

Musterlösung zur Aufgabe:
Die Katastrophe am Lake Nyos in Kamerun



1. (a) Erläutern Sie, welche Faktoren die Löslichkeit von CO₂ in Wasser beeinflussen und inwiefern sich Oberflächenwasser und Tiefenwasser des Lake Nyos in unter diesem Blickwinkel gravierend unterscheiden (**Abb. 2.1**).

Beim Lösen von CO₂ in Wasser laufend folgende Reaktionen ab:



Beeinflussung der Löslichkeit von CO₂ 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 CO₂ im Wasser.
- *Änderungen der CO₂-Konzentration der Gasphase:*
 Je höher die CO₂-Konzentration der Gasphase, desto stärker verschiebt sich das erste Gleichgewicht auf die Produktseite, es löst sich also mehr CO₂ 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 H₃O⁺-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 CO₂ in einer wässrigen Lösung mit sinkendem pH-wert abnimmt.

Unterschiede zwischen Tiefenwasser und im Oberflächenwasser:

Oberflächenwasser	Tiefenwasser
Oberflächenwasser ist nur dem Luftdruck ausgesetzt (1013 mbar ≈ 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 Luft; der CO ₂ -Anteil beträgt etwa 0,04%	Das Tiefenwasser steht in Kontakt mit reinem CO ₂ , welches aus dem Boden entweicht.

Musterlösung zur Aufgabe: **Die Katastrophe am Lake Nyos in Kamerun**

(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.

2. Beschreiben und erklären Sie die in **Abb. 2.2** dargestellten Messergebnisse für Nov. 86, Nov. 93 und Jan. 2001.

Beschreibung:

Im November 1986, also 3 Monate nach der Katastrophe, waren in den obersten 40 m des Wasserkörpers keine nennenswerten Mengen CO₂ enthalten.

Ab 40 m Tiefe steigt die CO₂-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 CO₂-Konzentration in der Nähe des Seebodens war deutlich gestiegen: Im November 1993 betrug sie etwa 300 mmol/kg, im Januar 2001 ca. 350 mmol/kg.
- b) Der Bereich der deutlich erhöhten CO₂-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 CO₂-Gehalts der Luft (0,04%) und des geringen Drucks (1 bar) löst sich dementsprechend nur wenig CO₂ 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, CO₂, das im Wasser vorliegt, kann daher nicht an die 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 CO₂-Blasen aufstiegen, noch im Wasser vorhanden sein.
- Die deutlich höhere Konz. von CO₂ im Tiefenwasser ist auf das CO₂ zurückzuführen, das aus dem Boden ins Wasser diffundiert. Da 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 CO₂ ständig aus dem Boden entweicht, steigt die CO₂-Konz. in Bodennähe im Verlaufe der Jahre (1986 bis 2001) ständig an, außerdem verteilt sich das Kohlendioxid auch in immer höher liegenden Wasserschichten.

Musterlösung zur Aufgabe:

Die Katastrophe am Lake Nyos in Kamerun

3. Erklären Sie, welche Prozesse nach dem Erdbeben 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 CO₂ 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.
 - Das von Augenzeugen erwähnte Grollen dürfte auf das Erdbeben bzw. den Erdbeben im Kratersee zurückzuführen sein.
 - Gelangt dieses Wasser weiter nach oben, so ist einem kleineren Druck ausgesetzt. Die Löslichkeit von CO₂ 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 dem 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 CO₂, die sich in Form von Gasblasen plötzlich nach oben bewegten und dabei auch viel Wasser vor sich her drückten.
 - Dadurch ist auch die gewaltige Fontäne und die weiße Woke (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 CO₂-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.
4. Erklären Sie die Funktionsweise der Entgasungsanlage (**M3**) - wieso sprudelt das Wasser von selbst weiter?
- Durch das anfängliche Ansaugen von Tiefenwasser gelangt wird der Druck an der Saugstelle 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 CO₂ 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.

Musterlösung zur Aufgabe:

Die Katastrophe am Lake Nyos in Kamerun

5. Beurteilen Sie den Erfolg der Entgasungsmaßnahme (**M3**).
 - 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 CO₂ an.
 - Die abnehmenden CO₂-Konzentrationen von 1998 bis 2001 könnten darauf zurückzuführen sein, dass in dieser Zeit nur wenig CO₂ aus dem Boden austrat und das schon gelöste CO₂ 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 CO₂-Konzentration zu beobachten; danach steigt sie jedoch wieder ein wenig an, dies dürfte auf das CO₂ zurückzuführen sein, das von unten nachdiffundiert.
 - Gesamtfazit:
 - Das unten abgesaugte Wasser strömt von oben nach. D.h. das an und über der Ansaugöffnung befindliche CO₂-reiche Wasser wird durch Wasser ersetzt, das vorher höher lag und CO₂-ärmer war. Insofern ist die Maßnahme erfolgreich.
 - Gleichzeitig diffundiert aber wieder CO₂ aus den unteren Schichten nach. Die Tatsache, dass selbst oberhalb der Ansaugöffnung (198,2 m) die CO₂-Konzentration zumindest zeitweise wieder zunimmt, zeigt, dass die Maßnahme möglicherweise nicht ausreicht, um eine Anreicherung des Tiefenwassers mit CO₂ komplett zu verhindern. In jedem Falle wird aber die Menge an gelöstem CO₂ reduziert und ist insofern in jedem Falle erfolgreich.

6. Beschreiben Sie die Beobachtungen beim Modellversuch zum Lake Nyos-Desaster (**M4**) und erklären Sie diese. Stellen Sie die Analogien zur Lake Nyos-Katastrophe heraus.