

Aufgabe 1: Beschreiben Sie unter Verwendung von M3 den Einfluss von Druck und Temperatur auf die Löslichkeit von CO₂ und erklären Sie diesen mit Hilfe des Prinzips von Le Chatelier.

Abb. 3.1 zeigt die Löslichkeit von CO₂ in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen CO₂-Partialdrücken. Prinzipiell ist zu erkennen, dass die Löslichkeit

- mit steigender Temperatur abnimmt und
- mit abnehmendem CO₂-Partialdruck abnimmt.

Beide Abhängigkeiten lassen sich mit dem Prinzip von Le Chatelier erklären; die beim Lösen von CO₂ in Wasser ablaufenden Reaktionen sind:



Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit:

- 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.

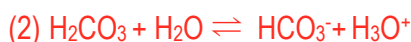
Abhängigkeit der Löslichkeit vom CO₂-Partialdruck:

- 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.
- Alternative Argumentation: Ein erhöhter CO₂-Partialdruck entspricht einer höheren Konz. an CO₂-Molekülen in der Gasphase; in diesem Falle würde dies einer Erhöhung der Edukt-Konzentration entsprechen, wodurch die Hinreaktion wahrscheinlicher würde. Die Löslichkeit würde also zunehmen.

Aufgabe 2: Beschreiben und erklären Sie die in Abb. 4.1 zu erkennende Gesetzmäßigkeit. Formulieren Sie hierfür auch die notwendigen Reaktionsgleichungen.

Das Diagramm zeigt, dass die Ca²⁺-Ionen-Konzentration der wässrigen Lösung zunimmt, wenn der CO₂-Gehalt der Lösung zunimmt.

Die zugrunde liegenden Reaktionsgleichungen lauten:



Erklärung der abgeleiteten Gesetzmäßigkeit:

- Je höher die Konzentration an CO_2 in der Lösung, desto größer die Wahrscheinlichkeit für die Hinreaktion von Gleichgewicht (1), so dass die Wahrscheinlichkeit für die Bildung von H_2CO_3 steigt.
- Dadurch wird auch Gleichgewicht (2) beeinflusst, da auch die Wahrscheinlichkeit für die Hinreaktion steigt, so dass die H_3O^+ -Konzentration zunimmt.
- Durch die erhöhte H_3O^+ -Konzentration wiederum wird Gleichgewicht (3) beeinflusst, da auch die Wahrscheinlichkeit für die Hinreaktion zunimmt.
- Da bei dieser Reaktion u.a. Ca^{2+} -Ionen freigesetzt werden, erklärt dies die zunehmende Ca^{2+} -Ionen-Konz. der Lösung.

Aufgabe 3: Erklären Sie die in Tab. 2.1 aufgeführten Messwerte mithilfe von Abb. 1.3, M3 und M4.

Temperatur:

- Die relativ hohe Temperatur des Quellwassers ist mit der Erwärmung des Wassers durch die Magmakammer zu erklären.

CO_2 -Konzentration:

- Die sehr hohe Konzentration von CO_2 im Quellwasser ist zum einen darauf zurückzuführen, dass das versickernde Wasser durch den ohnehin hohen CO_2 -Gehalt der Bodenluft mit CO_2 angereichert wird.
- Den größten Effekt wird allerdings die CO_2 -Freisetzung der Magmakammer haben. Das Wasser kommt hier mit reinem CO_2 in Kontakt, das außerdem in tiefen Gesteinsschichten unter Druck steht und nach oben gepresst wird. Der Partialdruck des Kohlendioxids müsste somit sehr hoch sein.
- Dadurch wird (wie in Aufgabe 1 erklärt wurde) die Löslichkeit von CO_2 stark erhöht.
- Zusätzliche quantitative Betrachtung: Bei der im Tiefenwasser vorliegenden Temperatur von 78°C wäre das Wasser bei einem CO_2 -Druck von 1013 mbar mit einer CO_2 -Konz. unter 400 mg/L schon gesättigt. Die vorliegende Konz. von 400 mg/L lässt daher auf einen noch höheren CO_2 -Partialdruck als 1013 mbar schließen.

pH-Wert:

- Der anfängliche pH-Wert von Durch das im Wasser gelöste CO_2 bildet sich Kohlensäure, wodurch der pH-Wert kleiner als 7 ist.

Ca^{2+} - und HCO_3^- - Konz.:

- Das CO_2 -reiche Wasser zirkuliert, bevor es zur Erdoberfläche gedrückt wird, durch Kalkgestein. Hierbei laufen die in Aufgabe 2 beschriebenen Reaktionen ab, bei denen Kalk angegriffen wird und sowohl Ca^{2+} - Ionen als auch HCO_3^- - Ionen freigesetzt werden.
- Die extrem hohen Konzentrationen lassen sich damit erklären, dass
 - ✦ die CO_2 -Konzentration des Wassers extrem hoch ist, wodurch die Gleichgewichte, die zum Abbau des Kalkgesteins führen, weit auf die Produktseite verschoben werden.
 - ✦ das Wasser relativ lange mit dem Kalkgestein in Kontakt ist, da es durch das Gestein zirkuliert. Hierdurch steht ausreichend Zeit für die Reaktionen zur Verfügung, so dass sich die Gleichgewichte auch einstellen können.
 - ✦ das Wasser eine hohe Temperatur hat und somit die Geschwindigkeit, mit der die Reaktionen ablaufen und sich die Gleichgewichte einstellen, hoch ist.

Aufgabe 4: Erläutern Sie die Entstehung des Kalks auf den Kalkterrassen von Pamukkale, indem Sie die in Abb. 2.2 dargestellten Messergebnisse beschreiben und erklären. Binden Sie dabei die in M3 und M4 dargestellten Zusammenhänge in Ihre Argumentation ein.

Die Abbildungen zeigen die Veränderungen der CO_2 -Konz., des pH-Wertes, der Ca^{2+} - und HCO_3^- -Konz. im Wasser, nachdem es aus der Quelle ausgetreten ist.

CO₂-Konzentration

Beschreibung 1:

- Die sehr hohe Konzentration von CO_2 im Quellwasser nimmt auf den ersten 250 m hinter der Quelle nur langsam ab und ist im Vergleich zu den meisten anderen Oberflächenwässern immer noch sehr hoch.

Erklärung 1:

- Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Wasser auf den ersten 250 Metern durch einen Betonkanal fließt und demnach kaum mit der Umgebungsluft im Austausch steht, so dass auch kaum CO_2 an die Umgebung abgegeben werden kann.

Beschreibung 2:

- Nach 250 m verlässt das Wasser den Betonkanal; die CO_2 -Konz. nimmt sofort extrem ab und sinkt im Verlaufe der nächsten 50 m Fließstrecke von 330 mg/L auf etwa 75 mg/L.
- Im weiteren Verlauf des Gewässers sinkt die CO_2 -Konz. dann nur noch mäßig mit Schwankungen auf etwa 50 mg/L.

Erklärung 2:

- Die plötzliche Abnahme des CO_2 -Gehalts ist mit einem Entweichen des Kohlendioxids aus dem Wasser in die Luft zu erklären.
- Ursache 1: Da der CO_2 -Partialdruck der Umgebungsluft sehr klein ist (im Vergleich zur „Luft“ über der Magmakammer), verschieben sich die Gleichgewichte aus Aufgabe 1 auf die Eduktseite, was eine Abnahme der CO_2 -Konz. im Wasser zur Folge hat.
- Ursache 2: Außerdem ist das Wasser mit einer Temperatur von 33°C noch relativ warm, was, wie in Aufgabe 1 dargestellt, die „Lösungsgleichgewichte“ auf die Eduktseite verschiebt und somit ein Entweichen von CO_2 -Gas begünstigt.

pH-Wert

Beschreibung:

- Der pH-Wert des Wassers beträgt beim Austritt aus der Quelle etwa 6,2 und ändert sich auf den ersten 250 m nur geringfügig und steigt auf etwa 6.5. Danach steigt der pH-Wert auf den nächsten 50 Fließstrecke schnell auf etwa 7,8 und steigt dann nur noch minimal an.

Erklärung:

- Der Anfangs-pH-Wert ist auf die im Wasser enthaltene Kohlensäure zurückzuführen, welche mit den in Aufgabe 1 beschriebenen Gleichgewichtsreaktionen erklärt werden kann.
- Da der CO_2 -Gehalt auf den ersten 250 m nur geringfügig sinkt, verschieben sich die Gleichgewichte auch nur geringfügig auf die Eduktseite, wodurch die Kohlensäurekonz. ebenfalls nur geringfügig sinkt und der pH-Wert nur geringfügig steigt.
- Tritt das Wasser nach 250 aus dem Betonkanal aus, verschieben sich die Gleichgewichte stark zur Eduktseite (wie für CO_2 -Konz. erklärt). Durch den erniedrigten CO_2 -Gehalt sinkt auch die Kohlensäurekonz. und damit steigt der pH-Wert.

- Der leicht alkalische pH-Wert ist auf die im Wasser enthaltenen HCO_3^- -Ionen zurückzuführen, die als Base wirken: $\text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 + \text{OH}^-$

Ca²⁺ - und HCO₃⁻ - Konzentration

Beschreibung:

- Die hohe Ca^{2+} - und HCO_3^- - Konzentration des Quellwassers (460 mg/L bzw. 950 mg/L) ändert sich auf den ersten 250 m fast gar nicht. Danach sinken beide Konzentrationen auf den nächsten 50 m Fließstrecke sehr stark ab (auf 340 mg/L bzw. 650 mg/L); die restliche Fließstrecke sinken die Konzentrationen zwar noch, aber deutlich langsamer auf 300 mg/L bzw. 500 mg/L.

Erklärung:

- Die Ca^{2+} - und HCO_3^- - Konzentration ändern sich genau wie CO_2 -Konzentration und pH-Wert erst, wenn das Wasser den Betonkanal verlässt, da sich erst dann durch das Entweichen von CO_2 die Gleichgewichte verschieben.
- Durch das Entweichen des CO_2 -Gases beim verlassen des Betonkanals verschieben sich die Gleichgewichte, so dass letztendlich festes CaCO_3 entsteht. Die Konzentration an gelösten Ca^{2+} - und HCO_3^- -Ionen sinkt dementsprechend.
- Das gebildete CaCO_3 setzt sich als Feststoff ab und lässt dabei die Kalkterrassen entstehen, die durch immer wieder neu entstehendes Calciumcarbonat ständig wachsen.

Aufgabe 5: Die ältesten Kalkschichten der Terrassen von Pamukkale sind etwa 400.000 Jahre alt. Genauere Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Kalkschichten im Verlaufe der Erdgeschichte nicht immer im gleichen Tempo gewachsen sind. In Phasen mit relativ wenig Niederschlag, in der das Wasser nur langsam durch das Kalkgestein läuft, sind die Kalkschichten relativ stark gewachsen, in regenreichen Phasen dagegen nur langsam. Erklären Sie dieses Phänomen.

- Geringe Niederschlagsmengen mit damit verbundenem langsamem Durchfluss durch das Kalkgestein bewirken, dass das Wasser länger bzw. öfter durch das Kalkgestein zirkuliert und damit
 - a) länger Kontakt zum Kalkgestein hat und mit diesem reagieren kann und
 - b) länger CO_2 aufnehmen kann, das aus der Magmakammer aufsteigt, so dass der pH-Wert tiefer sinken wird.
 - c) stärker erwärmt wird, wodurch die Reaktion mit dem Kalkgestein etwas schneller abläuft.
- Alle Effekte führen dazu, dass das im Kalkgestein zirkulierende Wasser höhere Ca^{2+} - und HCO_3^- -Konzentrationen aufweisen wird, wenn es an die Oberfläche gelangt.
- Damit kann aus diesem Wasser auch mehr CO_2 entweichen und mehr CaCO_3 entstehen, was ein stärkeres Wachstum der CaCO_3 -Schichten zur Folge hat.
- In niederschlagsreichen Zeiten tritt der gegenteilige Effekt hat. Das Zeitfenster, das für die Aufnahme von CO_2 und die Reaktion mit CaCO_3 zur Verfügung steht, ist nur relativ klein, so dass die entsprechenden Reaktionen somit in geringerem Umfang ablaufen.