Die Kalkterassen von Pamukkale

Eine Materialgebundene Aufgabe

Vorbemerkungen zu Einsatzmöglichkeiten des Materials im Unterricht

Die Materialen zur Entstehung der Kalkterrassen von Pamukkale sind sehr umfangreich und dadurch geeignet, die Zusammenhänge zum natürlichen Kalkkreislauf in einem größeren Kontext anzuwenden. Im Rahmen der Bearbeitung der Aufgaben werden die Einflüsse von Druckänderungen, Temperaturänderungen und Konzentrationsänderungen auf die Gleichgewichtslagen aufgegriffen. Die Thematik lässt sich auf verschiedene Arten im Unterricht nutzen, wobei die Aufgabenstellungen den verfolgten Zielen angepasst werden müssen:

- Einsatz als **Lernaufgabe**, in der die Zusammenhänge, die vorher an anderen Beispielen behandelt wurden, neu aufgegriffen und vernetzt werden. Einzige Voraussetzung ist die Kenntnis der Reaktionen, die zum Abbau von CaCO3 durch kohlensäurehaltiges Wasser führen.
- Einsatz als **klassische Klausuraufgabe** zum natürlichen Kalkkreislauf. Hierfür kann und sollte das Material gekürzt werden. [**M3** (Graphen zur Beeinflussung der Löslichkeit von CO2 durch Druck und Temperatur) kann entfallen, wenn die entsprechenden Sachverhalte in entsprechender Art und Weise im Unterricht behandelt wurden. Genauso ist **M4** nicht unbedingt für die Erklärung der Entstehung der Kalkterassen notwendig; das Diagramm quantifiziert lediglich die Zusammenhänge.]
- Einsatz als „**Visualisierungsaufgabe**“, mit der die vorher erarbeiteten Inhalte zum natürlichen Kalkkreislauf und zum Prinzip von Le Chatelier auf ein komplexeres Beispiel übertragen werden. Die Zielsetzung besteht darin, die kausalen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Befunden in einer übersichtlichen Schemazeichnung (einem Wirkungsgefüge) klar herauszuarbeiten und damit das Verständnis für die Struktur von Argumenationsketten zu trainieren. (Eine vertiefende Auswertung einzelner Kurvendiagramme kann sich dann noch anschließen.)

Aufgabenstellung für den Einsatz als Lern- oder Klausuraufgabe

1. Beschreiben Sie unter Verwendung von M3 den Einfluss von Druck und Temperatur auf die Löslichkeit von CO_2 und erklären Sie diesen mit Hilfe des Prinzips von Le Chatelier.

2. Beschreiben und erklären Sie die in Abb. 4.1 (M4) zu erkennende Gesetzmäßigkeit. Formulieren Sie hierfür auch die notwendigen Reaktionsgleichungen.

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

4. Erklären Sie die Entstehung des Kalks auf den Kalkterrassen von Pamukkale, indem Sie die in Abb. 2.2 dargestellten Messergebnisse beschreiben, erklären und miteinander in Zusammenhang bringen. Binden Sie in Ihre Erläuterungen die in M3 und M4 aufgeführten Zusammenhänge ein.

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.

Aufgabenstellung als Visualisierung der Kausalbeziehungen

1. Stellen Sie die kausalen Zusammenhänge zwischen den in den Materialien aufgeführten Daten in einer übersichtlichen Schemazeichnung („Wirkungsgefüge“) dar. Dabei sollten sowohl die Ursachen für die Ergebnisse der Quellwasseranalyse (Tab. 2.1) als auch die Ursachen der Entstehung der Kalkterassen deutlich werden.

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

M1 – Die Kalkterassen von Pamukkale

Im Südosten der Türkei befinden sich die spektakulären Kalkterrassen von Pamukkale (**Abb. 1.1 und 1.2)**, die wegen ihrer beträchtlichen Ausdehnung auch auf Satellitenbildern deutlich zu erkennen sind. Übersetzt heißt der Name Pamukkale in etwa „watteweißes Schloss“, womit auf das Weiß der Kalkablagerungen angespielt wird.
Die Entstehung der Terrassen ist auf das ca. 33-36°C warme, CO_2-reiche Wasser von mehreren Thermalquellen zurückzuführen, welches hohe Ca^{2+}- und HCO_3^--Ionen-Konzentrationen und einen pH-Wert von ca. 6 aufweist. Über die geomorphologischen Besonderheiten des Quellgebietes gibt **Abb. 1.3** in vereinfachter, nicht maßstabsgerechter Weise Auskunft: Das durch die Einwirkung von magmatischen Intrusionen heiße und CO_2-reiche Wasser zirkuliert auch angetrieben durch die Hitzeeinwirkung durch das Kalkgestein.

Abb. 1.1



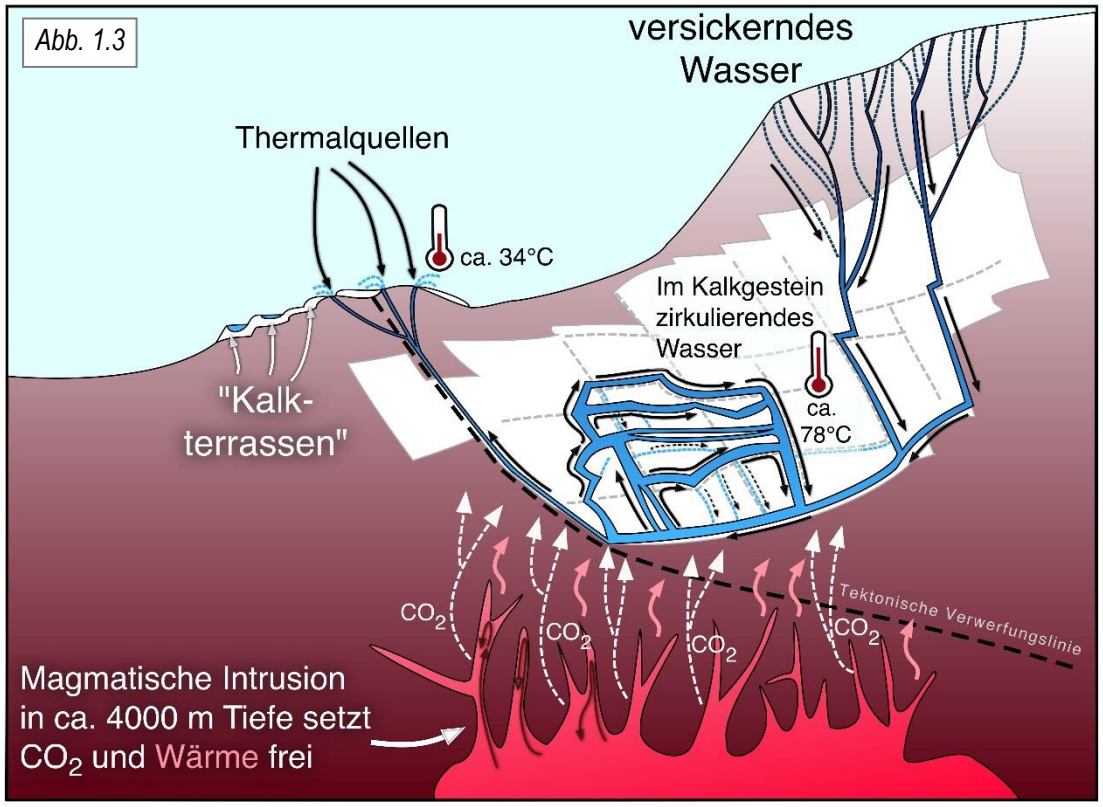
Abb. 1.2



Foto: gmelia / **Lizenz:** CC0 Public Domain; Quelle: https://pixabay.com/de/landschaft-travertin-pamukkale-2380833/

Kalkterrassen von Pamukkale (mit der genauen Lage der Jandarma- und der Beltes-Quelle)
Quelle: S. Kele, M. Özkul, I. Fórizs, A. Gökgöz, M. O. Baykara, M. C. Alçiçek, T. Németh: Stable isotope geochemical study of Pamukkale travertines: New evidences of low-temperature non-equilibrium calcite-water fractionation; Sedimentary Geology 238 (2011) S.192

Abb. 1.3



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

M2 – Untersuchung des Quellwassers

Das Quellwasser der Jandarma-Quelle, einer der Thermalquellen im Pamukkale-Gebiet, wurde genauer untersucht, um die Ursachen der Entstehung der Kalkterrassen zu ermitteln. Das Wasser der Jandarma-Quelle wird die ersten ca. 250 m durch einen weitgehend geschlossenen Betonkanal geleitet und tritt erst dann nach außen (s. **Abb. 2.1**). Eine Analyse des Quellwassers und die Veränderung verschiedener Parameter mit zunehmender Fließstrecke zeigen **Tab. 2.1** und die **Abbildungen 2.2.A bis 2.2.D**.

Abb. 2.1



Kalkterrassen von Pamukkale mit der genauen Lage der Jandarma- Quell)
leicht verändert nach: S. Kele, M. Özkul, I. Fórizs, A. Gökgöz, M. Oruç B., M. Cihat Alçiçek, T. Németh: Stable isotope geochemical study of Pamukkale travertines: New evidences of low-temperature non-equilibrium calcite-water fractionation; Sedimentary Geology 238 (2011) S.194

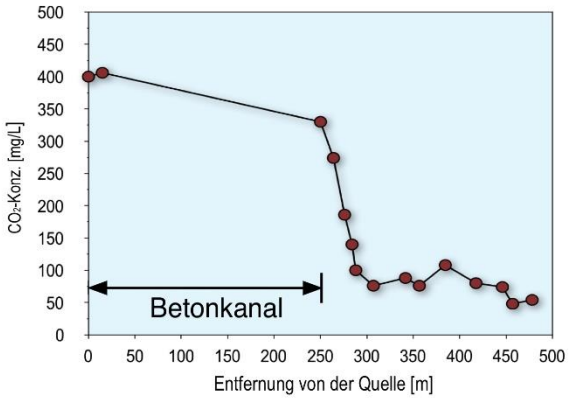
Tab. 2.1

Analyse des Quellwassers der Jandarma-Quelle vom 13.08.2008	
Temperatur	33 °C
pH-Wert	6,2
HCO_3^--Konz. *	955 mg/L
Ca^{2+}-Konz. *	461,7 mg/L
CO_2-Konz. *	400 mg/L

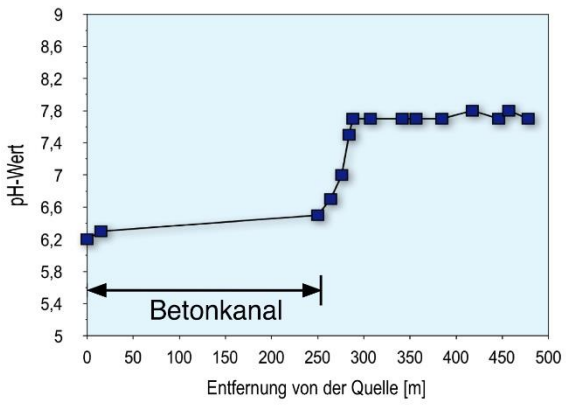
***Vergleichswerte**: Die Ca^{2+}-Konz. von hartem Wasser liegt im Bereich von ca. 100 bis 152 mg/L, die Konz. der HCO_3^- -Ionen im harten Wasser im Bereich von ca. 152 bis 232 mg/L. Der CO_2-Gehalt von typischen Oberflächenwässern liegt in der Regel unter 10 mg/L.

Abb. 2.2

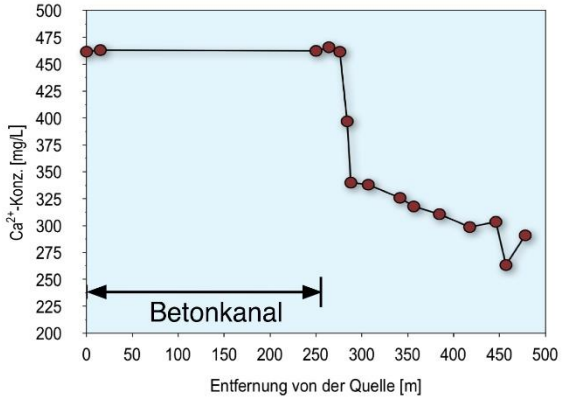
A Veränderung der CO_2-Konz. des Wassers der Jandarma-Quelle



B Veränderung des pH-Wertes des Wassers der Jandarma-Quelle



C Veränderung der Ca^{2+}-Konz. des Wassers der Jandarma-Quelle



D Veränderung der HCO_3^- -Konz. des Wassers der Jandarma-Quelle

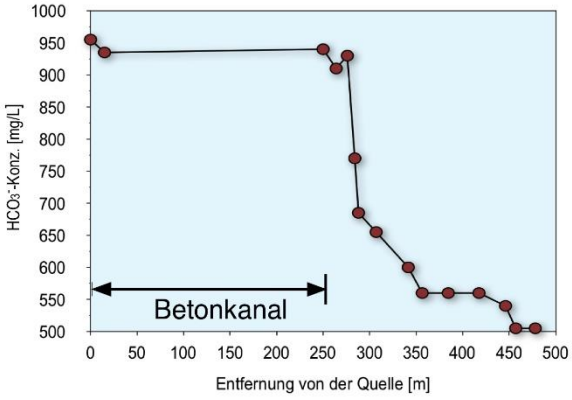


Tabelle 2.1 und Diagramme Abb. 2.2 A bis D: A. Böhm nach Werten von Kele et al.

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

M3 – CO2-Löslichkeit in Abhängigkeit vom Druck und von der Temperatur

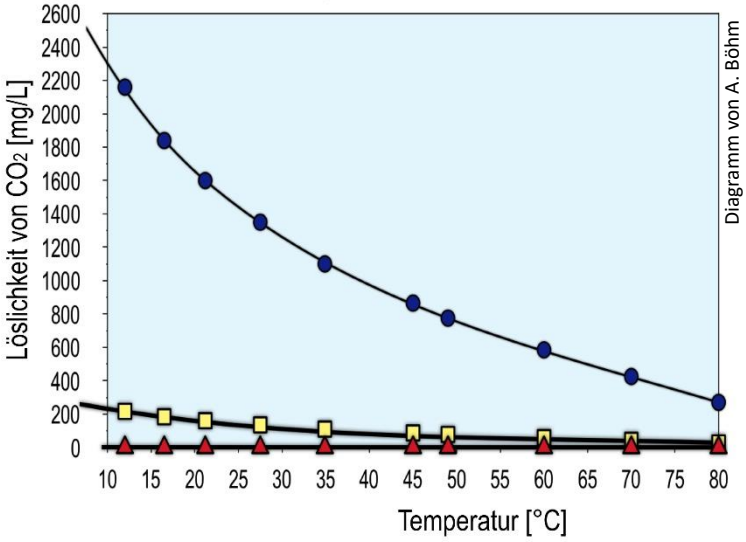
Die Löslichkeit von CO_2 hängt von der Temperatur und vom CO_2-Druck (pCO_2) der Gasphase ab, d. h. vom Druck, mit dem das Kohlendioxidgas auf die Flüssigkeit einwirkt. Dieser CO_2-Druck hängt sowohl vom Gesamtdruck der Gasphase als auch von der Kohlendioxidkonzentration in der Gasphase ab. Die Messwerte für verschiedene Temperatur- und Druckbedingungen sind in **Abb. 3.1** graphisch dargestellt.

Info: CO_2-Gehalt von Luft

Der CO_2-Gehalt der atmosphärischen Luft liegt bei etwa 0,04 %. Da mit zunehmender Höhe der Luftdruck abnimmt, nimmt auch pCO_2 mit zunehmender Höhe ab, obwohl der prozentuale Anteil an CO_2 in der Luft sich kaum ändert.

Die Bodenluft enthält wegen der Atmungsaktivität von Bodenorganismen und wegen des stark verzögerten Austauschs mit der atmosphärischen Luft nicht selten 10 % CO_2.

Beeinflussung der Löslichkeit von CO_2 durch Temperatur und Druck



Messungen mit pCO2 = 1013 mbar
≙ *"normaler Luftdruck", aber Anteil von CO_2 100%*

Messungen mit pCO2 = 101,3 mbar
≙ *"normaler Luftdruck", aber "Luft" mit 10% CO_2* ***oder***
≙ *10% des normalen Luftdrucks, aber Anteil von CO_2 100%*

Messungen mit pCO2 = 0,4052 mbar
≙ *"normaler Luftdruck", normale Umgebungsluft mit 0,04% CO_2* ***oder***
≙ 0,04% *des normalen Luftdrucks, aber Anteil von CO_2 100%*

M4 – Einwirkung von CO2-haltigen Lösungen auf Kalk

In einem Experiment wird die Löslichkeit von Kalk ($CaCO_3$) in reinem Wasser untersucht. Bei 20°C lösen sich lediglich 14 mg/Liter, Kalk wird daher als fast nicht löslich angesehen.
Wird dem Wasser allerdings vor dem Experiment CO_2 zugesetzt, wird der Kalk von der wässrigen Lösung angegriffen. Durch die ablaufenden Reaktionen verändert sich sowohl der CO_2-Gehalt als auch der Ca^{2+}-Gehalt der Lösung, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat.
Wird die Ausgangskonzentration von CO_2 variiert, verändern sich auch die Konzentrationen von CO_2 und Ca^{2+} im Gleichgewicht. Messergebnisse für eine Temperatur von 17°C sind in **Abb. 4.1** graphisch dargestellt.

Abb. 4.1

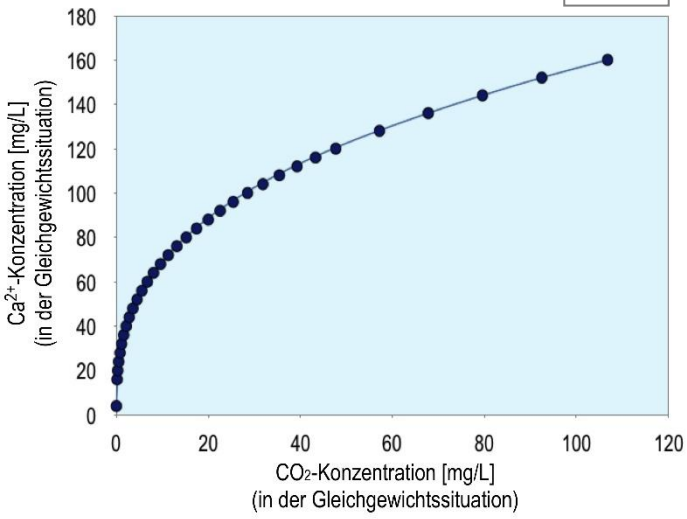


Diagramm von A. Böhm nach Werten von Zehender,, Stumm,

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

Literatur

- https://www.researchgate.net/publication/237063901_Stable_isotope_geochemical_study_of_Pamukkale_travertines_New_evidences_of_low-temperature_non-equilibrium_calcite-water_fractionationhttp://www.geo.fu-berlin.de/v/pg-net/geomorphologie/karstmorphologie/prozesse_karstlandschaften/index.html (Kele et al., 2011, in Sedimentary Geology))
- http://www.argekh.de/mainnav/wissenswertes.html
- http://docplayer.org/37248033-Water-analysis-systems.html
- http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/co2-loeslichkeit-in-wasser/2750
- https://pixabay.com/de/landschaft-travertin-pamukkale-2380833/
- https://www.researchgate.net/figure/237063901_fig3_Fig-3-Photo-and-cross-section-of-the-Pamukkale-Jandarma-spring-downstream-section (Ekmekçi, M., Günay, G., Şimşek, Ş., Yeşertener, C., Elhatip, H. & Dilsiz, C. (1995). CO2 Outgassing Precipitation Kinetics Relations In Travertine Depositing Hot Waters Of Pamukkale, An Earth Sciences Journal, 17: 101–113.)
- http://www.geologyin.com/2014/07/pamukkales-terraces.html#IpYUZjhTWHsvxPqJ.99
- http://www.geologyin.com/2014/07/pamukkales-terraces.html:
- https://www.researchgate.net/profile/Mehmet_Oezkul/publication/237476137_Depositional_environments_and_petrography_of_Denizli_travertines/links/0046352d0dd0dcf964000000.pdf
- http://www.geo.tu-freiberg.de/hydro/Tuerkei-Exkursion_1998.pdf (S.25-28)
- https://books.google.de/books?id=XtVRuvnuwlUC&pg=PA95&lpg=PA95&dq=Angewandte+Grundwasserchemie,+Hydrogeologie+und+hydrogeochemische+Pamukkale&source=bl&ots=JlVaRl3W7K&sig=LtiVs_EifEjfG1fF5jDpX9u7uew&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwjT3Pi5pbnVAhVF7xQKHdJOCPwQ6AEIMzAC#v=onepage&q=Angewandte%20Grundwasserchemie%2C%20Hydrogeologie%20und%20hydrogeochemische%20Pamukkale&f=false
- https://www.researchgate.net/profile/Mehmet_Oezkul/publication/237476137_Depositional_environments_and_petrography_of_Denizli_travertines/links/0046352d0dd0dcf964000000.pdf
- https://www.researchgate.net/figure/237063901_fig2_Fig-2-A-Simpli-fi-ed-regional-tectonic-map-of-the-eastern-Mediterranean-region-modi
- http://www.karmina.de/karmina_d/pdf_seiten_katalog/Kohlendioxid.pdf
- https://www.erdkunde.uni-bonn.de/archive/1964/mischungskorrosion-ein-beitrag-zum-verkarstungsproblem
- http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=343E8FDD04DC93B0B064173FA2531A43?doi=10.1.1.570.7131&rep=rep1&type=pdf (I. Tonguç Uysal1, Jian-xin Zhao2, Yue-xing Feng2, Suzanne D. Golding: CO2 –DRIVEN HYDROTHERMAL ERUPTIONS IN GEOTHERMAL SYSTEMS OF TURKEY)
- Zehender-Stumm-Fischer: Freie Kohlensaure und pH von Wasser. Schweiz. Ver. von Gas- und Wasserfachmännern, H. 11, 1956.

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. Beschreiben Sie unter Verwendung von M3 den Einfluss von Druck und Temperatur auf die Löslichkeit von CO_2 und erklären Sie diesen mit Hilfe des Prinzips von Le Chatelier.

Abb. 3.1 zeigt die Löslichkeit von CO_2 in Abhängigkeit von der Temperatur bei verschiedenen CO_2-Partialdrücken. Prinzipiell ist zu erkennen, dass die Löslichkeit mit steigender Temperatur abnimmt und mit abnehmendem CO_2-Partialdruck abnimmt.
Beide Abhängigkeiten lassen sich mit dem Prinzip von Le Chatelier erklären; die beim Lösen von CO_2 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 CO_2 im Wasser.

Abhängigkeit der Löslichkeit vom CO_2-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 CO_2-Partialdruck entspricht einer höheren Konz. an CO_2-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.

2. Beschreiben und erklären Sie die in Abb. 4.1 (M4) zu erkennende Gesetzmäßigkeit. Formulieren Sie hierfür auch die notwendigen Reaktionsgleichungen.

Das Diagramm zeigt, dass die Ca^{2+}-Ionen-Konzentration der wässrigen Lösung zunimmt, wenn der CO_2-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.

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.

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

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 wird die CO_2-Freisetzung der Magmakammer haben. Das Wasser kommt hier mit reinem CO_2 in Kontakt, dass 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 CO2 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 CO2-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.

4. Erklären Sie die Entstehung des Kalks auf den Kalkterrassen von Pamukkale, indem Sie die in Abb. 2.2 dargestellten Messergebnisse beschreiben, erklären und miteinander in Zusammenhang bringen. Binden Sie in Ihre Erläuterungen die in M3 und M4 aufgeführten Zusammenhänge 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.

CO_2-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

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

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 CO2-Gehalt sinkt auch die Kohlensäurekonz. und damit steigt der pH-Wert. Der leicht alkalische pH-Wert ist auf die im Wasser enthaltenen HCO3- -Ionen zurückzuführen, die als Base wirken:

$$HCO_{3\,(aq)}^{-} + H_2O_{(l)} \leftrightarrows H_2CO_{3\,(aq)} + OH^{-}{}_{(aq)}$$

Ca^{2+}- und HCO_3^-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 Kalkterassen entstehen, die durch immer wieder neu entstehendes Calciumcarbonat ständig wachsen.

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.

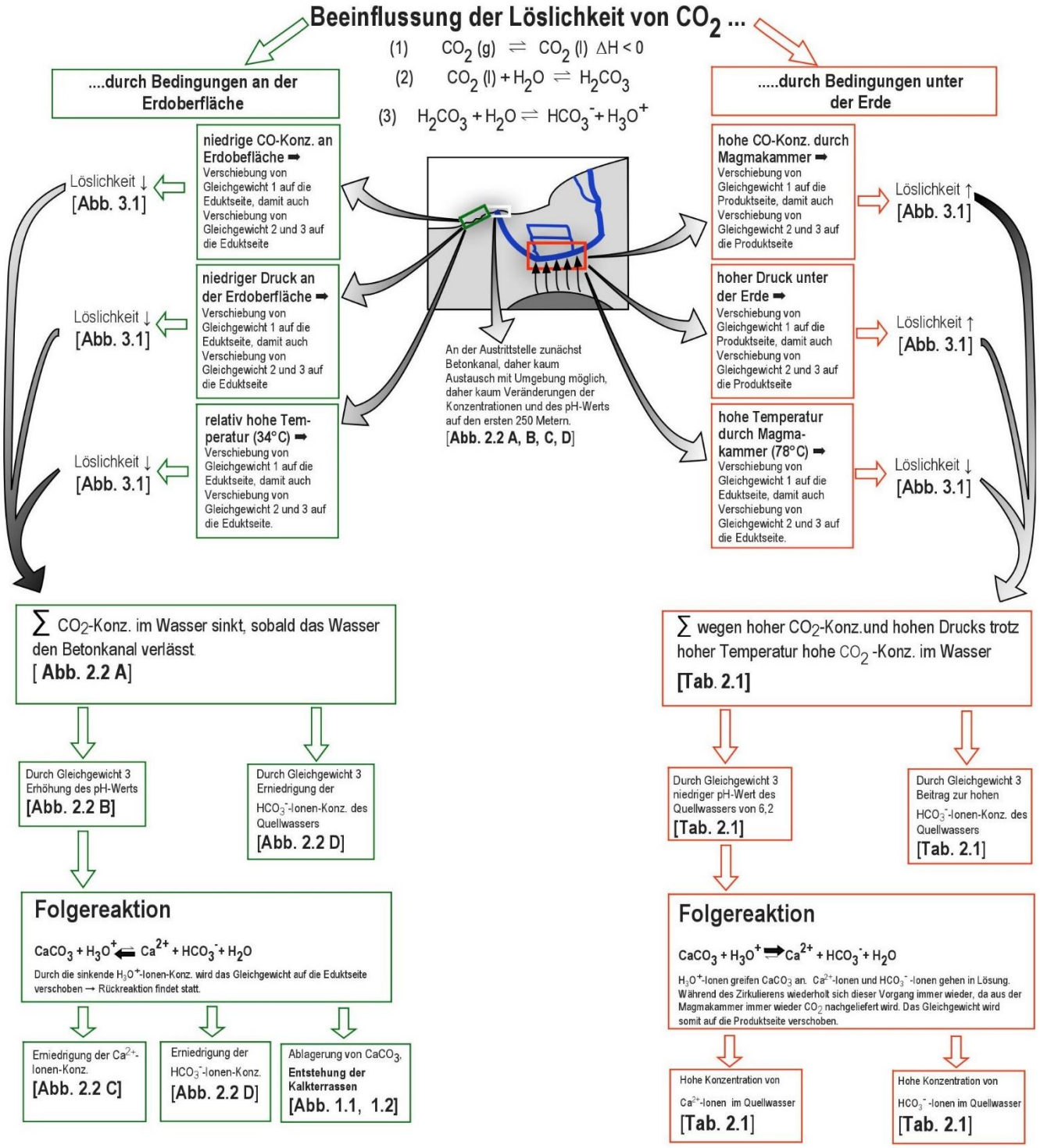
- Geringe Niederschlagsmengen mit damit verbundenem langsamem Durchfluss durch das Kalkgestein bewirken, dass das Wasser länger bzw. öfter durch das Kalkgestein zirkuliert und damit
  a. länger Kontakt zum Kalkgestein hat und mit diesem reagieren kann und
  b. länger CO_2 aufnehmen kann, dass aus der 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.

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

- 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.

Aufgabenstellung als Visualisierung der Kausalbeziehungen

2. Stellen Sie die kausalen Zusammenhänge zwischen den in den Materialien aufgeführten Daten in einer übersichtlichen Schemazeichnung („Wirkungsgefüge“) dar. Dabei sollten sowohl die Ursachen für die Ergebnisse der Quellwasseranalyse (Tab. 2.1) als auch die Ursachen der Entstehung der Kalkterassen deutlich werden.



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