

## Neues Wissen zur CO<sub>2</sub>-Speicherung in ozeanischer Kruste: Die sechs wichtigsten Erkenntnisse aus der AIMS<sup>3</sup>-Forschung

Im CDRmare-Forschungsverbund AIMS<sup>3</sup> untersuchen Wissenschaftler\*innen seit drei Jahren, unter welchen Bedingungen im Meerwasser gelöstes Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in junger Basaltkruste südlich von Island gespeichert werden könnte. Außerdem haben sie neue tiefseetaugliche Sensoren und Überwachungssysteme entwickelt, mit denen die Mineralisierung des eingelagerten CO<sub>2</sub> gemessen und die Umweltverträglichkeit eines solchen Tiefsee-Speicherprojektes kontrolliert werden kann.

- 1** Das untersuchte Tiefseegebiet an der Ostflanke des Reykjanes-Rückens etwa 800 Kilometer südlich Islands eignet sich für ein Experiment zur CO<sub>2</sub>-Speicherung in ozeanischer Kruste. In Bohrlöchern platzierte Forschungstechnik erfasst jetzt die wichtigsten Umweltparameter im Meeresuntergrund.
- 2** In den Bohrlöchern dokumentiert aktuell eine neue Generation tiefseetauglicher Probennehmer und Observatorien, mit welcher Geschwindigkeit und unter welchen Druck- und Temperaturbedingungen Fluide in der Basaltkruste zirkulieren.
- 3** In AIMS<sup>3</sup> entwickelte Karbonat-Sensoren erleichtern die Suche nach CO<sub>2</sub>-Leckagen am Meeresboden. Sie sind schneller, kleiner, günstiger und vor allem energiesparender als bisherige Technik.
- 4** Mithilfe neu und weiterentwickelter Tiefseeroboter und Überwachungsstationen können die Forschenden nun viel größere Areale des Meeresbodens kontinuierlich nach CO<sub>2</sub>-Austrittsstellen absuchen als zuvor – in der Tiefsee ebenso wie in der deutschen Nordsee.
- 5** Die erhobenen Messdaten zur Zirkulation, Temperatur und chemischen Zusammensetzung des Porenwassers in der ozeanischen Kruste fließen jetzt in neue Computermodelle. Mit deren Hilfe bewerten die Forschenden, in welchem Maße sich bestimmte Gebiete des Tiefseeuntergrundes für eine CO<sub>2</sub>-Speicherung eignen.
- 6** Erste Abschätzungen zum Speichervolumen in jungen, warmen Basalten zeigen, dass entlang der Rückenflanken nördlich und südlich Islands mindestens 34 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> Platz fänden. Dieses Speicherpotenzial zu nutzen, würde jedoch einen erheblichen logistischen und finanziellen Aufwand erfordern.

## Kernbotschaft 1

**Das untersuchte Tiefseegebiet an der Ostflanke des Reykjanes-Rückens etwa 800 Kilometer südlich Islands eignet sich für ein Experiment zur CO<sub>2</sub>-Speicherung in ozeanischer Kruste. In Bohrlöchern platzierte Forschungstechnik erfasst jetzt die wichtigsten Umweltparameter im Meeresuntergrund.**

Auf zwei mehrwöchigen Schiffsexpeditionen zum Mittelatlantischen Rücken südlich Islands haben die Forschenden im CDRmare-Verbundprojekt AIMS<sup>3</sup> das Zielgebiet in 1500 bis 1700 Metern Wassertiefe großflächig erkundet. Mithilfe von Wärmestrommessungen im Meeresboden und chemischen Analysen von Wasserproben aus der Tiefsee konnten sie zum Beispiel nachweisen, dass an der Ostflanke des Reykjanes-Rückens Ozeanwasser durch die obere

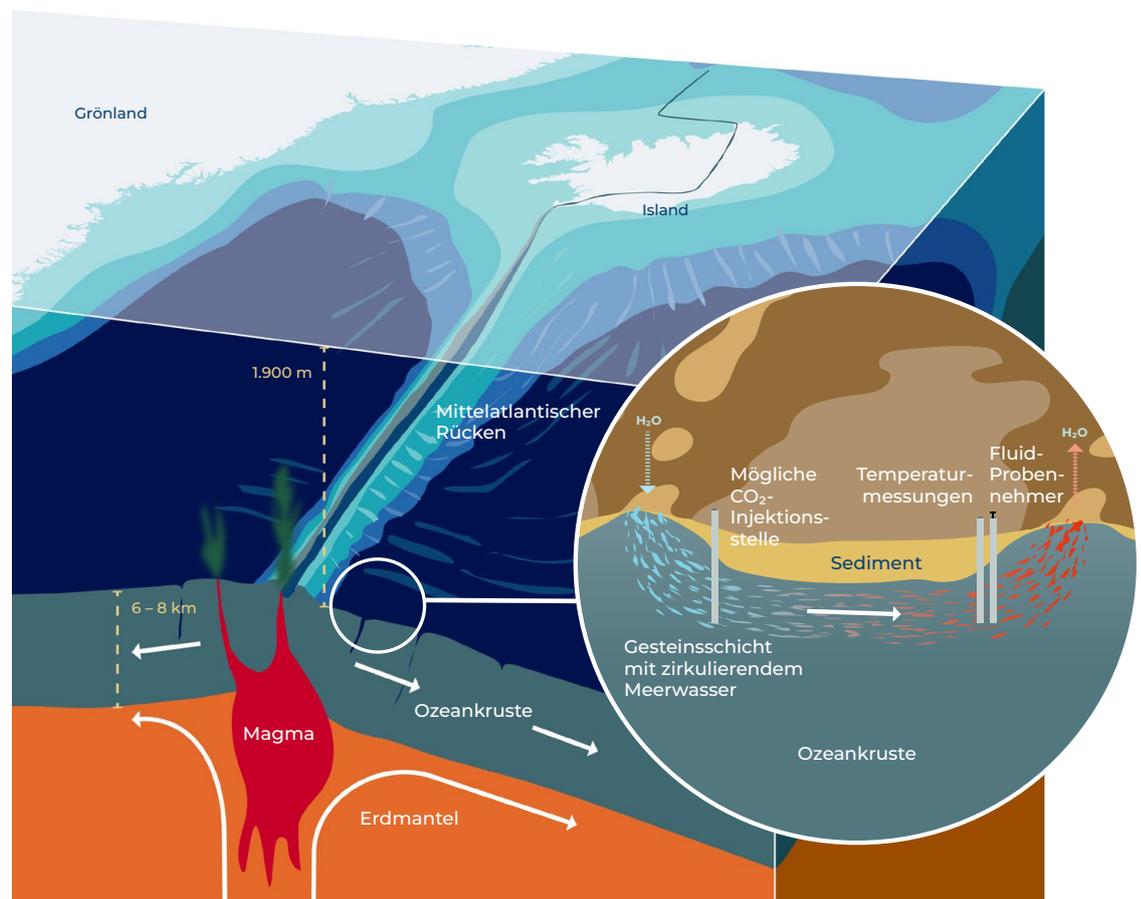
Basaltschicht der Erdkruste zirkuliert. Eine solche Wasserströmung bedeutet, dass injiziertes Kohlendioxid auf natürliche Weise im Basaltgestein verteilt würde. Im Falle einer CO<sub>2</sub>-Verpressung könnte demzufolge auf viele teure Bohrungen verzichtet werden.

Um herauszufinden, wie durchlässig die Erdkruste an verschiedenen Stellen des Zielgebietes ist und mit welchen Fließgeschwindigkeiten das Wasser in der oberen Basaltkruste zirkuliert, haben die Forschenden zweimal zwei Bohrlöcher etwa 40 Meter tief in die Kruste gebohrt und diese mit Messtechnik ausgestattet. Die ersten zwei Bohrlöcher befinden sich in einem Gebiet in mittelbarer Nähe zur Plattengrenze am Mittelatlantischen Rücken. Hier ist die Erdkruste gerade einmal 760 000 Jahre alt und wird nur von einer dünnen Sedimentschicht bedeckt. Der zweite Messpunkt liegt weiter östlich, in einem kleinen Tiefseebecken. Dessen Basaltkruste ist 3,27 Millionen Jahre alt und wird von einer etwa 30 Meter dicken Sedimentschicht bedeckt.

Die zwei Bohrlöcher in beiden Gebieten liegen jeweils einige Zehnermeter auseinander. Sie sind so angeordnet, dass das Wasser in der Basaltkruste von Bohrloch 1 zu Bohrloch 2 strömt. Im ersten Bohrloch messen Sensoren vor allem die Wasser- und Bodentemperatur, um herauszufinden, inwiefern die Wärme aus dem Innern der Erde die Temperatur des Wassers und sein Strömungsverhalten beeinflussen. Im zweiten Bohrloch haben die Forschende eine neue Generation tiefseetauglicher Fluid-Probennehmer installiert.

Mithilfe von Temperaturmessungen haben die Forschenden herausgefunden, dass Meerwasser in der oberen Basaltkruste zirkuliert und sich dabei erwärmt. In Bohrlöchern platzierte Observatorien und Fluid-Probennehmer erfassen nun alle Umweltparameter, die notwendig sind, um die Wasserbewegung durch das Gestein genauer zu verstehen.

Grafik: Rita Erven, CDRmare



## Kernbotschaft 2

### **In den Bohrlöchern dokumentiert aktuell eine neue Generation tiefseetauglicher Probennehmer und Observatorien, mit welcher Geschwindigkeit und unter welchen Druck- und Temperaturbedingungen Fluide in der Basaltkruste zirkulieren.**

Um herauszufinden, mit welcher Geschwindigkeit das Wasser in der porösen oberen Basaltkruste zirkuliert, haben die Forschenden im CDRmare-Verbundprojekt AIMS<sup>3</sup> tiefseetaugliche Probennehmer, sogenannte Fluid-Sampler, weiterentwickelt und in den Bohrlöchern platziert. Die Probennehmer bestehen aus einer Kammer voll Kochsalz, einer durchlässigen Membran und einem langen Schlauch, der in das Bohrloch hinabreicht.

Das Salz fungiert als osmotische Pumpe. Es erzeugt einen Saugdruck, der Flüssigkeiten aus dem umliegenden Gestein in den Schlauch zieht – und zwar auf Kommando. Neu an den weiterentwickelten Probennehmern ist nämlich, dass erst nach Ablauf einer zuvor bestimmten Zeit ein kleiner Motor ein Fallgewicht in Bewegung setzt, welches die Probennahme startet.

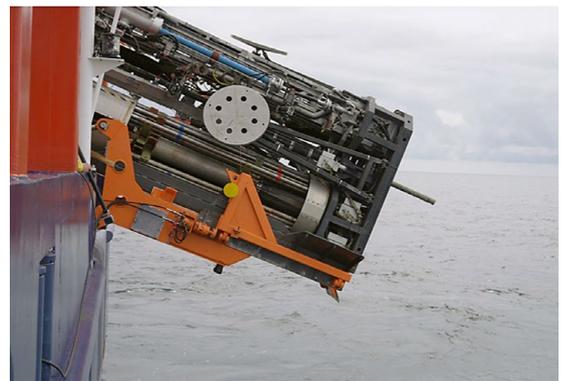
Die Form des Schlauches verhindert, dass sich die aufgenommenen Fluide miteinander vermischen. Es entsteht also eine ortsfeste Schichtung der Fluide. Mithilfe dieser können die Forschenden nach zwei Jahren herausfinden, wie sich die Fluide im Laufe des Messzeitraumes verändert haben.

Besonders aufschlussreiche Informationen wird dieses Probennahme-Verfahren liefern, wenn es den Tiefseeforschenden eines Tages erlaubt wird, einen sogenannten Tracer (isotopischer Signalstoff) im ersten der zwei Bohrlöcher freizusetzen. Anhand der Probennahmen im zweiten Bohrloch können die Forschenden dann genau bestimmen, wie lange der Signalstoff braucht, um durch die obere Basaltkruste von Bohrloch 1 zu Bohrloch 2 zu wandern. Solche konkreten Daten werden benötigt, um vorherzusagen, wie schnell sich verpresstes Kohlendioxid in der Kruste ausbreiten würde und ob die Verweilzeit die Bildung der unschädlichen Karbonatminerale erlaubt.

Die erste Probennahme-Phase wird im Spätsommer 2025 beendet werden. Dann tauchen Tiefseeroboter zu den Bohrlöchern, entnehmen die aktuell im Einsatz befindlichen Fluid-Sampler und installieren Probennehmer für die zweite Erkundungsphase.

*Am Heck des deutschen Forschungsschiffes Maria S. Merian (o.l.) wird das Meeresbodenbohrgerät MARUM-MeBo70 zu Wasser gelassen (o.r.). An Bord hat es eine speziell präparierte Stange, in der sich einer der neuen Fluid-Probennehmer befindet (u.l.). Diese Stange wird am Ende der Tiefseebohrung (u.r.) im Bohrloch installiert, sodass die Messungen in der Basaltkruste beginnen können.*

Fotos: MARUM



### Kernbotschaft 3

**In AIMS<sup>3</sup> entwickelte Karbonat-Sensoren erleichtern die Suche nach CO<sub>2</sub>-Leckagen am Meeresboden. Sie sind schneller, kleiner, günstiger und vor allem energiesparender als bisherige Technik.**

Prototypen der neuen Sensoren wurden bereits auf Testfahrten erfolgreich eingesetzt. In der zweiten Projektphase sollen sie zur Serienreife gebracht werden und künftig vor allem auf autonom agierenden Forschungsplattformen und -geräten zum Einsatz kommen.

Entwickelt wurden drei neue tiefseetaugliche Sensoren: Ein erster optischer Sensor misst den Gehalt an gelöstem CO<sub>2</sub>, ein zweiter erfasst den Versauerungsgrad (pH-Wert) des Wassers. Ein dritter Sensor analysiert den Anteil des anorganischen Kohlenstoffs im Meerwasser. Dafür haben die Forschenden erstmals versucht, ein aufwendiges Labormessverfahren so klein zu verpacken, dass es auf einen Sensor passt.

Alle Messungen erfolgen in Sekundenschnelle, weil die Sensoren nicht nur auf stationären Überwachungsplattformen zum Einsatz kommen sollen, sondern auch auf beweglichen Unterwasser-sonden und -fahrzeugen. Schnelle, präzise Analysen sind hierbei Pflicht, weil andernfalls nicht mehr nachvollzogen werden kann, an welcher Position eventuell verdächtig hohe CO<sub>2</sub>-Werte gemessen wurden.

Zu den technischen Grundanforderungen gehört außerdem ein extrem sparsamer Energieverbrauch. Bei der Überwachung von CO<sub>2</sub>-Lagerstätten unter dem Meer werden die Systeme künftig nicht mehr von einem Forschungsschiff mit Strom versorgt. Stattdessen werden sie monatelang autonom am Meeresboden agieren und dabei nur jene Energie zur Verfügung haben, die in ihren Batterien gespeichert ist.

Mit den genannten Eigenschaften lassen sich die neuen Sensoren nicht nur in der Tiefsee einsetzen. Sie können auch in flacheren Gewässern ihren Dienst versehen – so zum Beispiel bei der Überwachung künftiger CO<sub>2</sub>-Lagerstätten tief unter der deutschen Nordsee.



*Diese Bilder zeigen den neuen optischen CO<sub>2</sub>-Sensor, der am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik in Freiburg entwickelt wurde. Er kann sowohl auf Meeresbodenstationen eingesetzt werden als auch im weiterentwickelten Unterwasserfahrzeug IMGAM.*

*Fotos: Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM*



#### Kernbotschaft 4

### Mithilfe neu und weiterentwickelter Tiefseeroboter und Überwachungsstationen können die Forschenden nun viel größere Areale des Meeresbodens kontinuierlich nach CO<sub>2</sub>-Austrittsstellen absuchen als zuvor – in der Tiefsee ebenso wie in der deutschen Nordsee.

In der ersten Phase des CDRmare-Verbundprojektes AIMS<sup>3</sup> wurden zwei modulare Überwachungssysteme neu und weiterentwickelt, die den Meeresboden und das bodennahe Tiefenwasser nach Kohlendioxid-Leckagen absuchen sollen. Einer der Prototypen gehört in die Kategorie »tiefseetaugliche Lander-Systeme«. Er besteht aus einem Grundgerüst, welches mit Batterien, missionspezifischer Messtechnik und Auftriebskörpern ausgestattet ist und mit

einer Metallplatte beschwert in die Tiefsee hinabgelassen wird. Ist der Einsatz beendet, wird die Metallplatte via Funksignal ausgeklinkt und der Lander steigt mit seinen Daten wieder zur Meeresoberfläche auf.

Das Besondere an dem neuen AIMS<sup>3</sup>-Lander ist eine Parkbucht für einen kleinen, zigarrenförmigen Unterwasserroboter. Dieser selbstfliegende Roboter kann wie der Lander selbst mit den neuen Karbonat-Sensoren ausgestattet werden und wird künftig von einem Kabel geführt um den Lander kreisen. Da das Kabel dabei Stück für Stück aus- und wieder eingerollt wird, kann der Roboter in regelmäßigen Abständen spiralförmig um den Lander kreisen und mit seinen Messungen Radien von einigen Zehnermetern abdecken. Die von ihm überwachte Meeresbodenfläche beträgt daher mehr als 1 000 Quadratmeter und ist somit deutlich größer als jene Fläche, die ein Lander-System allein überwachen kann. Damit eignet sich das neue Gespann insbesondere für die Überwachung des Meeresbodens in unmittelbarer Nähe zu Bohrlöchern, durch die CO<sub>2</sub> in die obere ozeanische Kruste injiziert wird. Erste gemeinsame Test-Einsätze des Landers und seines kreisenden Roboters sind für die zweite Projektphase geplant und sollen dann Schritt für Schritt in größeren Tiefen durchgeführt werden.

*Der neue tiefseetaugliche AIMS<sup>3</sup>-Lander besitzt eine Parkbucht, aus der in regelmäßigen Abständen ein kleiner Roboter aufsteigen und die Umgebung nach CO<sub>2</sub>-Leckagen absuchen soll. Beide Geräte existieren als Prototypen. Erste gemeinsame Testeinsätze im Meer sind in der zweiten Projektphase geplant.*

Abbildungen: MARUM



Die Weiterentwicklung ist ein autonomes torpedo-förmiges Unterwasserfahrzeug (AUV), welches ein schräg nach vorn gerichtetes Sonar besitzt. Mit diesem kann es starke Dichteänderungen in der Wassersäule wahrnehmen, so zum Beispiel auch aufsteigende Gasblasen. Sowie das Fahrzeug einen Blasenstrom detektiert, kann es mithilfe künstlicher Intelligenz über der Austrittsstelle einparken und einen Teil der Gasblasen einfangen. Dazu nutzt es eine trichterförmige Öffnung an seiner Unterseite. Am Ende dieser Öffnung befinden sich dann entweder ein Probennehmer, der das Gas für spätere Analysen auf dem Forschungsschiff konserviert, oder aber die neu entwickelten Karbonat-Sensoren. Diese können das aufsteigende Gas dann sofort analysieren.

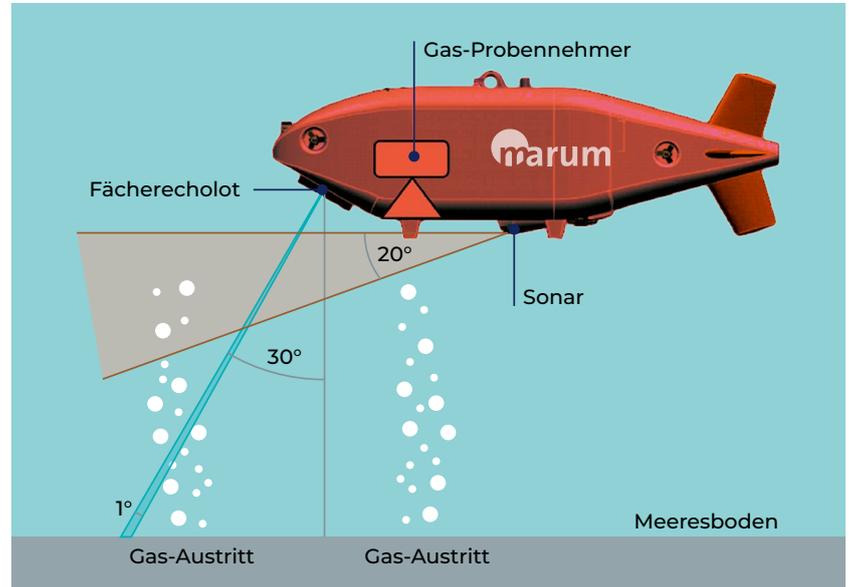
Während das Lander-System für mehrmonatige autonome Einsätze am Meeresboden konzipiert wurde, kann das AUV nur dann eingesetzt werden, wenn Wissenschaftler\*innen mit dem Forschungsschiff vor Ort sind. Es soll vor allem dann zu Wasser gelassen werden, wenn beispielsweise besonders große Mengen CO<sub>2</sub> im Untergrund verpresst werden und zusätzliche Überwachungsmaßnahmen über ein großes Areal erforderlich sind. Das AUV würde die zu überwachende Meeresfläche dann auf einem vorgegebenen Kurs abfahren und systematisch kontrollieren.

Beide neu und weiterentwickelten Überwachungssysteme sind zwar für Einsätze in Wassertiefen von bis zu 2000 Metern konzipiert, sie können aber auch jederzeit in flacheren Meeresregionen eingesetzt werden – so zum Beispiel in der deutschen Nordsee, wo künftig abgeschiedenes Kohlendioxid im industriellen Maßstab in Sandsteinformationen eingelagert werden soll.



Moderne Sonartechnik und künstliche Intelligenz zeichnen das autonom agierende Unterwasserfahrzeug IMGAM aus. Es kann Gasaustritte am Meeresboden detektieren, sich eigenständig darüber positionieren und das aufsteigende Gas beproben oder aber mithilfe der neuen Sensoren direkt analysieren.

Grafik und Foto: MARUM, Grafik-Überarbeitung: Rita Erven, CDRmare



## Kernbotschaft 5

**Die erhobenen Messdaten zur Zirkulation, Temperatur und chemischen Zusammensetzung des Porenwassers in der ozeanischen Kruste fließen jetzt in neue Computermodelle. Mit deren Hilfe bewerten die Forschenden, in welchem Maße sich bestimmte Gebiete des Tiefseeuntergrundes für eine CO<sub>2</sub>-Speicherung eignen.**

Die physikalischen und chemischen Daten aus dem Tiefseeboden sowie aus der Wasserschicht darüber werden genutzt, um numerische Meeresbodenmodelle zu validieren. Integriert werden außerdem Daten aus Gesteinsproben, welche die Wissenschaftler\*innen auf ihren zwei Schiffsexpeditionen flächendeckend am Tiefseeboden gesammelt haben. Die Basaltbrocken verraten, wie porös und damit durchlässig die obere Basaltschicht in den verschiedenen untersuchten Tiefseegebieten ist. Eine weitere

Datenquelle sind geologische Daten aus anderen Tiefseebohrungen, die in der Vergangenheit am Reykjanes-Rücken durchgeführt worden waren.

Werden alle diese Zahlen und Fakten in das Computermodell übertragen, kann es lokale Unterschiede bei seinen Berechnungen besser berücksichtigen. Diese Fähigkeit wiederum ermöglicht den Forschenden genauere Aussagen darüber, wie sich das CO<sub>2</sub> in der ozeanischen Kruste eines ausgewählten Tiefseegebietes ausbreiten würde und ob sie sich als CO<sub>2</sub>-Lagerstätte eignen würde.

Erste Ergebnisse aus Modellierungen im Verbundprojekt AIMS<sup>3</sup> zeigen zum Beispiel, dass die obere ozeanische Kruste am Reykjanes-Rücken ab einer Tiefe von 200 bis 300 Metern so undurchlässig wird, dass eine CO<sub>2</sub>-Verpressung im großen Stil in dieser Tiefe nur schwer machbar wäre. Mögliche Speicherprojekte wären demzufolge nur in den Gesteinsschichten darüber denkbar.

## Kernbotschaft 6

**Erste Abschätzungen zum Speichervolumen in jungen, warmen Basalten zeigen, dass entlang der Rückenflanken nördlich und südlich Islands mindestens 34 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> Platz fänden. Dieses Speicherpotenzial zu nutzen, würde jedoch einen erheblichen logistischen und finanziellen Aufwand erfordern.**

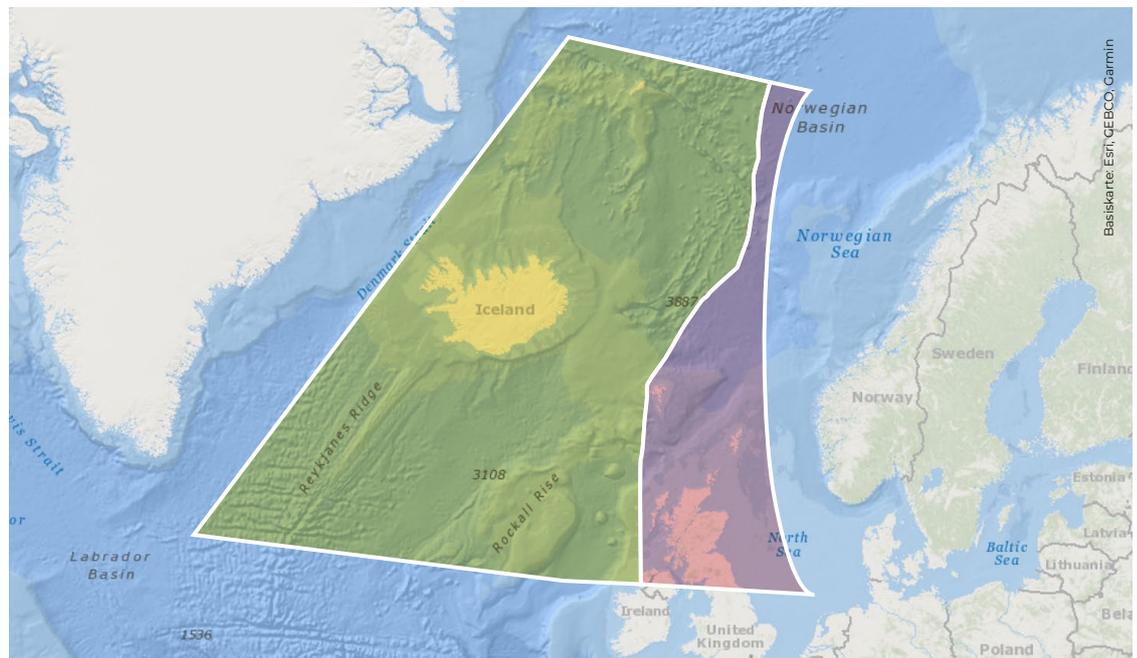
Die Forschenden aus dem AIMS<sup>3</sup>-Konsortium haben erstmals das CO<sub>2</sub>-Speicherpotenzial der relativ jungen und warmen Basaltvorkommen in den Regionen nördlich und südlich Islands berechnet. Dafür analysierten sie zum einen Karten, um die Fläche der Basaltvorkommen abzuschätzen. Zum anderen nutzten sie Daten aus älteren Tiefenbohrungen und seismischen Reflexionsprofilen, um die Mächtigkeit der Basallagen abzuleiten und Informationen über die Porosität der Gesteinsschichten zu gewinnen. Auf Basis dieser Daten berechneten die Forschenden im

Anschluss, wie groß das Speichervolumen der Basalte tatsächlich wäre, wenn flüssiges CO<sub>2</sub> eingelagert würde.

Dabei kam heraus, dass in dem etwa 233 000 Quadratkilometer großen Basaltareal rund um Island geschätzte 34 bis 168 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> eingelagert werden könnten. Der sich östlich anschließende Bereich der Shetland-Faröer-Basalte ist 42 000 Quadratkilometer groß und weist noch poröseres Gestein auf. Hier könnten etwa 16 bis 81 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> gespeichert werden. Da beide Regionen jedoch recht weit von Orten entfernt sind, an denen große Mengen schwer vermeidbarer Kohlendioxid-Emissionen aus Industrieprozessen anfallen, wären die Kosten für den Transport und die untermeerische Speicherung des CO<sub>2</sub> extrem hoch.

*Diese Karte zeigt die zwei Basaltregionen, deren CO<sub>2</sub>-Speicherpotenzial im Verbundprojekt AIMS<sup>3</sup> genauer berechnet wurde. Grün markiert sind die jungen und warmen Basalte des Reykjanes-Rückens. Östlich daneben liegen die noch poröseren Shetland-Faröer-Basalte, hier violett eingefärbt.*

*Grafik: Rita Erven/  
CDRmare nach einer  
Vorlage von Mohamed  
Elfil, 2024, MSc-Arbeit,  
Universität Bremen*



## IMPRESSUM

Dies ist eine Veröffentlichung unter der Creative Commons Lizenz 4.0 International:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>

Text: Sina Löschke, Achim Kopf und das AIMS<sup>3</sup>-Konsortium // Design: Rita Erven // August 2024  
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel // Wischhofstr. 1–3 // 24148 Kiel (CDRmare Koordination)  
& MARUM, Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen, Leobener Str. 8, 28359 Bremen

### Diese Publikation ist folgendermaßen zu zitieren

Kopf, A., Löschke, S. und das AIMS<sup>3</sup>-Konsortium (2024): *Neues Wissen zur CO<sub>2</sub>-Speicherung in ozeanischer Kruste: Die sechs wichtigsten Erkenntnisse aus der AIMS<sub>3</sub>-Forschung*, pp. 1-8, DOI 10.3289/CDRmare.39



[aims3.cdrmare.de](https://aims3.cdrmare.de)



[linkedin.com/  
company/cdrmare/](https://linkedin.com/company/cdrmare/)



CDRmare  
Wissenstransfer  
[transfer@cdrmare.de](mailto:transfer@cdrmare.de)



AIMS<sup>3</sup> – *Alternative Szenarien, innovative Technologien und Monitoringansätze für die Speicherung von Kohlendioxid in ozeanischer Kruste* ist ein Forschungsverbund im Rahmen der **Forschungsmission CDRmare**. In der Forschungsmission CDRmare der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM), werden verschiedene Methoden der marinen CO<sub>2</sub>-Entnahme und Speicherung (Alkalinisierung, Blue Carbon, Künstlicher Auftrieb, CCS) hinsichtlich ihres Potenzials, ihrer Risiken und Trade-Offs untersucht und in einem transdisziplinären Bewertungsrahmen zusammengeführt.