

Whitepaper Generative Produktion

Aktivierung von Kautionsliquidität zur Dekarbonisierung

Rock-Farm GmbH | CEO: Dr. Tobias Brett

Februar 2026

Zusammenfassung

Die CO₂-Vererbung markiert den Übergang von statischen Klimaschutz-Modellen hin zu einer generativen Produktionslogik. Durch die Aktivierung des 600-Mrd.-Dollar-Kautionsmarktes transformiert Rock-Cell brachliegende Mietkautionen in produktive ESG-Assets. Das System nutzt CO₂ als primären Rohstoff zur Herstellung von mineralischer Baustoffsubstanz, die unmittelbar für die Konstruktion der nachfolgenden Rock-Cell-Generation verwendet wird. Diese physikalische Selbstreplikation ermöglicht es, Grenzkosten für CO₂-Gutschriften auf nahezu Null zu senken und gleichzeitig die Dekarbonisierung der Wohnwirtschaft hocheffizient voranzutreiben. Klimaschutz wird so von einer administrativen Belastung zu einem ökonomischen Betriebssystem für das Immobilienmanagement der Zukunft.

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

Übersicht

1	Der Systemwechsel – Warum jetzt?	2	4	Nachhaltigkeit und regulatorische Einordnung	12
2	Warum Enhanced Weathering hier nicht der Maßstab ist	3	5	Grenzen und Abgrenzungen	13
3	Technische Umsetzung – neun strategische Hebel	4	6	Ausblick und gesellschaftliche Bedeutung	14

1 Der Systemwechsel – Warum jetzt?

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“ Kautions.

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

Anstatt Großinvestoren systematisch zu begünstigen, nutzt die generative Produktion massenhaft verteiltes Kapital von Kleininvestoren. Der Kautionsmarkt ist dafür ideal: 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 ist der Kautionsmarkt die perfekte Kapitalquelle. Du tauschst deine verstaubte Kautions gegen generative Gutschriften und damit aktivierst du die generative Produktion.

So funktioniert die generative Produktionsmaschine (Rock-Cell)

- **Input (CO₂):** Wird unmittelbar in dein Produkt (die 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, werden bei Rock-Cell sämtliche Betriebskosten der Mutter-Zelle auf das neu entstehende Material (die Tochter-Zellen) verteilt.
- **Status:** GRENZKOSTEN DEINER GUTSCHRIFT: 0,00 € + PREIS DER NÄCHSTEN ROCK-CELLS: 470 €.
- **17 % CO₂-Ertrag:** Jahreszielwert durch die Arbitrage zwischen Null-Grenzkosten und dem Marktwert von ca. 80 €.
- **17 % Material-Prämie:** Deine direkte Teilhabe am Jahresertragswert bei physisch produziertem Baustoff: 80 €.

Hebel & Rendite: Der Link zum Dossier

Die hier aufgeführten Zielwerte von **34 % p.a.** (aufgeteilt in 17 % CO₂-Yield und 17 % Material-Prämie) sind das Ergebnis einer spezifischen wirtschaftlichen Modellrechnung für die Wohnwirtschaft.

Technischer Hintergrund: Warum der Hebel exakt bei Faktor 1,6 liegt, wird in diesem Whitepaper physikalisch über die Massenbilanz hergeleitet ($d = 1,62$ in Kapitel 2). Jede gebundene Tonne CO₂ erzeugt systemisch die Masse für 1,6 neue Produktionseinheiten.

Wirtschaftliche Umsetzung: Die detaillierte Herleitung der Recovery-Rate (32 Monate) und die rechtliche Gestaltung der Kautions-Aktivierung sind exklusiv im *Strategischen Dossier 2026* für institutionelle Partner und Mieter 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:** Die Betriebskosten der Mutter-Zelle verteilen sich auf 1,6 neue Zellen.
- **Faktor 2 – Der Massehebel:** CO₂ wird im Material gebunden und verdoppelt die produzierte Materialmasse.
- **Faktor 5 – Der CO₂-Preishebel:** Für jeden Euro, den Beton teurer wird, wird unser Baumaterial 5 Euro günstiger.
- **Faktor 200 – Der Zeithebel:** Zeit ist 200-mal billiger als für die konventionelle Produktion.

Marktinvasion über 17 Generationen

Durch Null-Grenzkosten verdrängt dieses Protokoll die alte Welt. Das Wachstum ist mathematisch auf Überlegenheit programmiert: Wachstum ohne externe Finanzierung über 17 Jahre aus dem Kautionsmarkt. Ab dem Jahr 10 stellt das Protokoll von Vermehrung auf massive Baumaterialproduktion um. Durch den Anstieg der ETS2-Preise wirkt der CO₂-Preishebel als Katalysator: Alle Kosten werden schrittweise vollständig auf die CO₂-Gutschriften umgelegt.

Generativer Zement

Energieintensive Betonproduktion wird durch karbonatischen Zement ersetzt. Um 1,6 Tonnen MgCO₃ oder CaCO₃ 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: Während das Material in der Rock-Cell wächst, erfolgt die Biomineralisierung unter leichtem Einpressdruck, um die Festigkeit von Standardbeton zu erreichen oder zu übertreffen. Das Rock-Cell-Material ist validiert für den Bau neuer Rock-Cells.

2 Warum Enhanced Weathering hier nicht der Maßstab ist

Eine neue Kostenarchitektur verändert das Spiel.

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

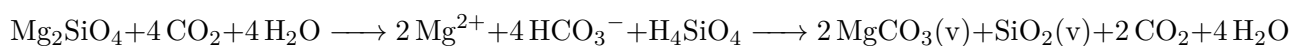
Enhanced Weathering (EW) gilt in der öffentlichen und wissenschaftlichen Debatte oft als vergleichsweise teure Methode zur CO₂-Entfernung. Der Grund: Mineralische Prozesse sind schwer skalierbar, verursachen hohe Transport- und Mahlkosten und binden CO₂ nur langsam.

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:

$$c_{\text{tCO}_2, \text{rep}} = \frac{c_{\text{OPEX}}}{r \cdot d \cdot L} = \frac{c_{\text{OPEX}}}{10} \quad (1)$$

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.

3 Technische Umsetzung – neun strategische Hebel

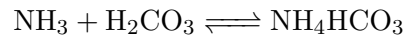
Viele Prozesse wurden historisch als unwirtschaftlich eingestuft, da sie extensive Ressourcen erforderten. Mit der Einführung CO₂-vererbender Systeme, wie der Rock-Cell-Technologie, können solche Prozesse nun effizient skaliert und wirtschaftlich genutzt werden. Petrifikation ist ein solcher Prozess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

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

In Abbildung 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 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.

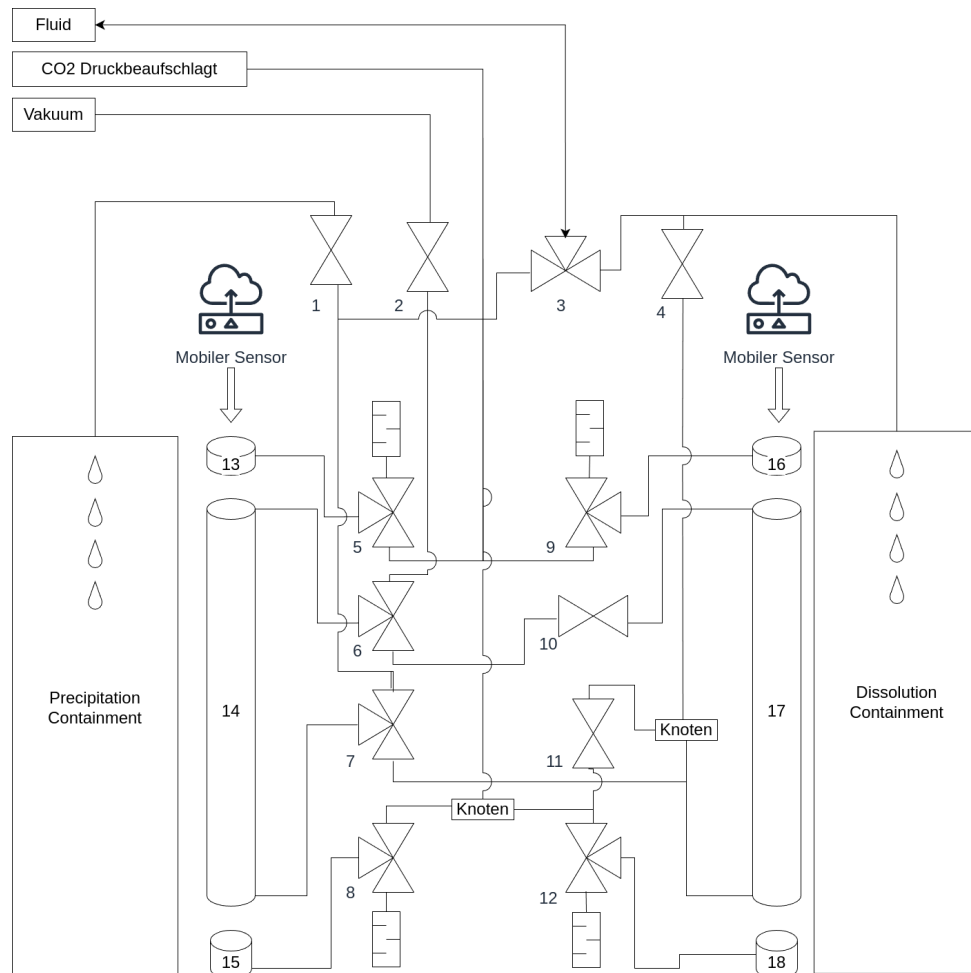


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Rock-Cell (vereinfacht)

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 1 wird das Baumaterial direkt gebildet und gelagert. Die Rock-Cell verpresst biogenes CO₂ 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 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.

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>

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

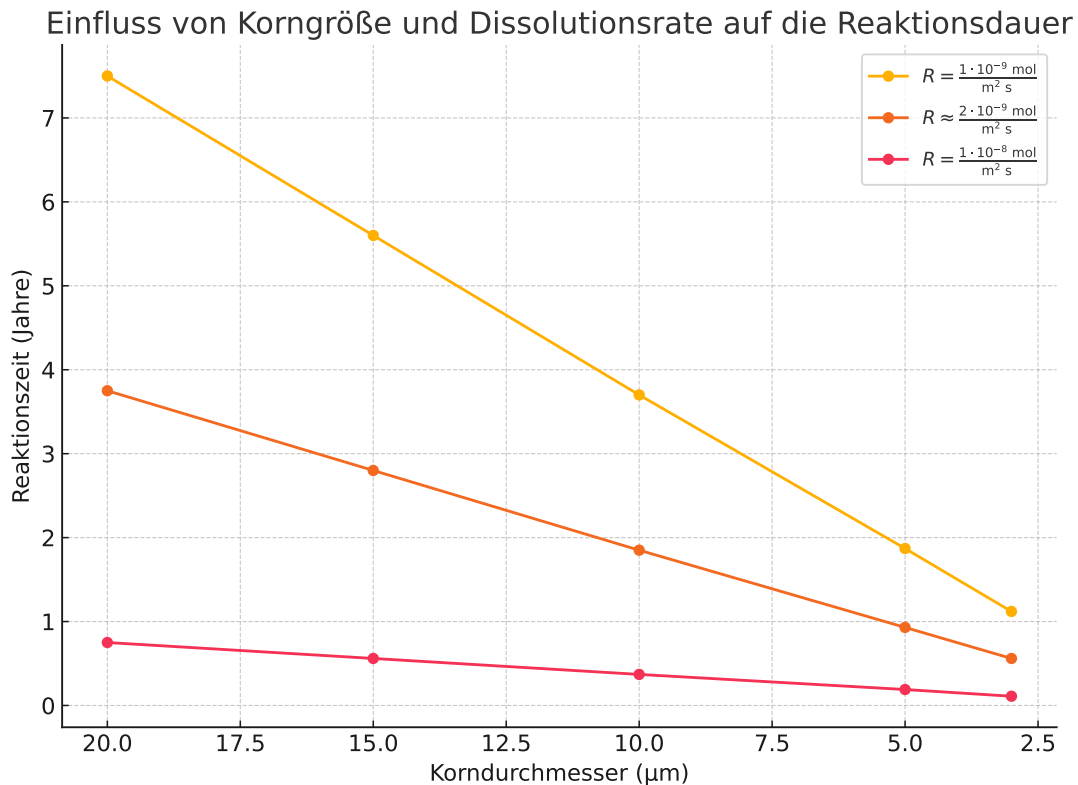


Abbildung 2: Reaktionszeit in Abhängigkeit von Korngröße und Dissolutionsrate. Kleine Körner und hohe Raten führen zu signifikant schnellerer CO₂-Bindung.

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.

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

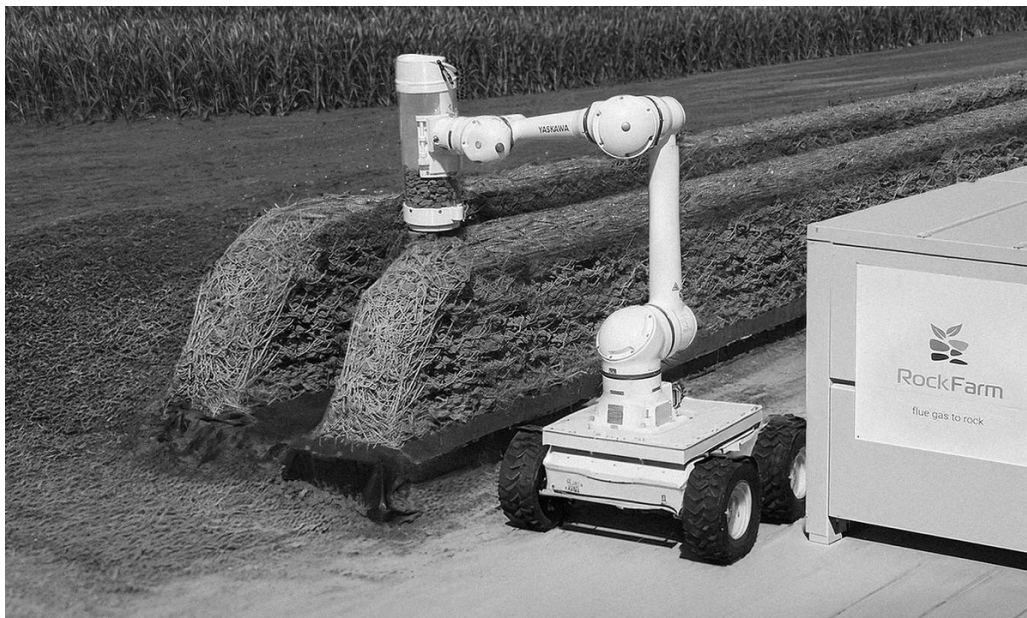


Abbildung 3: Autarker Aufbau durch mobiles Robotersystem: Materialentnahme aus Container, Positionierung, Strukturaufbau.

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

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

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, 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.

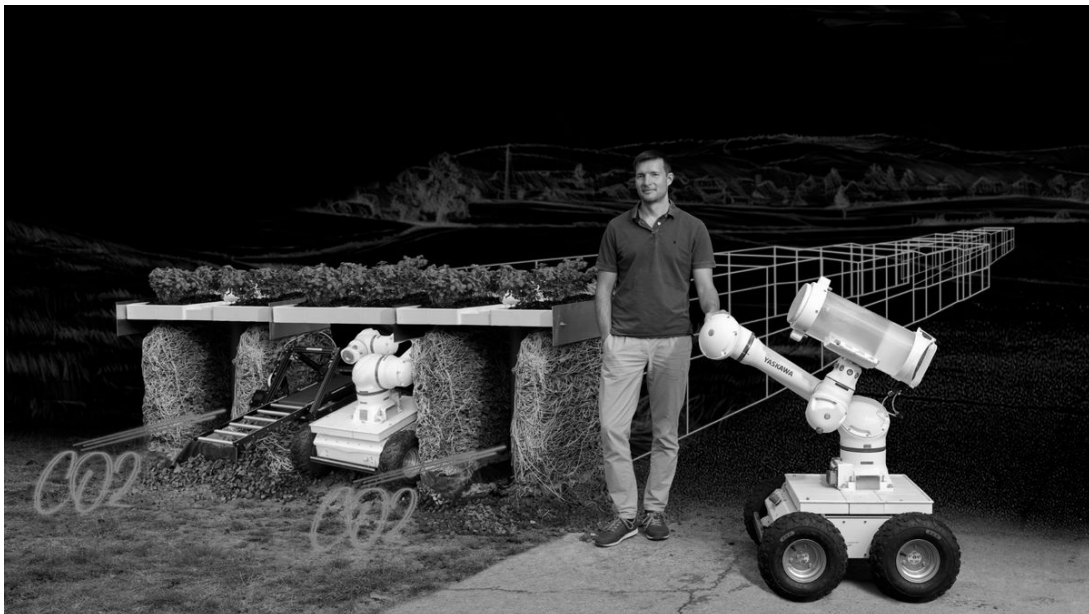


Abbildung 4: Erweitertes Rock-Cell-Modell: Fließbanddrucker und Roboter in separatem Tunnel mit gedruckter Dachstruktur, autark und unbeaufsichtigt.

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 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 Loyalitätsvorteile 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

4 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).

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

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.

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 Probetrieb 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.

5 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.

6 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 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.

Literatur

- [CK25] Yuxuan Chen und Matthew W. Kanan. „Thermal $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 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.