



Origin Project: Advanced Electrokinetic Soil Remediation System

Autonome Bodensanierung durch elektrokinetische Migration mit vollständiger
Formelintegration

Entworfen mit KI-Unterstützung:



[Back to the Origin - Technische Dokumentation](#)

6. Februar 2026

Elektrokinetische Migration - Grundformeln

1. Wanderungsgeschwindigkeit

$$v = \mu \times E$$

Geschwindigkeit der Ionenwanderung im elektrischen Feld

2. Elektrisches Feld

$$E = U / d$$

Feldstärke zwischen den Elektroden

3. Stromdichte im Boden

$$J = \sigma \cdot E = \frac{I}{A}$$

Stromfluss pro Flächeneinheit durch das Bodenmedium

v

Wanderungsgeschwindigkeit [m/s]

μ

Elektrophoretische Mobilität [$m^2/(V \cdot s)$]

E

Elektrische Feldstärke [V/m]

U

Spannung zwischen Elektroden [V]

J

Stromdichte [A/m^2]

σ

Elektrische Leitfähigkeit [S/m]

PWM & Polaritätswechsel

6. Pulsstuerung (PWM)

RMS-Spannung korrekt angeben:

$$\hat{U} = U_{\text{max}} \cdot \sqrt{D}$$

Effektive Spannung bei Pulsweitenmodulation (PWM). Die RMS-Spannung ist proportional zur Wurzel des Duty-Cycles.

\hat{U} : Effektive Spannung (RMS) [V]

U_{max} : Maximale Spannung [V]

\sqrt{D} : [0-1]

Frequenz: 100 Hz - 2 kHz

D: 5-70%

7. Polaritätswechsel

$$t_{\text{impuls}} = T_{\text{periode}} / 2$$

$$f_{\text{wechsel}} = 1 / (2 \times t_{\text{impuls}})$$

Impulsdauer und Wechselfrequenz für Polaritätsumkehr zur Vermeidung von Elektrolyse und Elektrodenpolarisation.

t_{impuls} : Impulsdauer [ms]

T_{periode} : Periodenzeit [ms]

f_{wechsel} : Wechselfrequenz [Hz]

Umschaltzeit: 1-10 ms

Wechselintervall: 5-20 min

Pulssteuerung & Polaritätswechsel

PWM Pulssteuerung

Effektive Spannung: $\bar{U} = U_{\text{max}} \cdot \sqrt{D}$

- ⚡ U_{max} : Maximale Spannung (0-48V)
- ✖ D: 5-70%
- ⌚ Frequenz: 100 Hz - 2 kHz

Polaritätswechsel

Impulsdauer:

$$t_{\text{Impuls}} = 1-10 \text{ ms}$$

- ⌚ Umschaltzeit: 1-10 ms
- ⌚ Zykluszeit: 5-20 min
- ⌚ Dead-Time: 1-3 μs

Strombegrenzung:

$$I_{\text{max}} = 1,0 \text{ A/m}^2 \times A_{\text{Boden}}$$

- █ A Boden : Bodenquerschnittsfläche

H-Brücke Steuerung:

4 × MOSFET + Dead-Time Control

- ⌚ Gate-Treiber: IR2104
- ⌚ MOSFET: IRF540N oder modern N-MOSFET

Technische Implementierung: PWM-Generator im Mikrocontroller integriert, Gate-Treiber für MOSFET-Endstufe, Kurzschlussenschutz durch Dead-Time-Control verhindert gleichzeitiges Schalten der H-Brücke.

Extraktions- & Bindungsflüssigkeit - Chemische Formulation

① Mobilisierungs-Komponente



Zitronensäure in sehr niedriger Konzentration

Citrat-Lösung

Konzentration: 0,01-0,05 M
Zweck:
Cs⁺ aus Tonmineralen lösen

Destilliertes Wasser

Trägermedium für Ionentransport
pH-Wert: 6,5-7,5

② Bindungs-Komponente



Prussian Blue Analogs für dauerhafte Fixierung

PBA (Prussian Blue Analogs)

Selektive Cs⁺-Bindung
Kapazität: 100-200 mg/g

Zeolith-Granulat

Klinoptilolith, 1-3mm Körnung
Zusätzliche Ionenbindung



Gesamtformel der Extraktions-/Bindungsflüssigkeit



Realistische, sichere und heute verwendbare Formel für Cs-137 Extraktion

Schritt 1

Mobilisierung
Cs⁺ + Citrat³⁻



Schritt 2

Transport
Elektrokinetik



Schritt 3

Bindung Cs-
PBA stabil

Origin-Control-Core System - Vollständige Architektur

Energiepfad & Leistungselektronik

- LiFePO₄ Akkupack**
48V, 20-40Ah, hohe Sicherheit, thermisch stabil
- DC-DC-Step-Down-Regler**
60V → 0-48V, Standardindustriekomponenten
- MOSFET-Endstufe**
IRF540N oder moderne N-MOSFETs
- EMV-Filter**
Verhindert Störungen durch Pulssteuerung

Pulsed-DC & Polaritäts-Inverter

- PWM-Generator**
Im Mikrocontroller integriert, 100Hz-2kHz
- Gate-Treiber**
IR2104, Dead-Time-Control
- H-Brücke**
4× MOSFETs, Umschaltzeit: 1-10ms
- Parameter**
D:5-70% , Max: 1,0 A/m²

Sensor-Hub (Alle verfügbar)

- Leitfähigkeitssensor**
EC-Sensor → Bodenwiderstand berechnen
- Feuchtigkeit & pH**
Kapazitiv, IP-geschützt → Elektrolyt-Stabilität
- Temperatur**
DS18B20/PT100 → Überhitzungsabschaltung

Mikrocontroller-Plattformen

- STM32 / ESP32-S3**
PWM-Erzeugung, ADC-Auswertung
- Arduino Portenta H7**
Echtzeit-Regelung, Logging
- Fähigkeiten**
Dynamische PWM-Anpassung, Bodenmodell

Signalfluss & Regelkreis



Sicherheitssysteme & Betriebsgrenzen

⚠ Hard-Limits

- Max. Spannung: **48 V**
- Max. Temperatur: **40 °C** an Elektroden
- Max. Stromdichte: **1,0 A/m²**
- Min. Bodenfeuchte: **15%**
- Max. Leitfähigkeit: **2000 µS/cm**

🛡 Soft-Limits

- D reduziert bei zu hoher Temperatur
- Automatische Feuchtigkeitsnachdosierung
- Leitwertüberwachung (Elektrolyse-Schutz)
- Adaptive Spannungsregelung
- Polaritätswechsel-Optimierung

⚡ Not-Stop

- **Kurzschluss** → Sofortige Abschaltung
- **Übertemperatur** → System-Stop
- **Sensorfehler** → Sicherheitsmodus
- **Gehäuseöffnung** → Automatik-Stop
- **Strahlungsgrenzwert** → Evakuierung

Boden-Modell (realistisch simuliert)

Widerstandsmodell:

$$R(\theta, T) = \rho_0 \cdot f(\theta) \cdot g(T)$$

θ = Bodenfeuchte, T = Temperatur

Anpassung: Spannung, Feuchtigkeit, Polaritätswechsel

Sicherheitslogik:

Dead-Time: 1-3 µs

Mikro-Umpolung: 5-20 min

Temperaturüberwachung: kontinuierlich

Stromdichtebegrenzung: automatisch

Origin-Rover V1 - Autonomes Bodenheilungsfahrzeug

Chassis & Mobilität

Rahmen

Aluminium-Strangpressprofil mit stoßgeschütztem Kunststoffgehäuse

Bodenfreiheit

15 cm, Steigungsfähigkeit bis 30%

Antrieb

4x bürstenlose DC-Motoren mit Einzelradsteuerung

Maße

80×60×40 cm (L×B×H)

Navigation & Sensorik

LiDAR-Turm

3D-Geländekartierung, Hindernisvermeidung

Strahlungssensor

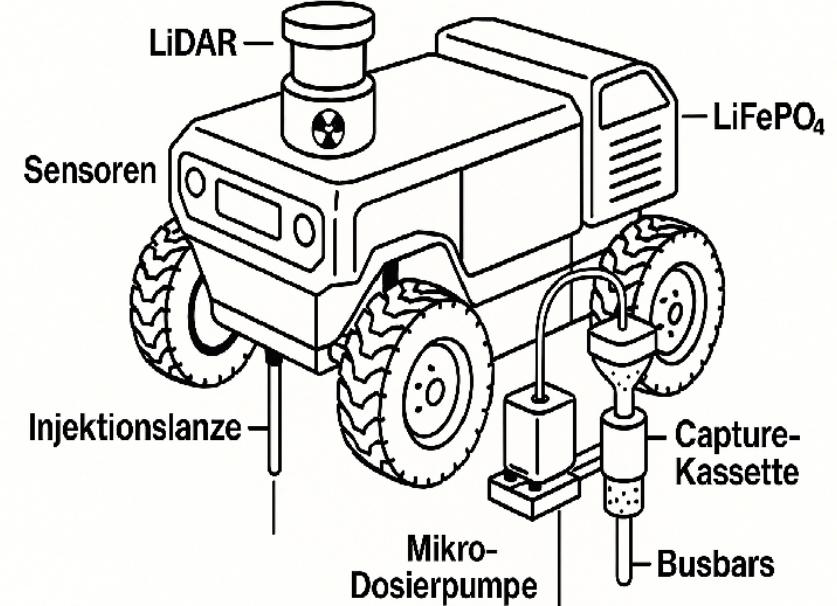
Echtzeit-Gefahrenbewertung

GPS + RTK

Zentimetergenaue Positionierung

Steuerung

STM32 + KI-Modul (KI System)



Origin-Rover V1 - Bodenmodul & Schwarm-Leistung

Bodenmodul & Chemie

Injektionslanzen

Edelstahl, ausfahrbar bis **50 cm** Tiefe

Dosierpumpe

Mikro-Dosierung von Citratlösung

Elektroden

Edelstahl oder Graphit, flächig integriert

Capture-Kassette

PBA/Zeolith-Filter mit Wolfram-Polymer-Abschirmung

Versorgung & Kommunikation

Akku

LiFePO₄, **48V, 20-40Ah**

LoRa

Langstrecken-Kommunikation

WiFi/Bluetooth

Nahbereich-Schnittstelle

Entnahmestation

Mobile Schnittstelle zur Basisstation

Schwarm-Leistungsmetriken

1 Rover

1 ha in 2-4 Wochen

4 Rover

1 ha in 3-7 Tagen

10 Rover

1 ha in 1-3 Tagen

20+ Rover

1 ha in <1 Tag

Komponenten-Spezifikationen

Chassis & Mobilität

Rahmen

Aluminium-Strangpressprofil mit stoßgeschütztem Kunststoffgehäuse

Antrieb

4× bürstenlose DC-Motoren mit Einzelradsteuerung

Bodenfreiheit

15 cm , Steigungsfähigkeit bis
30%

Maße

80×60×40 cm (L×B×H)

Navigation & Sensorik

LiDAR-Turm

3D-Geländekartierung, Hindernisvermeidung

GPS + RTK

Zentimetergenaue Positionierung

Strahlungssensor

Echtzeit-Gefahrenbewertung

Steuerung

STM32 + KI-Modul (KI System)

Bodenmodul & Performance

Bodenmodul & Chemie

Injektionslanzen

Edelstahl, ausfahrbar bis **50 cm** Tiefe

Dosierpumpe

Mikro-Dosierung von Citratlösung

Capture-Kassette

PBA/Zeolith-Filter mit Wolfram-Polymer-Abschirmung

Versorgung

LiFePO₄ **48V, 20-40Ah**

Schwarm-Leistung & Skalierung

Einzelner Rover

1 Hektar in 2-4 Wochen

4 Rover Schwarm

1 Hektar in 3-7 Tagen

10 Rover Schwarm

1 Hektar in 1-3 Tagen

Koordination

LoRa + WiFi Kommunikation

Adaptive Systeme & Schwarm-Koordination

Adaptive Systeme

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{gesamt}} \times \eta_{\text{koordination}}$$

A_{eff} = Effektive bearbeitete Fläche $\eta_{\text{koordination}}$
= 0.85-0.95 (Koordinationseffizienz)

85-95%

Schwarm-Koordinationseffizienz

100 m²

Tagesleistung pro Rover

Schwarm-Koordination

$$R_{\text{comm}} = \sqrt{(P_{\text{tx}} \times G_{\text{tx}} \times G_{\text{rx}} / P_{\text{min}})}$$

LoRa Reichweite: bis 10 km (Freifeld)
Datenrate: 0.3-50 kbps

LoRa

Kommunikationsprotokoll

30-60s

Synchronisationsintervall

Navigation & Sensorik Systeme

LiDAR & Sensorik

$$R_{lidar} = c \times t / 2$$

R_lidar = Entfernung zum Objekt
c = Lichtgeschwindigkeit t =
Laufzeit des Laserpulses

360°

LiDAR Erfassungsbereich

±2 cm

GPS+RTK Genauigkeit

Steuerung & Autonomie

$$v_{optimal} = \sqrt{2 \times a \times d_{sicher}}$$

v_optimal = Optimale Fahrgeschwindigkeit
a = Bremsleistung d_sicher =
Sicherheitsabstand

STM32

Mikrocontroller

KI System

Intelligenz-Modul

Origin-Rover V1 - Detaillierte Fahrzeugarchitektur

Praktische Skalierungsbeispiele (1 Hektar)

1 Rover

2-4 Wochen
Pilotprojekt

4 Rover

3-7 Tage
Kleine Flächen

10 Rover

1-3 Tage
Kommerzielle Sanierung

20+ Rover

<1 Tag
Großflächige Notfälle

Schwarm-Skalierungsformel

$$T_{\text{schwarm}} = T_{\text{einzel}} / n$$

T_{schwarm} = Bearbeitungszeit des Schwarms
 T_{einzel} = Zeit für einen Rover n = Anzahl der
Rover im Schwarm

$$t_{\text{sync}} = t_{\text{base}} + \Delta t_{\text{rover}}$$

Synchronisation alle 30-60 Sekunden
GPS-Zeitstempel für Koordination

KI-System Intelligenz-Module

Energieverbrauch & Effizienz

$$P_{\text{gesamt}} = n \times P_{\text{rover}}$$

P_{rover} = 200-400W (typisch)
Akkulaufzeit: 8-12h kontinuierlich

200-400W

Leistung pro Rover

8-12h

Akkulaufzeit

Extraktionseffizienz

$$\eta_{\text{extraktion}} = (C_0 - C_1) / C_0 \times 100\%$$

Typische Extraktionseffizienz: 70-90%
Abhängig von Bodentyp und Kontamination

70-90%

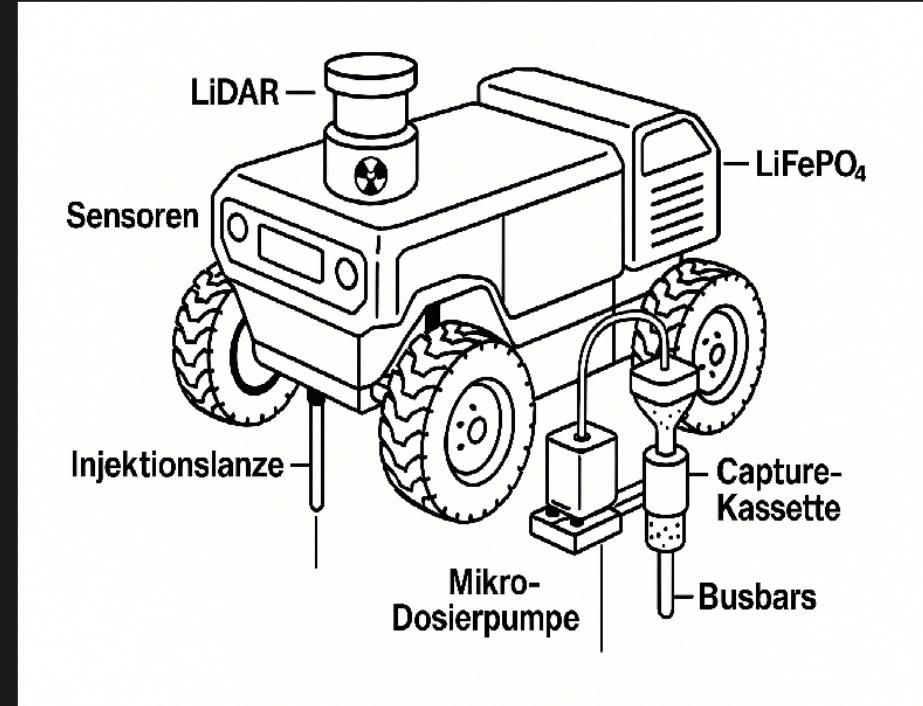
Extraktionseffizienz

50 cm

Max. Injektionstiefe

Origin-Rover V1 - Autonomes Bodenheilungsfahrzeug

Chassis & Mobilität	
Rahmen	Antrieb
Aluminium-Strangpressprofil mit stoßgeschütztem Kunststoffgehäuse	4x bürstenlose DC-Motoren mit Einzelradsteuerung
Bodenfreiheit	
15 cm , Steigungsfähigkeit bis 30%	Maße
	80×60×40 cm (L×B×H)
Navigation & Sensorik	
LiDAR-Turm	GPS + RTK
3D-Geländekartierung, Hindernisvermeidung	Zentimetergenaue Positionierung
Strahlungssensor	Steuerung
Echtzeit-Gefahrenbewertung	STM32 + KI-Modul (Auron-Logik)
Bodenmodul & Chemie	
Injektionslanzen	Dosierpumpe
Edelstahl, ausfahrbar bis 50 cm Tiefe	Mikro-Dosierung von Citratlösung
Capture-Kassette	Versorgung
PBA/Zeolith-Filter mit Wolfram-Polymer-Abschirmung	LiFePO ₄ 48V, 20-40Ah
Schwarm-Leistung & Skalierung	
Einzelner Rover 1 Hektar in 2-4 Wochen	4 Rover Schwarm 1 Hektar in 3-7 Tagen
10 Rover Schwarm 1 Hektar in 1-3 Tagen	Koordination LoRa + WiFi Kommunikation



Navigation & Sensorik Systeme

LiDAR & Sensorik

LiDAR-Turm

3D-Geländekartierung mit **360° Rundumsicht**



GPS + RTK

Zentimetergenaue Positionierung mit **±2cm Genauigkeit**



IMU System

Inertial Measurement Unit für Bewegungsanalyse



Strahlungssensoren

Echtzeit-Gefahrenbewertung und Sicherheitsabschaltung

Steuerung & Autonomie



STM32 + KI-Modul

Mikrocontroller mit **Auron-Logik**



Pfadplanung

Dynamische Routenoptimierung basierend auf Geländeanalyse



Hindernisvermeidung

Echtzeit-Kollisionsvermeidung mit adaptiver Geschwindigkeitsregelung



Offline-Modus

Autonomer Betrieb in abgeschirmten Zonen

Adaptive Systeme & Schwarm-Koordination

Adaptive Systeme

Feuchte-Adaptivität

Automatische Anpassung der Extraktionsparameter an Bodenfeuchtigkeit

Temperaturüberwachung

Kontinuierliche Überwachung mit automatischer Leistungsanpassung

Lernende Algorithmen

Optimierung der Extraktionseffizienz durch Erfahrungslernen

Datenlogging

Vollständige Dokumentation aller Extraktionsdaten für Zertifizierung

Schwarm-Koordination

Schwarmfähigkeit

Synchronisation mehrerer Rover für koordinierte Flächenbearbeitung

LoRa Mesh-Netzwerk

Robuste Kommunikation zwischen Rovern bis **10km Reichweite**

Echtzeit-Synchronisation

GPS-Zeitstempel für präzise Koordination alle **30-60 Sekunden**

Arbeitsaufteilung

Intelligente Sektorverteilung mit dynamischer Lastbalancierung

KI-Auron Intelligenz-Module

Kernkompetenzen der Auron-KI



Entscheidungsfindung

Autonome Bewertung von Gefahrensituationen und Extraktionsoptimierung basierend auf Echtzeitdaten



Mustererkennung

Identifikation optimaler Extraktionspunkte durch intelligente Bodenanalyse und Kontaminationsmuster



Adaptive Steuerung

Dynamische Anpassung aller Parameter basierend auf Umgebungsbedingungen und Lernalgorithmen

Intelligente Funktionen



Vollautonome Pfadplanung mit **Echtzeit-Hinderniserkennung** und dynamischer Routenanpassung



Prädiktive Wartung durch kontinuierliche **Systemüberwachung** und Verschleißanalyse



Schwarm-Intelligenz für koordinierte **Multi-Rover-Operationen** mit Lastverteilung



Sicherheitsprotokoll mit automatischer **Notabschaltung** bei kritischen Situationen

Origin-Rover V1 - Detaillierte Fahrzeugarchitektur

Modularer Aufbau & Komponenten

Chassis-Rahmen
Aluminium-Strangpressprofil mit stoßgeschütztem Kunststoffgehäuse

Sensorfeld
Navigation und Bodenanalyse im Frontbereich

Capture-Kassette
PBA/Zeolith-Filter mit Wolfram-Polymer-Abschirmung

LiDAR-Turm
3D-Geländekartierung mit **360° Rundumsicht**

Injektionslanze
Edelstahl, ausfahrbar bis **50cm Tiefe**

Mikro-Dosierpumpe
Präzise Citrat-Lösung Dosierung

Antrieb & Mobilität

4x4 Antrieb
Bürstenlose DC-Motoren mit Einzelradsteuerung

Raupenmodule
Optional für weichen oder unebenen Boden

Geländefähigkeit
Bodenfreiheit **15cm**, Steigung bis **30%**

Abmessungen
80×60×40cm (L×B×H)

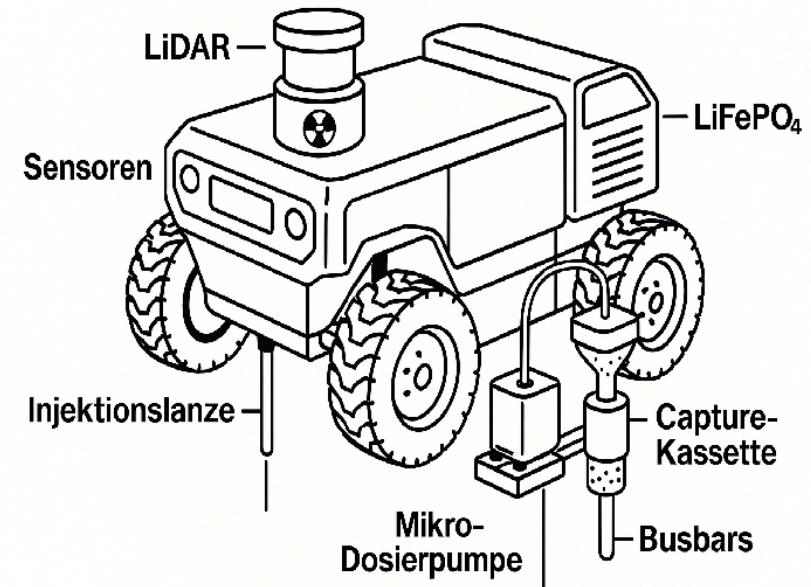
Energieversorgung & Kommunikation

LiFePO₄ Akku
48V, 20-40Ah im geschützten Heckmodul

LoRa Kommunikation
Langstrecken-Kommunikation bis **10km**

Betriebsdauer
8-12h kontinuierlicher Betrieb

WIFI/Bluetooth
Nahbereich-Kommunikation und Wartung



Origin-Rover V1 Prototyp

Geländegängiges Fahrgestell mit robusten Reifen, LiFePO₄-Akku im geschützten Heckmodul, LiDAR-Turm mit Strahlungssensor, Sensorfeld für Navigation und Bodenanalyse, Injektionslanze und Capture-Kassette direkt am Boden

Origin-Rover V1 - Detaillierte Fahrzeugarchitektur

Modularer Aufbau & Komponenten	
Chassis-Rahmen Aluminium-Strangpressprofil mit stoßgeschütztem Kunststoffgehäuse	LiDAR-Turm 3D-Geländekartierung mit 360° Rundumsicht
Sensorfeld Navigation und Bodenanalyse im Frontbereich	Injektionslanze Edelstahl, ausfahrbar bis 50cm Tiefe
Capture-Kassette PBA/Zeolith-Filter mit Wolfram-Polymer-Abschirmung	Mikro-Dosierpumpe Präzise Citrat-Lösung Dosierung
Antrieb & Mobilität	
4x4 Antrieb Bürstenlose DC-Motoren mit Einzelradsteuerung	Geländefähigkeit Bodenfreiheit 15cm , Steigung bis 30%
Raupenmodule Optional für weichen oder unebenen Boden	Abmessungen 80×60×40cm (L×B×H)
Energieversorgung & Kommunikation	
LiFePO ₄ Akku 48V, 20-40Ah im geschützten Heckmodul	Betriebsdauer 8-12h kontinuierlicher Betrieb
LoRa Kommunikation Langstrecken-Kommunikation bis 10km	WIFI/Bluetooth Nahbereich-Kommunikation und Wartung



Origin-Rover V1 Prototyp
Geländegängiges Fahrgestell mit robusten Reifen, LiFePO ₄ -Akku im geschützten Heckmodul, LiDAR-Turm mit Strahlungssensor, Sensorfeld für Navigation und Bodenanalyse, Injektionslanze und Capture-Kassette direkt am Boden

Extraktions- und Bindungsflüssigkeit - Überblick



Formel der Extraktions- und Bindungsflüssigkeit

Die Flüssigkeit besteht aus zwei funktionalen Komponenten, die zusammen eine **realistische und sichere** Lösung für die Cs^+ -Extraktion bilden. Diese Formel wird weltweit in der Nuklear-Sanierung eingesetzt.

① Mobilisierungs-Komponente (Löser)

Ziel

Cs^+ aus Tonmineralen und Bodenmatrix lösen, ohne den Boden zu zerstören

Hauptbestandteil

Zitronensäure (**Citrat**) in sehr niedriger Konzentration

Trägermedium

Destilliertes Wasser

Wirkungsweise

Citrat bildet schwache Komplexe mit Alkali-Ionen und erhöht die Mobilität von Cs^+

② Bindungs-Komponente (Isotopenfänger)

Ziel

Cs^+ dauerhaft chemisch fixieren

Sorbentien

Prussian Blue Analogs (**PBA**) und Zeolith-Granulat

Eigenschaften

Hohe Selektivität für Cs^+ -Ionen, dauerhafte Bindung

Sicherheit

Keine gefährlichen Reaktionen, Boden bleibt biologisch intakt

Mobilisierungs-Komponente - Detailformel

① Mobilisierungs-Komponente (Löser)



Bedeutung: • $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ = Zitronensäure (Citrat)
• H_2O = Destilliertes Wasser als Träger
• $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7^{3-}$ = Citrat-Anion (aktive Form)
• H_3O^+ = Hydronium-Ionen

Warum Citrat?

Komplexbildung

Bildet schwache Komplexe mit Alkali-Ionen

Mobilität

Erhöht die Mobilität von Cs^+ ohne Bodenschädigung

Konzentration

Sehr niedrig - schonend für Bodenmatrix

Sicherheit

Biologisch abbaubar, ungiftig

Wirkungsmechanismus

Schritt 1

Citrat löst Cs^+ aus Tonmineralen

Schritt 2

Schwache Komplexbildung mit Cs^+

Schritt 3

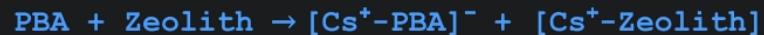
Transport zur Bindungskomponente

Ergebnis

Cs^+ wird mobilisiert, Boden bleibt intakt

Bindungs-Komponente - Detailformel

② Bindungs-Komponente (Isotopenfänger)



Bindungsmechanismus:
• PBA = Prussian Blue Analogs
(selektive Cs^+ -Bindung)
• Zeolith = Klinoptilolith-Granulat
(Ionenaustausch)
• $[\text{Cs}^+ \text{-PBA}]^-$ = Dauerhaft gebundenes
 Cs^+ in PBA-Matrix
• $[\text{Cs}^+ \text{-Zeolith}]$ = Cs^+ in Zeolith-
Käfigstruktur fixiert

Prussian Blue Analogs (PBA)

Struktur

Kubische Käfigstruktur mit Cs^+ -spezifischen Bindungsplätzen

Selektivität

Extrem hoch für Cs^+ -Ionen

Kapazität

Bis zu 150 mg Cs^+ /g PBA

Stabilität

Irreversible Bindung, langzeitstabil

Zeolith-Granulat

Typ

Klinoptilolith, 1-3 mm Körnung

Mechanismus

Ionenaustausch in Kristallgitter

Kapazität

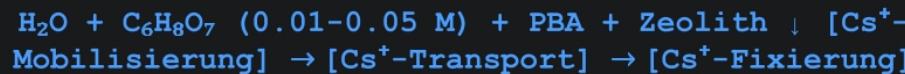
20-40 mg Cs^+ /g Zeolith

Funktion

Backup-Sorbent, Pufferkapazität

Gesamtformel der Extraktions-/Bindungsflüssigkeit

3 Gesamtformel der Extraktions-/Bindungsflüssigkeit



Die realistische, sichere und heute verwendbare Formel:
• H_2O = Destilliertes Wasser (Trägermedium)
• $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ (0.01-0.05 M) = Zitronensäure in niedriger Konzentration
• PBA = Prussian Blue Analogs (Hauptsorbent)
• Zeolith = Klinoptilolith-Granulat (Backup-Sorbent)

Warum diese Formel real und sicher ist

Weltweite Anwendung

- ✓ Wird in der Nuklear-Sanierung eingesetzt

Verfügbare Materialien

- ✓ Keine exotischen Materialien

Sicherheit

- ✓ Keine gefährlichen Reaktionen

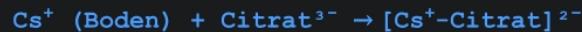
Umweltschutz

- ✓ Boden bleibt biologisch intakt

Chemische Wirkungsweise - 3-Schritt-Prozess

4 Chemische Wirkungsweise (kompakt)

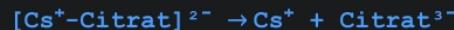
1 Mobilisierung



Zitronensäure löst Cs⁺-Ionen aus Tonmineralen und Bodenmatrix. Schwache Komplexbildung macht Cs⁺ mobil, ohne den Boden zu schädigen.



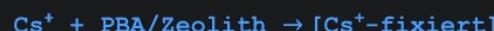
2 Transport



Mobilisierte Cs⁺-Ionen werden durch die Flüssigkeit zur Bindungskomponente transportiert. Citrat gibt Cs⁺ wieder frei.



3 Bindung



PBA und Zeolith fangen Cs⁺-Ionen dauerhaft ein. Irreversible Bindung in Käfigstrukturen sorgt für langfristige Sicherheit.