion legt zunächst das reaktionsinterne Massenverhältnis der Mineralisierung fest: Pro 1 t gebundenem CO_2 werden 1,60 t Forsterit eingesetzt (Input), es entstehen 1,92 t Magnesit und 0,68 t Silika, zusammen 2,60 t (Output) – ein Output/Input-Verhältnis von 1,62. Diese Zahl trägt das eingesetzte Gestein im Nenner und ist damit **nicht** die Größe, die Gleichung (5) verlangt: Dort steht d für die Tonnage Baumaterial je gebundener Tonne CO_2 und hat mithin gebundenes CO_2 im Nenner.

Die gesuchte Größe liefert stattdessen die Stoffbilanz der Zelle. Sie verarbeitet ein Naturprodukt, dessen nicht-reaktiver Anteil den Prozess durchläuft und im Output landet: 2,2 t Gestein und die Nennleistung von 1 t CO_2e ergeben nach Massenerhaltung 3,2 t Materialoutput je Zelle und Jahr. Für die Koppelproduktformel gilt damit d = 3,2 t Baumaterial je gebundener Tonne CO_2 – in der Formel als dimensionslose Verhältniszahl geführt. Davon trägt allein der Magnesitanteil von 1,92 t das CO_2; der Rest ist Reaktions-Silika und durchgelaufenes Begleitmaterial. Ein Teil des Kostenvorteils stammt also aus der Aufbereitung, nicht aus der Mineralisierung selbst – das ist ökonomisch legitim, aber es ist kein gebundener Kohlenstoff und wird hier nicht als solcher ausgewiesen.

Beide Werte sind ferner nicht identisch mit dem Generationenhebel Faktor 1,6, dem Bauverhältnis aus Schotter-Output zu Baumasse pro neuer Zelle (siehe Abschnitt 1). Drei numerisch benachbarte, aber unabhängige Größen, die hier bewusst getrennt gehalten werden.

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 Sachwertvermehrung mittels CO_2-Bindung wider.

Als kalkulatorische Nutzungsdauer wird L = 3,47 Jahre angesetzt. Mit r = 0,9 und d = 3,2 t ergibt das Produkt $r \cdot d \cdot L$ rund 10. Der Wert für L ist offen rückwärts gesetzt: so, dass sich eine rechnerische Kostenreduktion um Faktor 10 gegenüber dem linearen Modell ergibt. Gewählt ist damit die untere Grenze eines Korridors – L entspricht hier ungefähr der Kapitalbindungsdauer, also der Annahme, die Zelle hätte danach keinen Wert mehr. Die obere Grenze wäre der Marktsättigungshorizont. Da der Faktor linear mit L wächst, ergäbe jede längere unterstellte

Nutzungsdauer einen höheren Wert (bei L = 6,86 Jahre etwa 19,8). Faktor 10 ist deshalb als Untergrenze zu lesen, nicht als Maximum:

$$c_{\mathrm{tCO_2,rep}} = \frac{c_{\mathrm{OPEX}}}{r \cdot d \cdot L} \approx \frac{c_{\mathrm{OPEX}}}{10} \tag{9}$$

Damit zeigt sich: Durch die Sachwertvermehrung mittels CO_2-Bindung und die Nutzung des mineralischen Outputs als strukturelles Koppelprodukt lassen sich die spezifischen Kosten der CO_2-Entfernung im Vergleich zum klassischen Enhanced Weathering um eine Größenordnung senken.

4 Technische Umsetzung – neun strategische Hebel

Viele Prozesse wurden historisch als unwirtschaftlich eingestuft, da sie extensive Ressourcen erforderten. Mit der Einführung CO_2-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 1 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 CO_2 begast und auf pH 4 gesenkt werden. Unter Vakuum kann restliches CO_2 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 CO_2 eine reversible Reaktion zu NH_4HCO_3 ein:

$$\mathrm{NH_3 + H_2CO_3 \rightleftharpoons NH_4HCO_3}$$

Im sauren Milieu (pH 4) liegt es als Salz vor und trägt temporär nicht zur Basizität bei. Beim Umschalten auf Vakuum wird CO_2 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

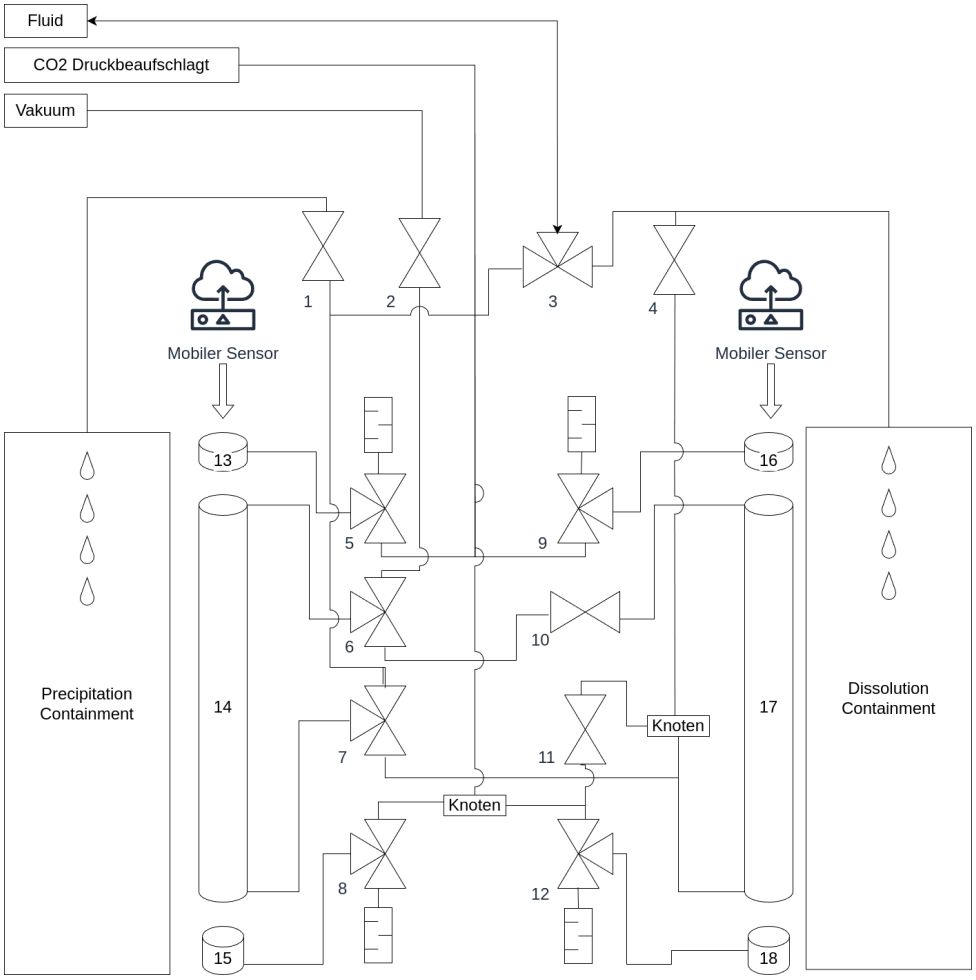

Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Rock-Cell (vereinfacht)

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 1 wird das Baumaterial direkt gebildet und gelagert. Die Rock-Cell verpresst biogenes CO_2 in einen geschlossenen Wasserkreislauf mit wechselnden pH-Phasen, die in der Vakuum-Vorkammer (14) und im Containment zur gezielten Mineralabscheidung führen. Über eine Vakuumleitung wird verbleibendes CO_2 gesammelt, rückgeführt und zur kontrollierten Pulverbildung – insbesondere von Hydromagnesit aus Dunit-Gestein – genutzt.[2]

Alternativ kann Ca_2SiO_4/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 CO_2-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: pH_4-/pH_9-Zyklen zur CO_2-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-Zyklierung 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** $R = \frac{1 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{mol}}{\mathrm{m^2\,s}}$:
   Konservativer Konsenswert für *Enhanced Weathering over Land* unter natürlichen Bedingungen.

[1] Reportage 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`

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

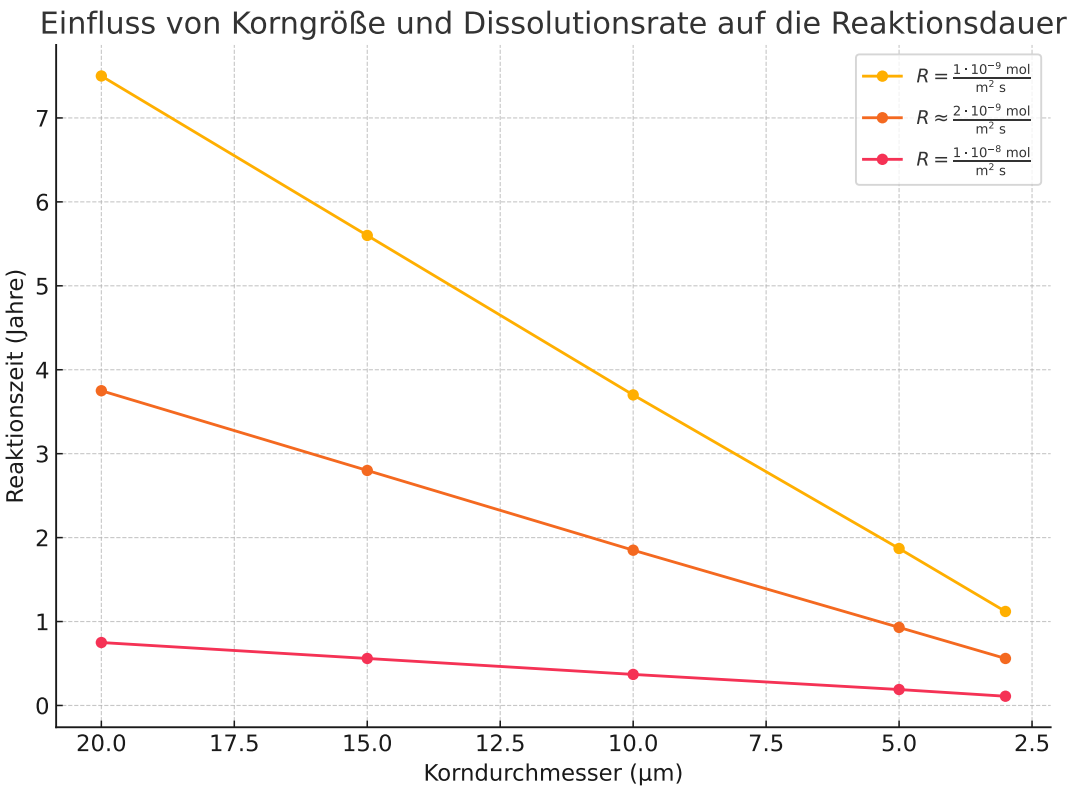

Abbildung 2: Reaktionszeit in Abhängigkeit von Korngröße und Dissolutionsrate. Kleine Körner und hohe Raten führen zu signifikant schnellerer CO_2-Bindung.

2. **Zeit bei** $R \approx \frac{2 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{mol}}{\mathrm{m^2\,s}}$:
   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** $R = \frac{1 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{mol}}{\mathrm{m^2\,s}}$:
   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.

Auch die Petrifikation profitiert erheblich von einer Verschaltung vieler Rock-Cells für die gezielte pH-Zyklierung: 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 ($MgCO_3$), 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 CO_2-vererbend – sie ist auch verschaltbar. Die gezielte pH-Zyklierung 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 CO_2-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 CO_2-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 CO_2-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 PrintPrinzip 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

[3]Rock Print Pavilion – Forschungsdemonstrator für robotergestützten Schüttgutbau, entwickelt von Gramazio

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

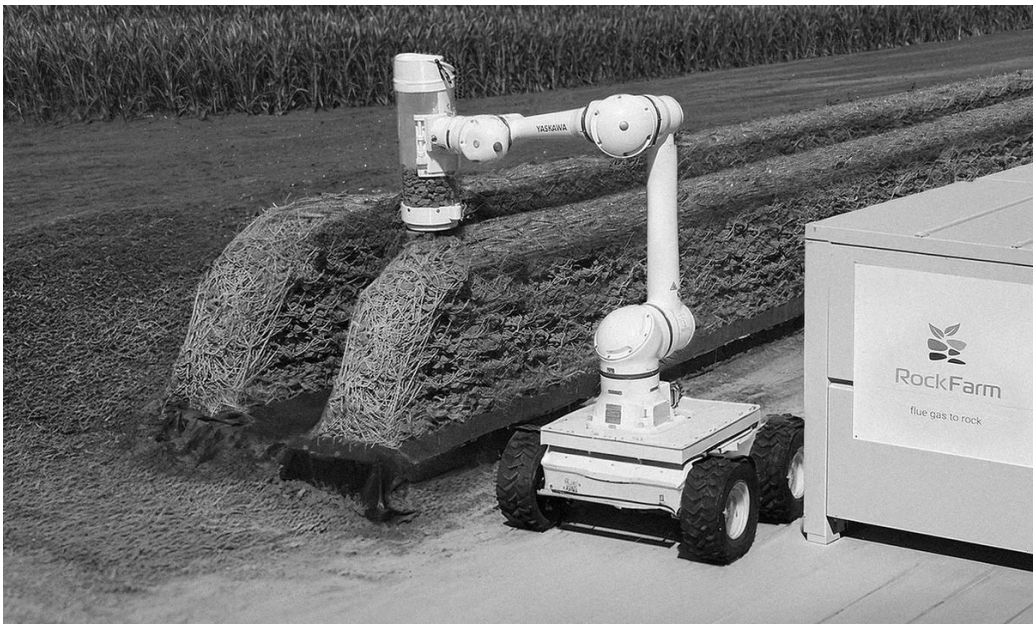

Abbildung 3: Autarker Aufbau durch mobiles Robotersystem: Materialentnahme aus Container, Positionierung, Strukturaufbau.

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 sind auf Weiterverwendung und Wiederverwendung ausgelegt – sie können rückgebaut, geschreddert und neu eingesetzt werden, bei geringem Instandhaltungsaufwand. 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

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

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-PlaceStrategie 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, niedrigschwellige 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 4: 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 CO_2 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 CO_2 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 CO_2-Entnahme und der realwirtschaftlichen Verwaltung von Immobilienportfolios. Durch generative Produktion wird die bislang statische Mietkaution von einer administrativen Last in ein strategisches Instrument zur Dekarbonisierung transformiert. Die Nachfolgenden Argumente werden im Dossier Für Vermieter, "Das Protokoll"näher erläutert und hier nur auszugsweise dargestellt:

- **Institutionelle Eigentümer:** Direkte Anrechenbarkeit der CO_2-Speicherung auf Scope-3-Emissionen zur Verbesserung des ESG-Scores und der Capital Market Resilience durch den Vermieter.
- **Hedge-Mechanismus:** Die System-Performance von 34 % p. a. (Modellrechnung – 17 % CO_2-Yield + 17 % nachfrageabhängige Material-Prämie) fungiert als ökonomischer Hedge gegen die steigende CO_2-Preis-Treppe bei Heizkosten und Bausubstanz. Freiwillige Zertifikate erfüllen dabei keine Compliance-Pflichten – der Hedge wirkt über kompensierende Erträge, nicht über regulatorische Anrechnung.
- **Property Management:** Generierung von neuem Non-Rental Income durch Management-Gebühren innerhalb spezifischer Service Level Agreements (SLA) für die Kautionsverwaltung.
- **Operative Exzellenz:** Der automatisierte SLA-Prozess ersetzt das manuelle „Ziehen" von Kautionen; Schäden werden je Einheit aus deren eigenem Ertragsfluss kompensiert, was den Verwaltungsaufwand um bis zu 80 % reduziert – die mieterbezogene Einzelzuordnung jeder Kaution bleibt davon unberührt.
- **Sozialverträglichkeit:** Ertragsgutschriften aus der Kaution können steigende Heizkosten-Umlagen für Mieter kompensieren und so die Bezahlbarkeit von Wohnraum sichern.

Rock-Cell als strategisches B2B-Werkzeug

Rock-Cell etabliert ein ökonomisches Betriebssystem für das Immobilienmanagement der Zukunft. Durch die Aktivierung bislang statischer Mietkautionen werden diese zu produktiven ESG-Assets. Dies reduziert die Netto-Emissionsbilanz des Portfolios, schützt vor der Entwertung durch energetische Defizite (De-Risking Stranded Assets) und bereitet den Vermieter auf eine mögliche künftige ETS2-Integration von Carbon Removal vor – eine deklarierte Perspektive, keine heute bestehende Compliance-Eigenschaft der freiwilligen Zertifikate.

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

Sachwertvermehrung durch CO_2-Bindung 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 CO_2-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]

5 Nachhaltigkeit und regulatorische Einordnung

Nachhaltigkeit durch mineralische Speicherung

Die Rock-Cell-Technologie bindet CO_2 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.

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

Ziel ist die Integration in bestehende freiwillige Kohlenstoffmärkte sowie eine anschlussfähige Struktur für zukünftige regulierte Märkte (ETS 2 ab 2028).

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, wir 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.

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.

6 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.

Herkunft der Rückflüsse: Lieferung statt Umverteilung

Rock-Cell ist ein technisches System zur CO_2-Entfernung – kein Finanzprodukt. Rückflüsse entstehen nicht durch den Verkauf an neue Investoren, sondern durch real erzeugte, messbare CO_2-Gutschriften und physisch produziertes Baumaterial. Es gibt:

- keine Vertriebshierarchien,
- keine Versprechen auf garantierte Gewinne,
- keine Rückflüsse aus dem Kapital neuer Teilnehmer: Der CO_2-Yield ist ein extern zertifizierter, vom bestehenden Zellbestand getragener Strom; die Material-Prämie an Bestandshalter ist eine Vergütung für tatsächlich gelieferte Baumasse, kein Vermittlungs- oder Werbeerlös.

Replikation ist hier ein technisches, kein finanzielles Prinzip. Es ersetzt die industrielle Produktionskette – nicht das Marktmodell. Rückflüsse entstehen aus real erzeugten, extern zertifizierten CO_2-Gutschriften – nicht daraus, dass das Kapital neuer Teilnehmer an bestehende ausgezahlt wird. Bleibt eine Bestellung aus, wechselt die Zelle nicht in den Verlust, sondern pausiert speicherbegrenzt: Der unfinanzierte Zyklus ruht, vorhandenes Inventar puffert die Lücke, und die Zelle nimmt den Betrieb wieder auf, sobald eine neue Bestellung eingeht – es entsteht dabei keine Verpflichtung gegenüber Dritten, die aus dem Kapital neuer Teilnehmer bedient werden müsste.

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.

7 Ausblick und gesellschaftliche Bedeutung

Perspektivsatz: Durch die generative Produktion wird Carbon Removal wirtschaftlich eigenständig. Diese neue Wirtschaftlichkeit macht die CO_2-Speicherung zur selbstverständlichen Infrastruktur – dezentral, regional und als 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 CO_2 speichert, wird nicht zum bloßen „Kompensierer", sondern zum Teil eines positiven, sichtbaren Transformationsprozesses – inklusive systemischem wirtschaftlichem Rückfluss.

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

B2B-Anschlussfähigkeit als Skalierungshebel

Rock-Cell schließt die Lücke zwischen der CO_2-Entnahme und der realwirtschaftlichen Nutzbarkeit durch ein dezentrales Partnermodell. Anstatt auf abstrakte Zertifikate zu setzen, werden die generierten CO_2-Gutschriften vom Vermieter genutzt und im Gegenzug zahlt der Vermieter Mietern mit Rock-Cell die Material-Prämie aus.

Für Vermieter und Unternehmen der Wohnwirtschaft bedeutet dies eine massive Steigerung der Kundenbindung durch technikbasierte Teilhabe sowie der eigenen ESG-Bilanz und der Kostenstruktur. Für die Mieter wiederum resultiert daraus eine spürbare finanzielle Entlastung bei steigenden CO_2-Preisen, ohne dass sie sich mit bürokratischer Komplexität auseinandersetzen müssen. So wird die generative Produktion zum strategischen B2B-Werkzeug im Carbon-Removal-Markt.

Regionale Verankerung und neue Produktionsräume

Rock-Cell ist dezentrale Infrastruktur. Jede Maschine steht an einem konkreten Ort, in Verbindung mit regionalen Partnern wie Landwirten, Energieversorgern oder Handwerksbetrieben. Diese physische Präsenz ist ein bewusst gestaltetes Element, um gesellschaftliche Akzeptanz durch Greifbarkeit zu schaffen.

Die 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 und durch die generative Logik kontinuierlich wachsend.

Skalierung mit gesellschaftlichem Rückhalt

Skalierung ist nicht nur eine technische Herausforderung, sondern eine soziale. Rock-Cell begegnet ihr durch Transparenz, Modularität und den aktiven Einbezug der Nutzer. Das Narrativ „meine Zelle arbeitet für mich" wird zum zentralen Baustein einer neuen ökologischen Ökonomie.

Dort, wo soziale Akzeptanz heute oft kippt – etwa beim Netzausbau oder bei CO_2-Steuern – entsteht mit Rock-Cell eine gegenteilige Dynamik: Die Technik wird nicht als Belastung, sondern als attraktives Angebot zur Teilhabe wahrgenommen.

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. Sie zeigt, dass selbst die abstrakteste Form von Klimaschutz – die CO_2-Entfernung – konkret, erfahrbar und gesellschaftlich wirksam werden kann.

Literatur

[CK25] Yuxuan Chen und Matthew W. Kanan. „Thermal Ca^{2+}/Mg^{2+} exchange reactions to synthesize CO_2 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 Strefler 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.