Die Katastrophe am Lake Nyos in Kamerun

Eine materialgebundene Aufgabe

M1 – Hintergrundinformationen

Der Lake Nyos ist ein See in Kamerun, der einen Vulkankrater ausfüllt, welcher in etwa 1100 m Höhe liegt. Der See ist etwa 200 m tief und weist zwei Besonderheiten auf: Am Grund des Kraters entweicht ständig CO_2 aus dem Boden und löst sich im Tiefenwasser des Sees. Das CO_2 ist vulkanischen Ursprungs und stammt aus einer Magmakammer unter dem See. Außerdem strahlt der Boden des Sees ständig Wärme ab, wodurch das Tiefenwasser geringfügig wärmer ist (ca. 25 °C) als das darüberliegende Wasser (ca. 23°C). Trotz der etwas höheren Temperatur hat das Tiefenwasser aufgrund der deutlich höheren Konzentrationen von CO_2 und von diversen gelösten Salzen, die bei der Zersetzung von abgesunkenem totem organischem Material entstehen, eine größere Dichte als das darüberliegende Wasser. Jahreszeitlich bedingte Temperaturveränderungen des Oberflächenwassers gibt es wegen des tropischen Klimas kaum.

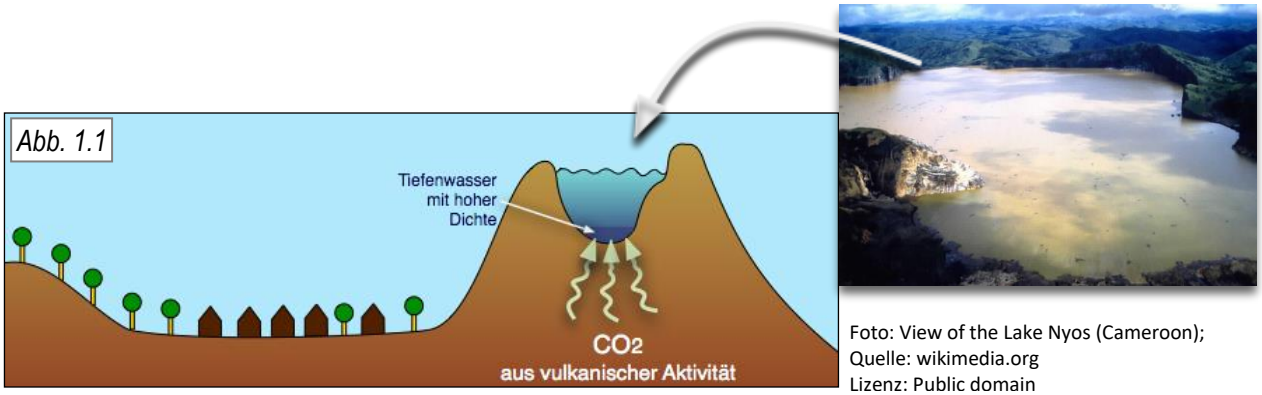


Foto: View of the Lake Nyos (Cameroon);
Quelle: wikimedia.org
Lizenz: Public domain

Im August 1986 ereignete sich das sogenannte Lake Nyos-Desaster. Die meisten Geologen sehen als Ursache einen Erdrutsch im Seekrater an (s. **Abb. 1.2**), der dazu führte, dass durch die herabrauschenden Erdmassen das CO_2-reiche Tiefenwasser aufgewirbelt wurde und dabei plötzlich in die darüberliegenden Wasserschichten gedrückt wurde. Durch diese Wasserbewegung wurde eine Kettenreaktion ausgelöst, die letztendlich dazu führte, dass eine riesige, etwa 50 m hohe „CO_2-Welle“ (etwa 1,7 Millionen Tonnen CO_2) aus dem See freigesetzt wurde, die sich in die nordwestlich und östlich unterhalb des Kraterberges liegenden Täler ausbreitete. Diese CO_2-Wolke tötete alle Menschen und Tiere, die sich dort aufhielten. Insgesamt fanden dabei u.a. 1746 Menschen den Tod.

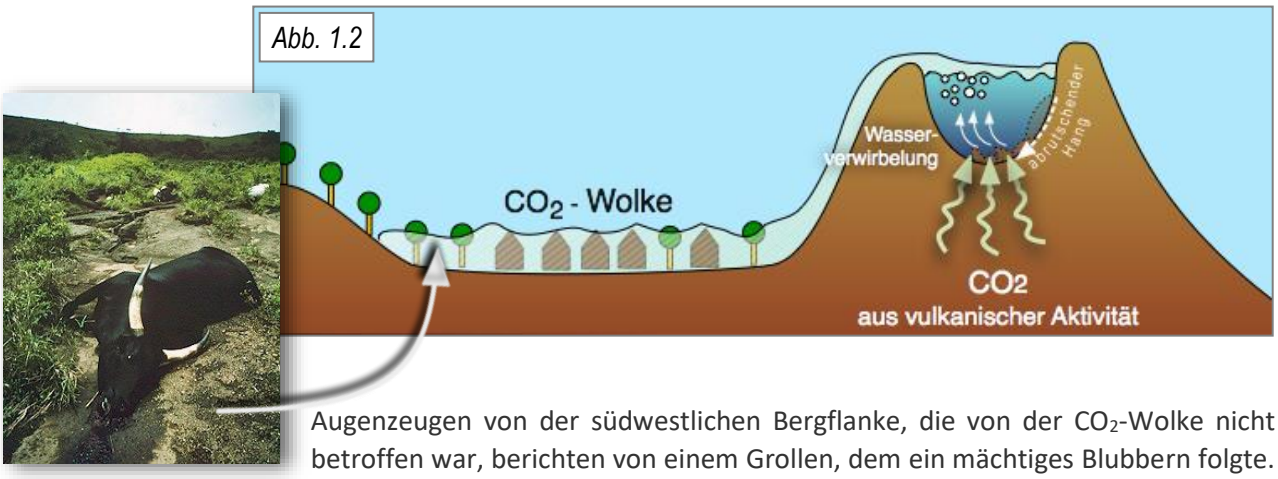


Foto: Jack Lockwood of the US Geological Survey;
Quelle: wikimedia.org
Lizenz: Public domain

Augenzeugen von der südwestlichen Bergflanke, die von der CO_2-Wolke nicht betroffen war, berichten von einem Grollen, dem ein mächtiges Blubbern folgte. Die Menschen kamen aus ihren Hütten gerannt und sahen eine riesige Fontäne und eine gigantische weiße Wolke, die sich aus dem Lake Nyos erhob. Das Oberflächenwasser zeigte noch Tage danach eine auffallend bräunliche Färbung.

Andreas Böhm im Team LNCU für Sinus/QUA-LiS NRW, 2019. Alle Materialien und Abbildungen, sofern nicht anders gekennzeichnet, unter CC-BY-SA.

M2 – Überwachung der CO_2-Konzentration in verschiedenen Wassertiefen des Lake Nyos

Seit der Katastrophe vom August 1986 wird der Nyos See aufmerksam beobachtet, unter anderem wird der CO_2-Gehalt in verschiedenen Wassertiefen regelmäßig kontrolliert.

Die unterschiedlichen Druck- und Konzentrationsverhältnisse, die auf die im Wasser des Lake Nyos befindlichen CO_2-Mengen von entscheidender Bedeutung sind, sind in **Abb. 2.1** veranschaulicht. Temperatur- und pH-Wert-Differenzen können vernachlässigt werden.

Abb. 2.1

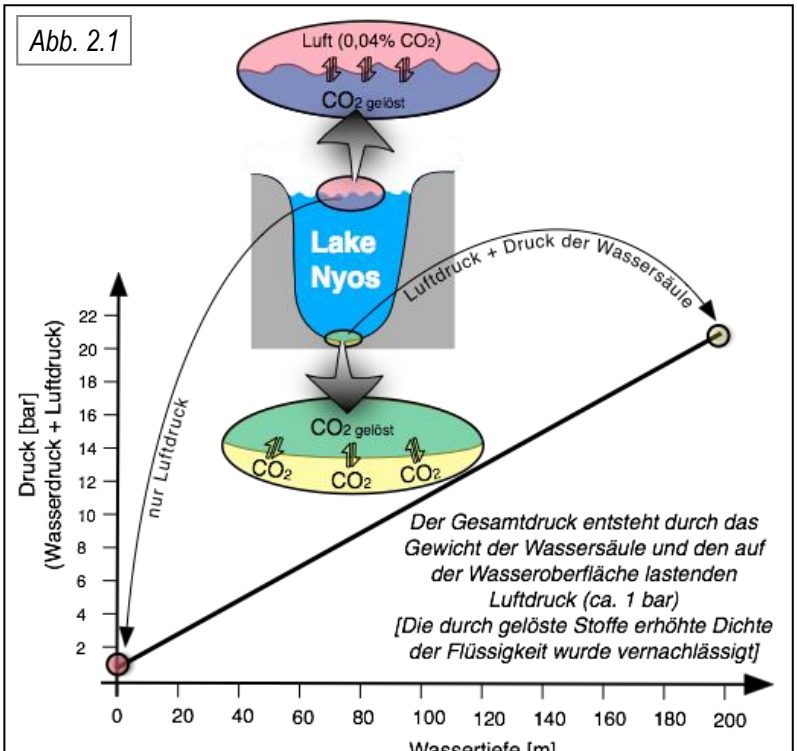
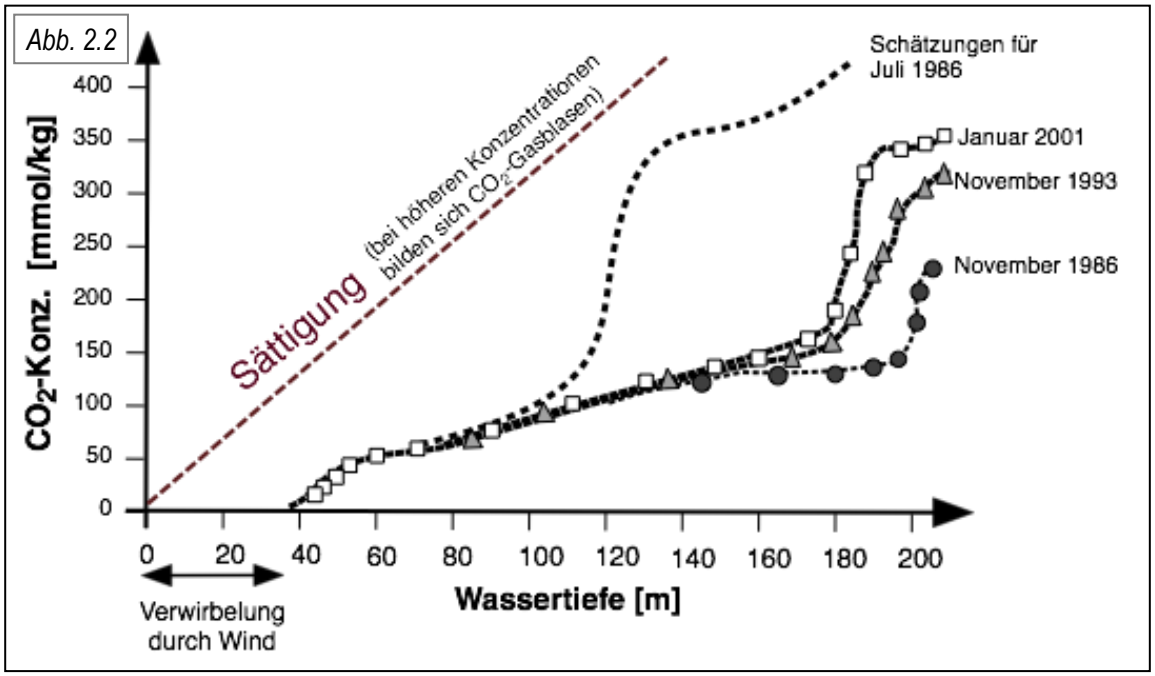


Abb: Eigene Darstellung (Böhm)

Die Ergebnisse der Messungen des CO_2-Gehalts vom November 1986, November 1993 und Januar 2001 sind in **Abb. 2.2** graphisch dargestellt. Die Graphik gibt außerdem Auskunft darüber, wieviel CO_2 sich in den verschiedenen Wassertiefen maximal lösen kann („Sättigungslinie“) und welche Konzentrationen für den Sommer 1986 vor der Eruption vermutet werden.

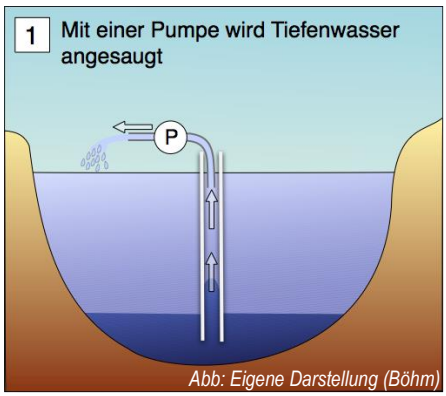
Abb. 2.2



Andreas Böhm im Team LNCU für Sinus/QUA-LiS NRW, 2019. Alle Materialien und Abbildungen, sofern nicht anders gekennzeichnet, unter CC-BY-SA.

M3 – Entgasung des Tiefenwassers im Lake Nyos

Seit dem Frühjahr 2001 wird das Tiefenwasser des Lake Nyos permanent entgast. Die Funktionsweise der Entgasungsanlage zeigt **Abb. 3.1**. Zunächst wurde Tiefenwasser mit Hilfe einer Saugpumpe (P) durch ein Rohr nach oben gesaugt (1). Während der Bewegung nach oben begann das Wasser von selbst unter Gasblasenbildung nach oben zu schießen (2). Die Pumpe wurde dann nicht mehr benötigt.



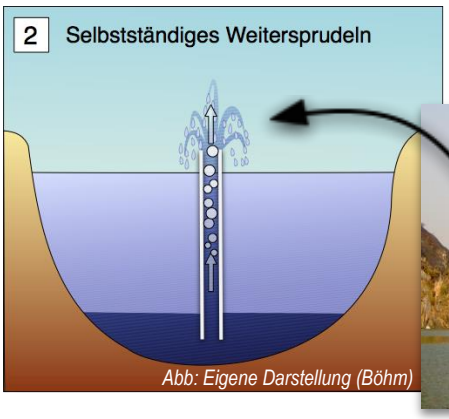


Abb. 3.1

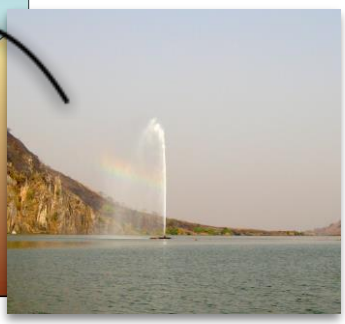


Foto: Bill Evans, USGS; Quelle: Wikimedia.org Lizenz: Public domain

Die im Tiefenwasser gemessenen CO_2-Konzentrationen von 1992 bis 2004 zeigt Tabelle 3.1. (Das Entgasungsrohr reicht bis in eine Tiefe von 203 m.) Anmerkung: Die Intensität des CO_2-Austritts aus dem Seeboden ist nicht konstant und kann stark schwanken.

Tab. 3.1

Datum der Messung	**CO_2-Konzentrationen [in mmol/kg] in den Tiefen…**		
	182,9 m	**198,2 m**	**205,8 m**
April 1992	154,6	288,6	317,133
Mai 1998	173,3	340,5	349,0
November 1999	210,6	341,6	338,3
Januar 2001	250,4	375,5	300,5
Beginn der Entgasungsmaßnahme: Ende März 2001 → Oktober 2001	205,1	350,1	351,5
Januar 2003	181,1	keine Messung	354,8
Januar 2004	166,2	353,7	363,8

Aufgaben

1. **a)** Erläutern Sie, welche Faktoren die Löslichkeit von CO_2 in Wasser beeinflussen und inwiefern sich Oberflächenwasser und Tiefenwasser des Lake Nyos gravierend unterscheiden (Abb. 2.1).

   b) Erklären Sie den Verlauf der „Sättigungslinie“ in Abb. 2.2.

2. Erklären Sie, welche Prozesse nach dem Erdrutsch im August 1986 im Lake Nyos abliefen (die in M1 angesprochene Kettenreaktion) und zur Katastrophe führten. Stellen Sie dabei die Kausalitäten klar heraus und binden Sie die Daten aus M2 in ihrer Argumentation mit ein. Bringen Sie die einzelnen Prozesse mit den entsprechenden Beobachtungen der Augenzeugen in Zusammenhang.

3. Erläutern Sie die Ursachen der Veränderungen der CO_2-Konz. von Nov. 86 bis Jan. 2001.

4. Erklären Sie die Funktionsweise der Entgasungsanlage (M3). Gehen Sie dabei auch darauf ein, weshalb das Wasser von selbst weitersprudelt! Beurteilen Sie mithilfe von Tab. 3.1 den Erfolg der Entgasungsmaßnahme.

Andreas Böhm im Team LNCU für Sinus/QUA-LiS NRW, 2019. Alle Materialien und Abbildungen, sofern nicht anders gekennzeichnet, unter CC-BY-SA.

Aufgaben

1. **a)** Erläutern Sie, welche Faktoren die Löslichkeit von CO_2 in Wasser beeinflussen und inwiefern sich Oberflächenwasser und Tiefenwasser des Lake Nyos gravierend unterscheiden (Abb. 2.1).

$$CO_{2(g)} \overset{H_2O}{\leftrightarrows} CO_{2(aq)} \,|exotherm$$

$$CO_{2(aq)} + H_2O_{(l)} \leftrightarrows H_2CO_{3(aq)}$$

$$H_2CO_{3(aq)} + H_2O_{(l)} \leftrightarrows HCO_3^-{}_{(aq)} + H_3O^+{}_{(aq)}$$

Beeinflussung der Löslichkeit von CO_2 durch:

Temperaturänderungen: Für die Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit ist die erste aufgeführte Reaktion relevant, da diese exotherm ist. Eine Erhöhung der Temperatur führt nach dem Prinzip von Le Chatelier zu einer Begünstigung der endothermen Teilreaktion, also der Rückreaktion. Das Gleichgewicht verschiebt sich somit auf die Eduktseite und damit auf die Seite des gasförmigen Kohlendioxids; es löst sich also weniger CO_2 im Wasser.

Änderungen der CO_2-Konzentration der Gasphase: *Je höher die CO_2-Konzentration der Gasphase, desto stärker verschiebt sich das erste Gleichgewicht auf die Produktseite, es löst sich also mehr CO_2 im Wasser.*

Änderungen des Drucks: Für die Druckabhängigkeit der Löslichkeit ist ebenfalls die erste aufgeführte Reaktion relevant, da sich beim Ablauf dieser Reaktion die Anzahl der gasförmigen Teilchen ändert. Nach dem Prinzip von Le Chatelier wird bei einer Erhöhung des Drucks das Gleichgewicht auf die Seite mit weniger gasförmigen Teilchen - im diesem Falle auf die Produktseite - verschoben. Die Löslichkeit nimmt mit steigendem Druck also zu.

Änderungen des pH-Wertes: Für die pH-Abhängigkeit ist die dritte aufgeführte Reaktion relevant. Je niedriger der pH-Wert, desto größer die Konz. der H_3O^+-Ionen, desto stärker wird das 3. Gleichgewicht auf die Eduktseite verschoben. Als Folge werden auch das zweite und erste Gleichgewicht auf die Eduktseite verschoben, so dass also die Löslichkeit von CO_2 in einer wässrigen Lösung mit sinkendem pH-Wert abnimmt.

Unterschiede zwischen Tiefenwasser und Oberflächenwasser

Oberflächenwasser	Tiefenwasser
Oberflächenwasser ist nur dem Luftdruck ausgesetzt (1013 mbar = ca. 1 bar)	Auf dem Tiefenwasser lastet der Luftdruck und der Druck der darüberliegenden Wassersäule. In 200 m Tiefe sind das ca. 21 bar.
Das Oberflächenwasser steht in Kontakt mit der Luft; der CO_2-Anteil beträgt etwa 0,04 %	Das Tiefenwasser steht in Kontakt mit reinem CO_2, welches aus dem Boden entweicht.

b) Erklären Sie den Verlauf der „Sättigungslinie“ in Abb. 2.2.

Die Sättigungskonzentration steigt mit zunehmender Wassertiefe proportional zur Tiefe kontinuierlich an: An der Wasseroberfläche beträgt die Sättigungskonzentration knapp über 0 mmol/kg, in 130 m Tiefe beträgt die Sättigungskonzentration schon etwa 400 mmol/kg. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmender Wassertiefe auch der Druck kontinuierlich zunimmt. Dies ist in Abb. 2.1 dargestellt. Da durch den steigenden Druck die Löslichkeit zunimmt (Aufgabenteil a), nimmt die auch die Sättigungskonzentration (entspricht der Löslichkeit) zu.

Andreas Böhm im Team LNCU für Sinus/QUA-LiS NRW, 2019. Alle Materialien und Abbildungen, sofern nicht anders gekennzeichnet, unter CC-BY-SA.

2. Erklären Sie, welche Prozesse nach dem Erdrutsch im August 1986 im Lake Nyos abliefen (die in M1 angesprochene Kettenreaktion) und zur Katastrophe führten. Stellen Sie dabei die Kausalitäten klar heraus und binden Sie die Daten aus M2 in ihrer Argumentation mit ein. Bringen Sie die einzelnen Prozesse mit den entsprechenden Beobachtungen der Augenzeugen in Zusammenhang.

Durch das Erdbeben löst sich ein Teil der Kraterwand und rutscht nach unten. Dadurch wird das dort befindliche Wasser, in dem zu diesem Zeitpunkt sehr viel CO_2 gelöst ist (schon in 130 m Tiefe etwa 350 mmol/kg), verdrängt und nach oben beschleunigt. Das dem abrutschenden Hang gegenüberliegende Wasser wird somit nach oben gedrückt wird. Das von Augenzeugen erwähnte Grollen dürfte auf das Erdbeben bzw. den Erdrutsch im Kratersee zurückzuführen sein. Gelangt dieses Wasser weiter nach oben, so ist einem kleineren Druck ausgesetzt. Die Löslichkeit von CO_2 nimmt somit ab, da das Lösungsgleichgewicht weiter auf die Eduktseite verschoben wird. Im August 1986 wurde das Wasser so weit nach oben gedrückt, dass es in der geringeren Wassertiefe übersättigt war, so dass CO2 Gasblasen im Wasser bildete. Diese Gasblasen stiegen auf (geringere Dichte als Wasser) Dadurch entstanden weitere Wasserverwirbelungen, durch die Tiefenwasser in der Umgebung der Gasblasen mit nach oben gezogen wird. Somit wurde weiteres Tiefenwasser geringerem Druck ausgesetzt, so dass sich die beschriebenen Vorgänge in diesem Wasser wiederholten. Die sich nach oben bewegenden Gasblasen dürften das mächtige Blubbern erklären, von de Augenzeugen berichteten. [Zusatzaspekt: Gasblasen werden auf dem Weg nach oben größer, da sie sich wegen des immer kleiner werdenden Drucks ausdehnen können] Insgesamt kam es damit zu riesigen Mengen CO_2, die sich in Form von Gasblasen plötzlich nach oben bewegten und dabei auch viel Wasser vor sich her drückten. Dadurch sind auch die gewaltige Fontäne und die weiße Wolke (zerstäubtes Wasser) zu erklären, die bei Austreten des Gases zu beobachten waren. Da reines Kohlendioxid eine größere Dichte als Luft hat, steigt es nicht nach oben, sondern sammelt sich auf dem Boden. Daher floss eine riesige CO_2-Wolke den Berghang hinunter und verdrängte die dort befindliche Luft. Die bräunliche Farbe des Wassers ist vermutlich damit zu erklären, dass bei den Wasserverwirbelungen auch Schlamm mit nach oben transportiert wurde, der sich erst allmählich wieder am Seeboden absetzt.

3. Erläutern Sie die Ursachen der Veränderungen der CO_2-Konz. von Nov. 86 bis Jan. 2001.

Beschreibung:

Im November 1986, also 3 Monate nach der Katastrophe, waren in den obersten 40 m des Wasserkörpers keine nennenswerten Mengen CO_2 enthalten. Ab 40 m Tiefe steigt die CO_2-Konzentration kontinuierlich an bis auf einen Wert von etwa 125 mmol/kg in 150 m Tiefe. Eine weitere deutliche Konzentrationszunahme ist erst ab einer Tiefe von ca. 190-200 m bis zum weniger Meter tiefere liegenden Seeboden zu verzeichnen: Hier steigt die Konzentration bis zum Boden des Sees (ca. 210 m) auf etwa 210 mmol/kg an. Die Messwerte vom Nov. 1993 und vom Januar 2001 waren bis etwa 150 m Tiefe unverändert. Im Tiefenwasser jedoch waren zwei signifikante Veränderungen zu beobachten: a) die CO_2-Konzentration in der Nähe des Seebodens war deutlich gestiegen: Im November 1993 betrugt sie etwa 300 mmol/kg, im Januar 2001 ca. 350 mmol/kg. b) Der Bereich der deutlich erhöhen CO_2-Konzentration dehnte sich weiter nach oben aus: Während es im Nov. 86 nur die tiefsten 10 m des Wasserkörpers waren, umfasste der Bereich im Nov. 1993 schon die letzten 20 m über dem Seeboden, im Januar 2001 sogar schon die letzten 30 m über dem Seeboden.

Erklärung:

Das Wasser der obersten 40 m wird durch Wind ständig bewegt und steht dadurch im Austausch mit der Luft. Wegen des geringen CO_2-Gehalts der Luft (0,04 %) und des geringen Drucks (1 bar) löst sich dementsprechend nur wenig CO_2 im Wasser, da das Lösungsgleichgewicht unter diesen Bedingungen kaum auf die Produktseite verschoben werden kann. Mit weiter zunehmender Wassertiefe spielt der Austausch mit der Luft eine immer kleinere Rolle, CO_2, das im Wasser vorliegt, kann daher nicht an die

Andreas Böhm im Team LNCU für Sinus/QUA-LiS NRW, 2019. Alle Materialien und Abbildungen, sofern nicht anders gekennzeichnet, unter CC-BY-SA.

Luft abgegeben werden. Das Kohlendioxid könnte zum einen von Organismen im See stammen, die dies freigesetzt haben (bei Abbau von totem org. Material) oder aber von der Katastrophe im August 1986, als CO_2-Blasen aufstiegen, noch im Wasser vorhanden sein. Die deutlich höhere Konz. von CO_2 im Tiefenwasser ist auf das CO_2 zurückzuführen, das aus dem Boden ins Wasser diffundiert. Da das Wasser sich kaum bewegt und einen etwas höhere Dichte aufweist, vermischt es sich auch kaum mit dem darüberliegenden Wasser. Lediglich Diffusionsprozesse bewirken eine gewisse Verteilung, die aber lange Zeiträume voraussetzen. Da das CO_2 ständig aus dem Boden entweicht, steigt die CO_2-Konz. In Bodennähe im Verlaufe der Jahre (1986 bis 2001) ständig an, außerdem verteilt sich das Kohlendioxid auch in immer höher liegenden Wasserschichten.

4. Erklären Sie die Funktionsweise der Entgasungsanlage (M3). Gehen Sie dabei auch darauf ein, weshalb das Wasser von selbst weitersprudelt! Beurteilen Sie mithilfe von Tab. 3.1 den Erfolg der Entgasungsmaßnahme.

Durch das anfängliche Ansaugen von Tiefenwasser gelangt wird der Druck an der Saugestelle erniedrigt; außerdem gelangt das Wasser in geringere Höhen, auch dadurch wird der Druck erniedrigt. Dadurch entstehen Gasblasen im Wasser, da - wie während des Lake-Nyos-Desasters - die Löslichkeit von CO_2 während des Aufsteigens des Wassers überschritten wird. Diese Gasblasen steigen nach oben auch und dehnen sich dabei weiter aus und drücken auch Wasser vor sich her. Von unten wird dadurch Wasser nachgesaugt, so dass von selbst ein Sog entsteht. Im nachgesaugten Wasser bilden sich wieder Gasblasen etc., die Prozesse wiederholen sich.

Beurteilung:

Den deutlichsten positiven Effekt der Entgasungsmaßnahme sieht man bei den Messwerten in 182,9 m Tiefe: Bis Januar 2001 stiegen die CO2-Konzentrationen ständig. Danach sanken sie kontinuierlich, insofern funktioniert die Maßnahme. In einer Tiefe von 205, 8 m, also 2,8 m unter der Ansaugöffnung des Rohrs, ist dieser Effekt nicht zu beobachten. Das tiefer liegende Wasser wird also vom Rohr nicht erfasst und auch nicht oder kaum in Bewegung gebracht. Die CO2-Konz. des tiefsten Wassers steigt seit Beginn der Entgasungsmaßnahme durch das aus dem Boden austretende CO_2 an. Die abnehmenden CO_2-Konzentrationen von 1998 bis 2001 könnten darauf zurückzuführen sein, dass in dieser Zeit nur wenig CO_2 aus dem Boden austrat und das schon gelöste CO_2 sich im Wasser verteilte (in den darüberliegenden Schichten stieg die Konzentration ja noch an) In einer Tiefe von 198,2 m ist zunächst (bis Oktober 2001) eine Abnahme der CO_2-Konzentration zu beobachten; danach steigt sie jedoch wieder ein wenig an, dies dürfte auf das CO_2 zurückführen sein, das von unten nachdiffundiert. Gesamtfazit: Das unten abgesaugte Wasser strömt von oben nach. D.h. das an und über der Ansaugöffnung befindliche CO_2-reiche Wasser wird durch Wasser ersetzt, das vorher höher lag und CO_2-ärmer war. Insofern ist die Maßnahme erfolgreich. Gleichzeitig diffundiert aber wieder CO_2 aus den unteren Schichten nach. Die Tatsache, dass selbst oberhalb der Ansaugöffnung (198,2 m) die CO_2-Konzentration zumindest zeitweise wieder zunimmt, zeigt, dass die Maßnahme möglicherweise nicht ausreicht, um eine Anreicherung des Tiefenwassers mit CO_2 komplett zu verhindern. In jedem Falle wird aber die Menge an gelöstem CO_2 reduziert und ist insofern in jedem Falle erfolgreich.

Andreas Böhm im Team LNCU für Sinus/QUA-LiS NRW, 2019. Alle Materialien und Abbildungen, sofern nicht anders gekennzeichnet, unter CC-BY-SA.