

## CDRmare INSIGHTS

# Die sechs wichtigsten Forschungsergebnisse zu Verfahren des künstlichen Auftriebes

Im CDRmare-Forschungsverbund zu künstlichem Ozeanauftrieb haben Wissenschaftler\*innen in den zurückliegenden drei Jahren untersucht, ob Mikroalgen verstärkt wachsen und sich damit die biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres klimawirksam verstärken ließe, wenn man in ausgewählten Regionen des Ozeans nährstoffreiches Tiefenwasser an die Meeresoberfläche pumpt. Ihre sechs wichtigsten Erkenntnisse zur Machbarkeit der Verfahren, zu möglichen Risiken und zu fehlenden Rahmenbedingungen stellen wir hier in Kurzform vor.

- 1** Verfahren für den künstlichen Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers könnten nicht nur wegen eines verstärkten Algenwachstums im Oberflächenwasser klimawirksam sein. Das kalte Tiefenwasser würde unter anderem auch die Meeresoberfläche abkühlen und so die natürliche CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans mithilfe physikalisch-chemischer Prozesse verstärken.
- 2** Weil Eisen als Nährstoff in vielen Teilen des Ozeans fehlt, würde ein globaler Einsatz von Pumpen zum Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers nicht ausreichen, um die CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans mithilfe der biologischen Kohlenstoffpumpe nachhaltig zu verstärken.
- 3** Untersuchungen der Planktongemeinschaft in sogenannten Mesokosmen belegen, dass Mikroalgen und Zooplankton sehr unterschiedlich auf den Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers reagieren. Dieses Verhalten ist bislang noch nicht in die Computermodelle eingeflossen.
- 4** Für eine maximale CO<sub>2</sub>-Entnahme müssten Methoden des künstlichen Auftriebs mit Verfahren zum Anbau von Großalgen auf dem offenen Meer kombiniert werden.
- 5** Um weiterführende Erkenntnisse zu erlangen, müssten Forschende Verfahren des künstlichen Auftriebes im Meer testen. Das Test-ArtUp-Team ist mit seinem Wellenpumpen-Testlauf auf dem offenen Meer gescheitert, weil die Pumpentechnik noch nicht richtig funktionierte. Neuentwickelte Strömungsmodelle zeigen aber schon mal, wie der gezielte Auftrieb von Tiefenwasser gelingen könnte.
- 6** Je nachdem, ob und wo Verfahren des künstlichen Auftriebes eingesetzt werden sollten, gäbe es im Vorfeld viele Steuerungs- und Regulierungsfragen zu klären.

## Kernbotschaft 1

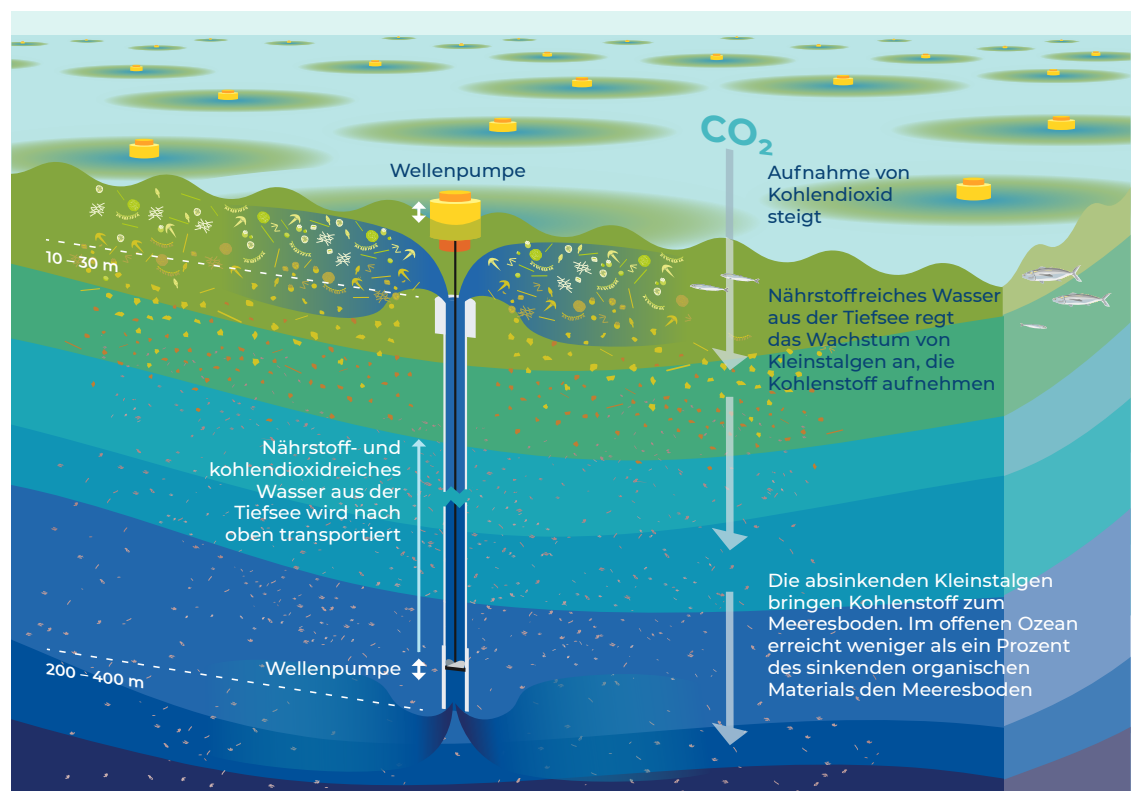
**Verfahren für den künstlichen Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers könnten nicht nur wegen eines verstärkten Algenwachstums im Oberflächenwasser klimawirksam sein. Das kalte Tiefenwasser würde unter anderem auch die Meeresoberfläche abkühlen und so die natürliche CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans mithilfe physikalisch-chemischer Prozesse verstärken.**

Zu diesem Ergebnis kommen Forschende des CDRmare-Verbundes für künstlichen Auftrieb (Test-ArtUp), nachdem sie den weltweiten Einsatz wellen- oder propellergetriebener Tiefenwasserpumpen in einem globalen Erdsystem-Modell simuliert haben. Die Modell-ergebnisse widerlegen somit die lang gehegte Annahme, wonach Verfahren des künstlichen Auftriebes allein deshalb klimawirksam sein

könnten, weil die im Tiefenwasser enthaltenen Nährstoffe eine biologische Kettenreaktion an der Meeresoberfläche auslösen (siehe Abbildung unten).

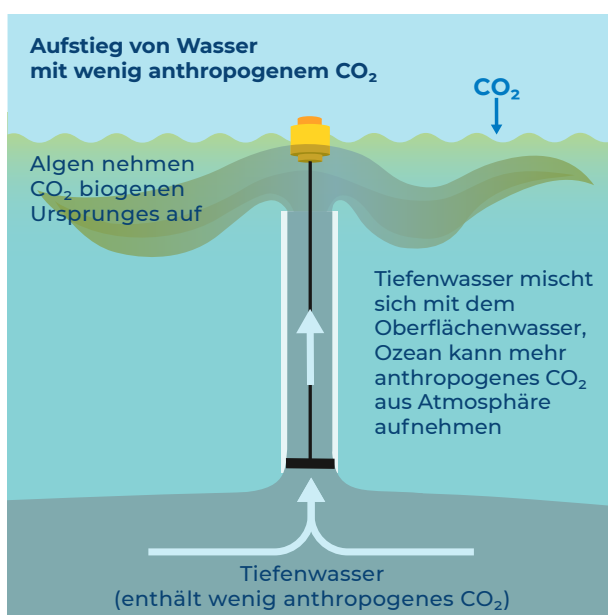
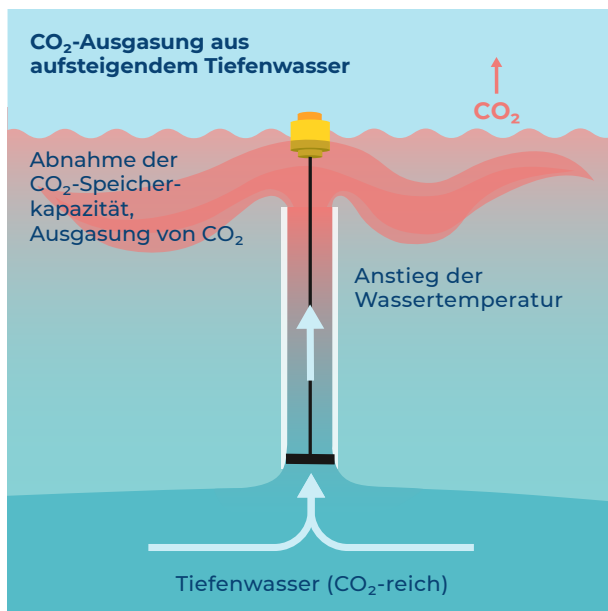
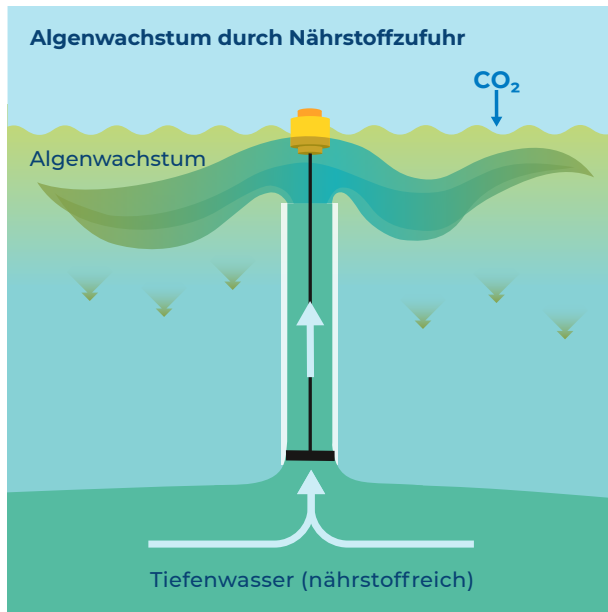
Die Modellberechnungen zeigen jedoch, dass durch das Heraufpumpen des Tiefenwassers – im Modell aus 1000 Metern Wassertiefe – drei weitere Messparameter verändert werden, welche die natürliche CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans beeinflussen: das Säurebindungsvermögen des Oberflächenwassers (Alkalinität), seine Temperatur sowie der Anteil des im Oberflächenwasser gebundenen Kohlendioxids.

Vermischt sich das Tiefenwasser mit dem Oberflächenwasser, steigt dessen Säurebindungsvermögen (Alkalinität) und damit die Fähigkeit des Ozeans, im Oberflächenwasser gelöstes CO<sub>2</sub> chemisch zu binden. Infolgedessen kann der Ozean wieder neues CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre aufnehmen. Zur Erklärung: Das Tiefenwasser besitzt eine hohe Alkalinität, weil sich die kalkhaltigen Überreste von Muscheln, Schnecken und anderen kalkbildenden Organismen ab einer bestimmten Wassertiefe auflösen. Dabei werden mineralische Lösungsprodukte freigesetzt, welche die Alkalinität des



Grafik: Rita Erven,  
CDRmare

Verfahren des künstlichen Auftriebes zielen darauf ab, das Algenwachstum in Meeresregionen mit nährstoffarmem Oberflächenwasser anzuregen. Wo mehr Algen wachsen, wird mehr CO<sub>2</sub> durch Photosynthese gebunden und in Biomasse eingeschlossen. Wenn die Algen absinken, wird der in der Biomasse enthaltene Kohlenstoff in mittlere bis große Wassertiefen verfrachtet. Den Meeresboden erreicht jedoch nur ein Bruchteil der ursprünglichen Biomasse, weil Mikroorganismen die herabsinkenden Algenpartikel zersetzen.



Der künstliche Auftrieb von nährstoffreichem Tiefenwasser kann abhängig von den lokalen Standortbedingungen unterschiedliche klimarelevante Effekte hervorrufen. Welche dies sein können, erläutern diese fünf Grafiken.

Grafiken: Rita Erven, CDRmare

Wassers erhöhen. Steigt das Tiefenwasser auf, vermischt es sich mit dem Oberflächenwasser und erhöht dessen Alkalinität. Gleichzeitig sinkt die Temperatur des Oberflächenwassers. Letzteres hat zwei klimarelevante Veränderungen zufolge: Zum einen kühlen sich die Luftmassen über dem Meer ab. Zum anderen kann kälteres Wasser mehr Sauerstoff und CO<sub>2</sub> speichern als wärmeres. Das heißt, das kühlere Oberflächenwasser kann mehr CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre aufnehmen.

Um zu verstehen, wie das eingemischte Tiefenwasser den Anteil des im Oberflächenwasser gelösten CO<sub>2</sub> verändert, muss man wissen, dass das heutige Tiefenwasser im Allgemeinen mehr gelöstes CO<sub>2</sub> in chemisch gebundener Form enthält als das Oberflächenwasser. Grund dafür sind Mikroorganismen, die in der Tiefe herabsinkende Tier- und Pflanzenreste zersetzen, dabei Sauerstoff verbrauchen und CO<sub>2</sub> sowie Nährstoffe abgeben. Mischt sich dieses CO<sub>2</sub>-reiche Tiefenwasser nun nach seinem künstlichen Auftrieb mit dem Oberflächenwasser, können die Mikroalgen in der lichtdurchfluteten Schicht das gelöste CO<sub>2</sub> biologischen Ursprungs wieder aufnehmen und in Biomasse binden.

Gelingt den Algen diese CO<sub>2</sub>-Aufnahme im umfänglichen Maße, würde das hochgepumpte Tiefenwasser theoretisch weniger gelöstes CO<sub>2</sub> menschlichen Ursprungs (anthropogen) enthalten als das Oberflächenwasser. Der Grund: Als das Tiefenwasser vor Hunderten oder Tausenden Jahren letztmalig an der Meeresoberfläche war, enthielt die Atmosphäre noch deutlich weniger vom Menschen freigesetztes CO<sub>2</sub> als heute. Nimmt man also an, dass die Mikroalgen alles CO<sub>2</sub> biologischen Ursprungs binden, kann das Tiefenwasser dazu beitragen, die CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans an der Meeresoberfläche anzukurbeln.

Zwei Risiken hätte das großflächige Heraufpumpen von Tiefenwasser jedoch: Sollte es aus bestimmten Gründen viel CO<sub>2</sub> enthalten, kann ein Teil davon an der Meeresoberfläche ausgasen und somit in die Atmosphäre entweichen. Diese Annahme bestätigte sich auch in den Modellsimulationen. Außerdem würde das Heraufpumpen kalten Tiefenwassers bedeuten, dass an anderer Stelle im Meer warmes Oberflächenwasser in die Tiefe sinkt, um das Wasserreservoir in der Tiefe wieder aufzufüllen. Liefere dieser Prozess über einen langen Zeitraum, würde sich der tiefe Ozean Stück für Stück erwärmen und seine Fähigkeit, Kohlenstoff chemisch zu speichern, kontinuierlich abnehmen.

Die Simulationen wurden mit einem Erdsystemmodell durchgeführt, welches die Klimakomponenten Ozean, Atmosphäre und Meereis miteinander kombinierte und eine vereinfachte Darstellung des marinen Ökosystems und Nahrungsnetzes enthielt. Die Forschenden gaben zum Beispiel fest vor, wie viel Kohlenstoff die Algengemeinschaft pro eingesetzter Nährstoffmenge aufnehmen und binden konnte. In der Realität unterliegt dieses Kohlenstoff-zu-Nährstoff-Verhältnis jedoch großen umweltbedingten Schwankungen.

Es gibt zudem Auftriebsverfahren, in denen sich das Tiefenwasser auf seinem Weg an die Meeresoberfläche erwärmt (mehr dazu in Kernbotschaft 5). Kämen diese Verfahren zum Einsatz, würde sich die Meeresoberfläche nicht abkühlen, was zur Folge hätte, dass auch die oben beschriebenen klimarelevanten Folgen einer auftriebsbedingten Abkühlung ausbleiben würden.

## Kernbotschaft 2

**Weil Eisen als Nährstoff in vielen Teilen des Ozeans fehlt, würde ein globaler Einsatz von Pumpen zum Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers nicht ausreichen, um die CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans mithilfe der biologischen Kohlenstoffpumpe nachhaltig zu verstärken.**

Diese Aussage ist ebenfalls das Ergebnis umfangreicher Modellsimulationen. Deren Funktionslogik beruht auf dem Wissen, dass für eine verstärkte biologische Kohlenstoffpumpe (Mikroalgenwachstum und Absinken der Biomasse) alle erforderlichen Nährstoffe sowie im Wasser gelöster Kohlenstoff in ausreichenden Mengen sowie in einem richtigen Verhältnis zueinander an die Meeresoberfläche gepumpt werden müssen. Bei den Nährstoffen handelt es sich um Phosphor, Stickstoff in Form von Nitrat, Silikat sowie in geringeren Mengen Eisen und andere Mikronährstoffe.

Die in Test-ArtUp durchgeführten Modellexperimente haben offenbart, dass sowohl ein ozeanweiter Einsatz von 500 Meter langen Tiefenwasserpumpen als auch ihr begrenzter Einsatz in bestimmten Regionen die biologische Kohlenstoffpumpe nicht verstärken würde, weil in beiden Fällen Eisen als notwendiger Mikronährstoff im Oberflächenwasser fehlt. Mit dem Tiefenwasser würden überwiegend Phosphor und Stickstoff an die Meeresoberfläche aufsteigen. Das für das Algenwachstum erforderliche Eisen aber stünde nicht in den erforderlichen Mengen zur Verfügung. Infolgedessen blieben in den Modellsimulationen sowohl das erhoffte zusätzliche Algenwachstum als auch die damit verbundene zusätzliche CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans aus.

Überwinden ließe sich diese natürliche Barriere des Algenwachstums, wenn das Oberflächenwasser parallel zum künstlichen Auftrieb mit Eisen gedüngt würde. In entsprechenden Modellexperimenten zeigte sich, dass der Ozean bei einem kombinierten Einsatz von Tiefenwasserpumpen und Eisendüngung etwas mehr CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre aufnehmen würde, als wenn die Eisendüngung allein zum Einsatz käme. Allerdings arbeiteten die Wissenschaftler auch bei diesen Modellexperimenten mit einem festen Kohlenstoff-zu-Nährstoff-Verhältnis. Dieses entspricht jedoch nicht immer den tatsächlichen Bedingungen in marinen Ökosystemen, wie verschiedene Untersuchungen von Mikroalgen und Zooplankton in sogenannten Mesokosmen zeigten (mehr in Kernbotschaft 3).

Wie sich ein großflächiger Einsatz von Verfahren des künstlichen Auftriebes auf die Lebensgemeinschaften des Ozeans auswirken würde, haben Forschende des CDRmare-Verbundes Test-ArtUp an der Küste Gran Canarias in sogenannten Mesokosmen untersucht. Dabei handelte es sich um lange schlauchähnliche Röhren aus durchsichtigem Plastik, die senkrecht an der Meeresoberfläche treiben und oben etwas aus dem Meer herausragen. Am unteren Ende sind die Plastikröhren geschlossen. Die Mesokosmen wurden mit etwa 6000 Liter Meerwasser und allen darin lebenden Mikroorganismen gefüllt. Dazu zählten Mikroalgen, verschiedene Kleinkrebse, kleine Quallen und sogar Fischlarven. Den Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers simulierten die Forschenden, indem sie mit Nährstoffen angereichertes Tiefenwasser hinzugeben.

## Kernbotschaft 3

**Untersuchungen der Planktongemeinschaft in sogenannten Mesokosmen belegen, dass Mikroalgen und Zooplankton sehr unterschiedlich auf den Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers reagieren. Dieses Verhalten ist bislang noch nicht in die Computermodelle eingeflossen.**

Als Reaktion auf diese Zugabe nahm vor allem das Wachstum der Kieselalgen deutlich zu. Gleichzeitig beobachteten die Wissenschaftler\*innen, dass abhängig vom Nitrat- und Silikatgehalt des hinzugegebenen Tiefenwassers, unterschiedlich viel Kohlenstoff von den Algen pro eingesetzter Nährstoffmenge aufgenommen wurde. Daraus schlussfolgerten sie, dass im Falle eines künstlichen

Als Reaktion auf diese Zugabe nahm vor allem das Wachstum der Kieselalgen deutlich zu. Gleichzeitig beobachteten die Wissenschaftler\*innen, dass abhängig vom Nitrat- und Silikatgehalt des hinzugegebenen Tiefenwassers, unterschiedlich viel Kohlenstoff von den Algen pro eingesetzter Nährstoffmenge aufgenommen wurde. Daraus schlussfolgerten sie, dass im Falle eines künstlichen

Als Reaktion auf diese Zugabe nahm vor allem das Wachstum der Kieselalgen deutlich zu. Gleichzeitig beobachteten die Wissenschaftler\*innen, dass abhängig vom Nitrat- und Silikatgehalt des hinzugegebenen Tiefenwassers, unterschiedlich viel Kohlenstoff von den Algen pro eingesetzter Nährstoffmenge aufgenommen wurde. Daraus schlussfolgerten sie, dass im Falle eines künstlichen



6000 Liter Meerwasser  
passten in jeden der  
Mesokosmen, mit denen  
Wissenschaftler\*innen  
von CDRmare und dem  
Partnerprojekt  
OceanNETs auf Gran  
Canaria ihre Experimente  
zur gezielten CO<sub>2</sub>-  
Entnahme mithilfe des  
Ozeans durchführten.

Fotos: Michael Sswat,  
GEOMAR





Die Veränderungen der Planktongemeinschaften infolge der Nährstoffzugabe (rechts) untersuchten die Forschenden mithilfe regelmäßiger Probenahmen (links). Fotos: Michael Sswat, GEOMAR

Auftriebes die Nährstoffkonzentrationen im Tiefenwasser beeinflussen, in welchem Kohlenstoff-zu-Nährstoff-Verhältnis die Mikroalgen Kohlenstoff aufnehmen und in Biomasse umwandeln würden.

Mehr Silikat im Tiefenwasser würde den Ergebnissen zufolge eine höhere Kohlenstoffbindung pro eingesetzter Nährstoffmenge begünstigen. Genau das hatten die Wissenschaftler\*innen erhofft. Allerdings konnten sie nicht ausschließen, dass dieses Ergebnis durch den Aufbau der Experimente beeinflusst wurde. Aus natürlichen Auftriebsgebieten weiß man nämlich, dass sich mit zunehmendem Nährstoffauftrieb die Kohlenstoff-Aufnahmeeffizienz der Algen eher verschlechtert. Diese Beobachtung kann darauf zurückzuführen sein, dass die Planktongemeinschaft an der Oberfläche nährstoffarmer Meeresregionen an die natürlicherweise geringen Nährstoffkonzentrationen angepasst ist und mit zusätzlichen Nährstoffen erst einmal nicht viel anfangen kann.

Eine verbesserte Kohlenstoffaufnahme der Kieselalgen brächte Vorteile für die CO<sub>2</sub>-Bindung durch das Algenwachstum. Sie hätte allerdings auch Nachteile: So beobachteten die Wissenschaftler\*innen zum einen, dass Überreste der kohlenstoff-effizienteren Algen nach dem Absterben der Organismen langsamer in die Tiefe sanken als Algen, die in Wasser ohne Nährstoffzugabe gelebt hatten. Ein verlangsamtes Absinken wiederum bedeutet, dass Mikroorganismen in der oberen und mittleren Wassersäule mehr Zeit haben, die Algen-Biomasse zu zersetzen. Am Ende würde demzufolge nur ein Bruchteil des zusätzlich in Biomasse gebundenen Kohlenstoffs in den für die Speicherung relevanten Tiefen des Ozeans eingelagert. Zum anderen zog der erhöhte Kohlenstoffgehalt der Algen Veränderungen im marinen Nahrungsnetz nach sich. Der Grund: Kohlenstoffreiche Biomasse besitzt einen geringeren Nährwert. Das heißt, algenfressende Organismen müssen mehr Nahrung aufnehmen, wenn sie im gleichen Maße leben und wachsen wollen.

Die Reaktionen der Planktongemeinschaft auf den Aufstieg nährstoffreichen Tiefenwassers sind demzufolge komplex und hängen von verschiedenen Parametern ab. Die in Test-ArtUp verwendeten Computermodelle waren bislang nicht in der Lage, diese Komplexität und Wechselwirkungen abzubilden. Deshalb lässt sich auf Grundlage der Modellergebnisse auch nicht abschließend sagen, in welchem Maße die biologische Kohlenstoffpumpe im Falle eines Einsatzes von Tiefenwasserpumpen die CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans verstärken würde.

#### Kernbotschaft 4

**Für eine maximale CO<sub>2</sub>-Entnahme müssten Methoden des künstlichen Auftriebes mit Verfahren zum Anbau von Großalgen auf dem offenen Meer kombiniert werden.**

Großalgen wie Tange sind Meister in der CO<sub>2</sub>-Bindung. So effizient wie sie können nur wenige Pflanzen Nährstoffe für die Photosynthese einsetzen, dabei CO<sub>2</sub> aufnehmen und den enthaltenen Kohlenstoff in ihrer Biomasse binden.

Nichtsdestotrotz funktioniert ihr Anbau bislang nur in Küstengewässern. In weiten Teilen des offenen Meeres hingegen enthält das Oberflächenwasser zu geringe Nährstoffkonzentrationen, als dass Großalgen gut gedeihen würden, wenn man sie beispielsweise auf Plattformen in der oberen Wassersäule anbauen würde.

Dieses natürliche Hindernis eines ozeanweiten Großalgenanbaus ließe sich durch den gezielten Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers teilweise überwinden. In Simulationen mithilfe eines Erdsystemmodells konnten Forschende aus dem CDRmare-Partnerprojekt OceanNETs bereits zeigen, dass sich die weltweite Meeresfläche, auf der Großalgen wachsen könnten, fast verdoppeln würde, wenn 1000 Meter lange Auftriebspumpen in allen Meeresgebieten zum Einsatz kämen, die tiefer als 3000 Meter sind und in denen das Oberflächenwasser die algenspezifische Temperaturobergrenze von 20 Grad Celsius nicht überschreitet.

Kombiniert man diese Modellierungsergebnisse mit den neu gewonnenen Erkenntnissen aus dem CDRmare-Forschungsverbund Test-ArtUp, wird deutlich, dass Verfahren des künstlichen Auftriebes sehr wohl die CO<sub>2</sub>-Aufnahme des Ozeans verstärken können. Um das volle Entnahmepotential auszuschöpfen, müsste der Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers allerdings mit dem Anbau von Großalgen kombiniert werden. Ob und wie eine solche Kombination mit bestmöglichen Ergebnissen gelingen kann, ist bislang noch nicht umfassend untersucht worden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

#### Kernbotschaft 5

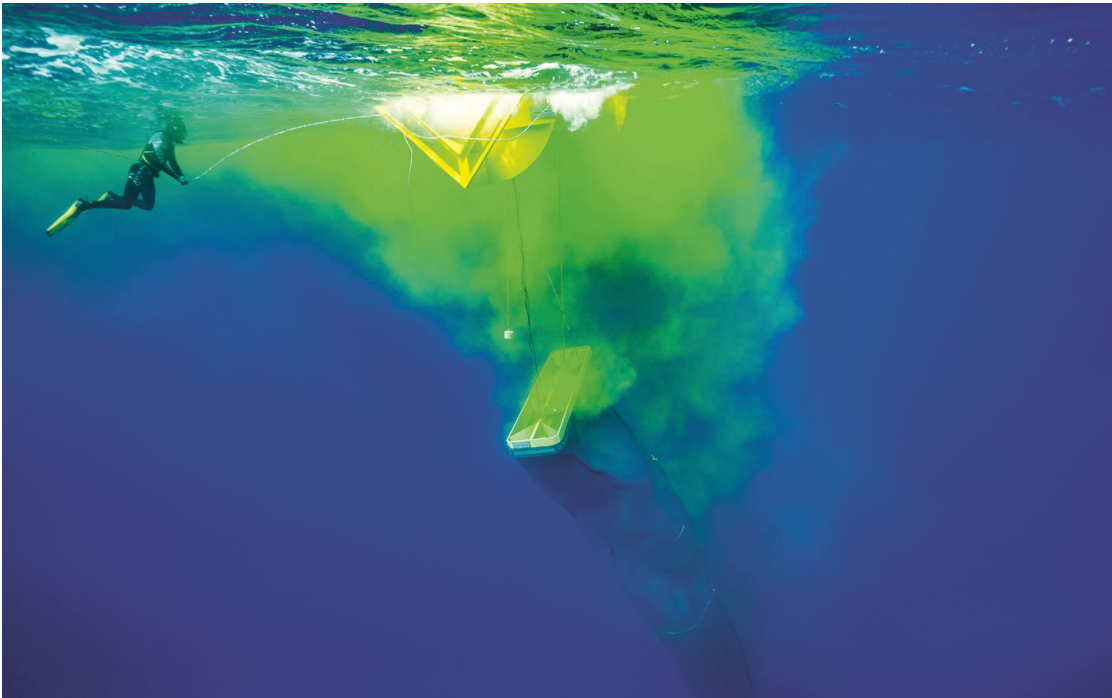
**Um weiterführende Erkenntnisse zu erlangen, müssten Forschende Verfahren des künstlichen Auftriebes im Meer testen. Das Test-ArtUp-Team ist mit seinem Wellenpumpen-Testlauf auf dem offenen Meer gescheitert, weil die Pumpentechnik noch nicht richtig funktionierte. Neuentwickelte Strömungsmodelle zeigen aber schon mal, wie der gezielte Auftrieb von Tiefenwasser gelingen könnte.**

Nährstoffreiches Tiefenwasser ist in der Regel kälter als das Oberflächenwasser des Meeres. Es besitzt demzufolge eine höhere Dichte und ist schwerer als das Wasser an der Meeresoberfläche. Aus diesen Eigenschaften resultiert ein bekanntes Problem für den Einsatz von Verfahren des künstlichen Auftriebes: Wird das Tiefenwasser an die Meeresoberfläche gepumpt, sinkt es samt seiner Nährstoffe unter das wärmere und deshalb leichtere Oberflächenwasser – so lautete

zumindest die weitläufige Vorstellung bislang.

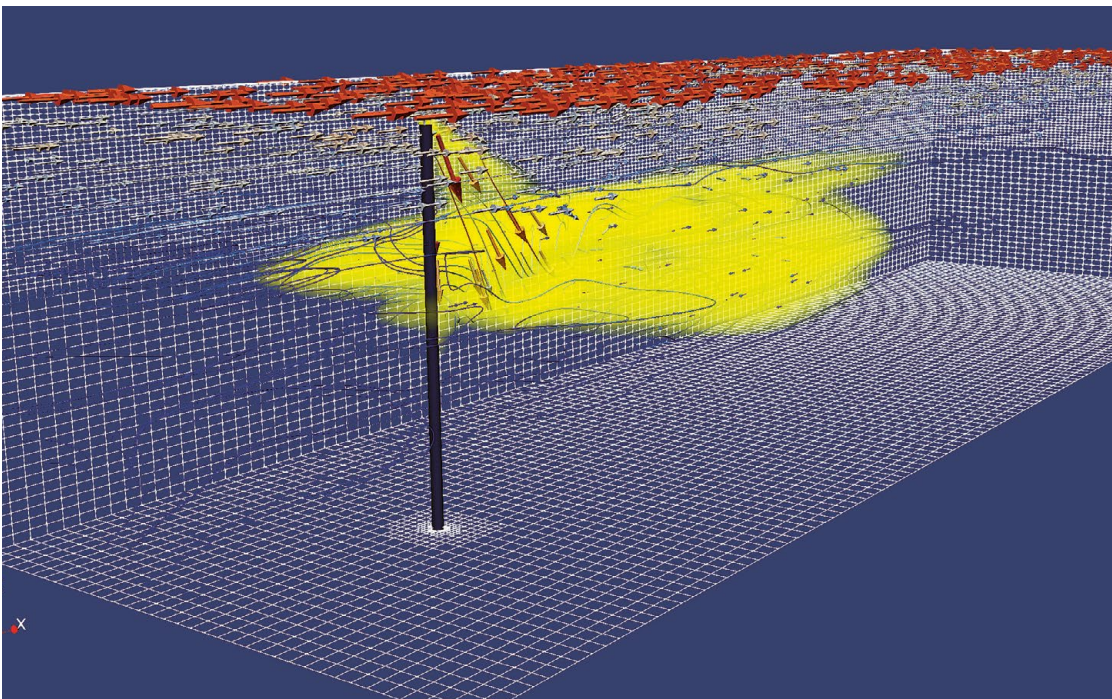
Im Forschungsverbund Test-ArtUp ist es Wissenschaftlern nun gelungen, mithilfe eines neuen Strömungsmodells das Verhalten des Tiefenwassers in neuer Detailtiefe zu simulieren. Demnach sinkt das von einer Propellerpumpe herauftransportierte kalte Wasser zwar wie erwartet ab. Es schiebt sich jedoch nicht weit unter das Oberflächenwasser. Stattdessen setzt es sich im unteren Teil der sogenannten Deckschicht fest. Deren Wassermassen werden von Wind, Wellen und Strömungen durchmischt, was bedeutet, dass sich mit der Zeit auch das Tiefenwasser verteilt. Die Forschenden vermuten deshalb, dass ein großer Anteil der hochgepumpten Nährstoffe in der ozeanischen Deckschicht verbleiben und den Algen für ihr Wachstum zur Verfügung stehen würde.

Nichtsdestotrotz haben die Forschenden überlegt, ob es einen Weg gäbe, die Temperatur des Tiefenwassers schon beim Heraufpumpen anzupassen, um ein Absinken der nährstoffreichen Wassermassen zu verhindern. Möglich wäre dies, wenn anstelle der Wellen- oder Propellerpumpen sogenannte Stommel-Pumpen zum Einsatz kämen. Diese werden vereinfacht gesagt durch Unter-



*Beim Testlauf der Wellenpumpe sollte ein ungiftiger, neongrüner Farbstoff anzeigen, wie sich das Tiefenwasser an der Meeresoberfläche verhält. Da die Pumpe nicht richtig funktionierte, konnten die Forschenden kaum nützliche Informationen von der Größe und Form der Farbwolke ableiten.*

*Foto: Michael Sswat*



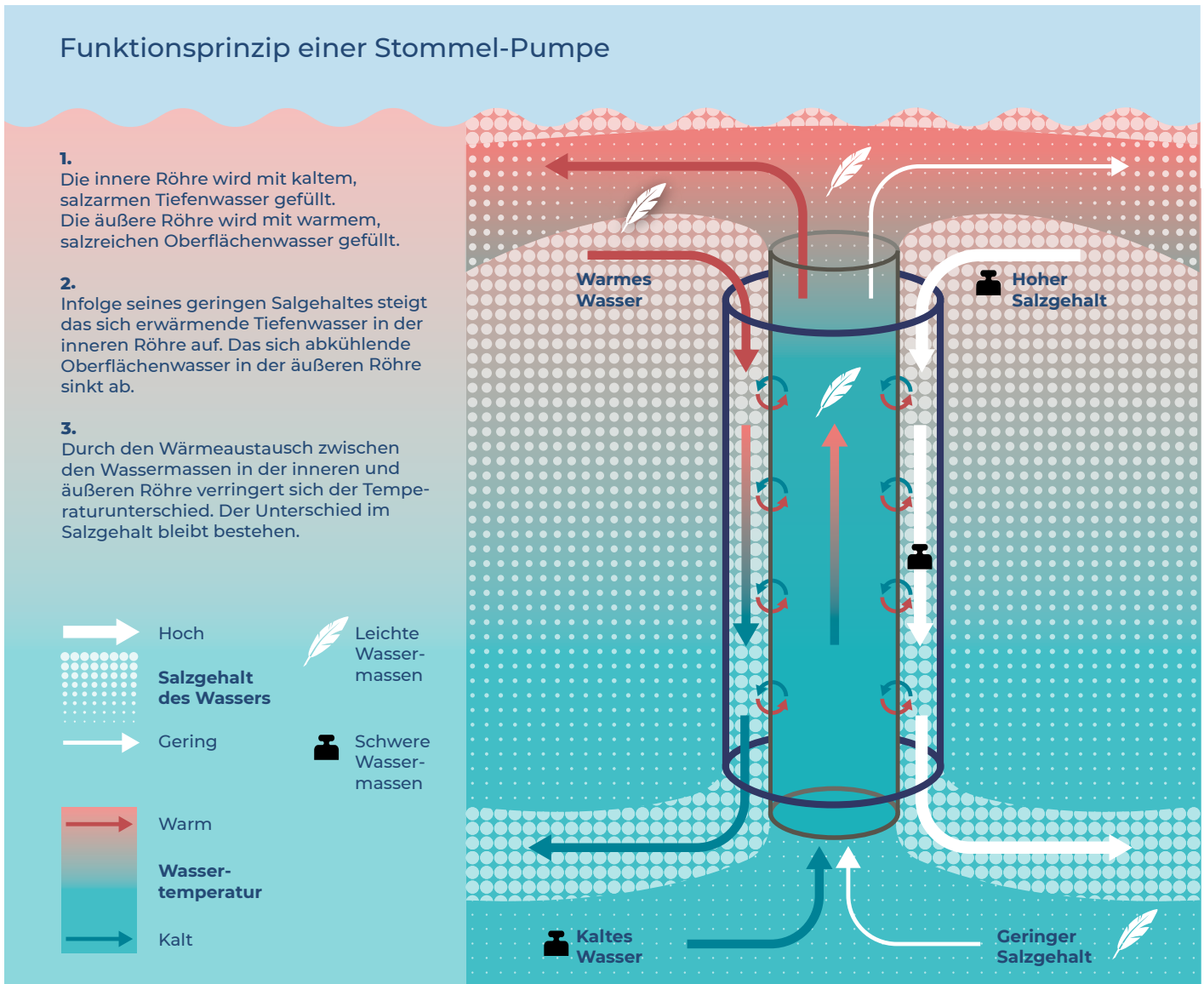
*Aussagekräftiger waren Simulationen in einem Strömungsmodell, deren grafische Darstellung zeigt, wie das kalte Tiefenwasser zunächst absinkt und sich dann am unteren Ende der Deckschicht verteilt.*

*Grafik: Jost Kemper, CAU*

schiede im Salzgehalt der Wassermassen und damit in ihrer Dichte angetrieben. Das Ganze funktioniert allerdings nur, wenn das Oberflächenwasser wärmer und salzhaltiger ist als das nährstoffreiche Tiefenwasser (siehe Abbildung auf Seite 10).

Würde man unter diesen Voraussetzungen einen langen Pumpenschlauch senkrecht in die Wassersäule stellen und von unten mit kaltem, salzarmen Tiefenwasser füllen, käme es aufgrund der nach oben hin steigenden Umgebungstemperatur zu einer schrittweisen Erwärmung des Tiefenwassers im Schlauch. Weil der Salzgehalt des Tiefenwassers gering ist, würde es im Zuge seiner Erwärmung allmählich im Schlauch aufsteigen. Infolge dieser Auftriebsströmung würde am unteren Ende des Schlauches automatisch neues Tiefenwasser einströmen, welches sich dann wieder erwärmen und ebenfalls aufsteigen würde. Das bedeutet, die Stommel-Pumpe würde ab diesem Punkt in einem selbst angetriebenen Dauermodus laufen.

Ein solches Pumpverfahren brächte drei entscheidende Vorteile mit sich: Erstens würde man abgesehen vom einmaligen Befüllen des Pumpschlauches keine von außen zugeführte Energie benötigen, um die Pumpe zu betreiben. Zweitens wären in einer Stommel-Pumpe nur wenige Technikteile verbaut, wodurch sie weniger störungsanfällig wäre als Wellen- oder Propellerpumpen. Drittens würde sich das Tiefenwasser beim Transport zur Meeresoberfläche erwärmen und nach dem Austritt aus dem Pumpschlauch nicht mehr absinken, sondern in das Oberflächenwasser eingemischt. Seine Nährstoffe stünden dann großflächig zur Verfügung und könnten das Algenwachstum antreiben.



Grafik: Rita Erven, CDRmare nach einer Vorlage von Jost Kemper, CAU

Das Antriebsprinzip einer Stommel-Pumpe: Ein Wärmeaustausch zwischen dem kalten salzarmen Tiefenwasser und dem warmen salzreichen Oberflächenwasser bewirkt, dass sich das Tiefenwasser nach einem kurzen Startimpuls quasi von allein erwärmt und im Innern der Pumpe aufsteigt, während sich das Oberflächenwasser abkühlt und im äußeren Schlauch der Pumpe in die Tiefe sinkt. Der Vorteil dieses Verfahrens: Das aufsteigende Tiefenwasser ist warm genug, um sich mit dem Oberflächenwasser zu vermischen. Ein Nachteil: Das Tiefenwasser ist bei diesem Pumpverfahren nicht in der Lage, die Meeresoberfläche und darüberliegende Luftschichten zu kühlen.

Es gäbe allerdings auch Nachteile: Das Tiefenwasser wäre beispielsweise nicht in der Lage, die Meeresoberfläche und darüberliegende Luftschichten abzukühlen. Daraus resultierende Klimateffekte blieben demzufolge aus. Außerdem steigt mit der Temperatur des Tiefenwassers die Wahrscheinlichkeit, dass an der Meeresoberfläche CO<sub>2</sub> aus dem gegebenenfalls CO<sub>2</sub>-reichen Tiefenwasser in die Atmosphäre entweicht und somit die CO<sub>2</sub>-Entnahmebilanz des Auftriebsprojektes negativ beeinflusst.

## Kernbotschaft 6

### **Je nachdem, ob und wo Verfahren des künstlichen Auftriebes eingesetzt werden sollten, gäbe es im Vorfeld viele Steuerungs- und Regulierungsfragen zu klären.**

Das betrifft insbesondere die rechtlichen Rahmenbedingungen. Verfahren des künstlichen Auftriebes sind wie die meisten marinen CO<sub>2</sub>-Entnahmetechniken dadurch gekennzeichnet, dass sie zwar einen Beitrag zur Eindämmung des Klimawandel leisten, gleichzeitig aber auch

negative Umweltauswirkungen nach sich ziehen können. Diese Folgen können grenzüberschreitend auftreten. Deshalb müssen marine CO<sub>2</sub>-Entnahmeverfahren, die außerhalb des Küstenmeeres eines Staates zum Einsatz kommen, den Anforderungen des See- und Umweltvölkerrechts gerecht werden.

Entscheidend sind auf internationaler Ebene zwei multilaterale Verträge: das Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen (Londoner Übereinkommen) und das zugehörige Protokoll aus dem Jahr 1996 (Londoner Protokoll). Letzteres wurde im Jahr 2013 durch Vorschriften zum marinen Geoengineering ergänzt, zu welchem überwiegend auch Verfahren des künstlichen Auftriebes gezählt werden. Allerdings sind die Vorschriften noch nicht in Kraft getreten, weil zu wenige Vertragsstaaten die Änderungen bislang ratifiziert haben. Zudem sind Verfahren des künstlichen Auftriebes noch nicht in Anlage IV zu den 2013 geänderten Vorschriften des Londoner Protokolls aufgenommen, was Voraussetzung für ihre Genehmigungsfähigkeit wäre.

Die Bundesrepublik Deutschland hat die Anforderungen der neuen Vorschriften des Londoner Protokolls trotzdem schon in innerstaatliches Recht umgesetzt, ja inhaltlich sogar (zulässigerweise) verschärft. Das Hohe-See-Einbringungsgesetz (HSEG)<sup>14</sup> und das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) wurden im Jahr 2018 entsprechend geändert. Insbesondere das HSEG in seiner aktuellen Form verbietet marine Negativemissionstechnologien, zu denen nach herrschender Ansicht auch Verfahren des künstlichen Auftriebes zählen, soweit ihr Einsatz zu Forschungszwecken nicht ausdrücklich erlaubt ist. Um dieses Verbot aufzuheben, müssten die CO<sub>2</sub>-Entnahmeverfahren in eine Anlage des HSEG aufgenommen werden. Dieser Schritt ist bislang nicht erfolgt.

Eine erneute Novelle des Hohe-See-Einbringungsgesetzes wurde im Jahr 2024 vorbereitet. Der Entwurf sah vor, den Katalog zulässiger Maßnahmen des marinen Geoengineerings zu erweitern, um weitere Potenziale zur Bindung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre erforschen und deren Auswirkungen auf die Umwelt bewerten zu können. Verfahren des künstlichen Auftriebes waren mit gelistet. Der Bruch der Ampelkoalition im November 2024 verhinderte dann jedoch, dass der Bundestag die Gesetzesnovelle noch vor den Neuwahlen im Februar 2025 verabschieden konnte. Das bedeutet, dass der Einsatz von Verfahren des künstlichen Auftriebes zur Steigerung der biologischen Kohlenstoffpumpe des Ozeans selbst für Forschungszwecke nach wie vor verboten ist (Stand Juni 2025).

## IMPRESSUM

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

Text: Sina Löschke, Malte Jürchott, Jost Kemper, Michael Sswat, Alexander Proelß und Ulf Riebesell // Redaktion und Kontakt: Sina Löschke (sloeschke@cdrmare.de) // Design: Rita Erven // GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel // Wischhofstr. 1 – 3 // 24148 Kiel // Juni 2025

### Diese CDRmare Insights sind folgendermaßen zu zitieren:

Löschke, S., Jürchott, M., Kemper, J., Sswat, M., Proelß, A. und Riebesell, U. (2025): CDRmare Insights: Die sechs wichtigsten Forschungsergebnisse zu Verfahren des künstlichen Auftriebes, pp. 1-12, DOI 10.3289/CDRmare.53



[test-artup.cdrmare.de](https://test-artup.cdrmare.de)



[cdrmare.bsky.social](https://cdrmare.bsky.social)



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



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



*Test-ArtUp – Künstlicher Ozeanauftrieb im Feldtest* ist ein Forschungsverbund im Rahmen der ersten Förderphase 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 Wechselwirkungen untersucht und in einem transdisziplinären Bewertungsrahmen zusammengeführt.