Materialgebundene Aufgabe bzw. Klausuraufgabe
Die Kalkterrassen von Pamukkale

Vorbemerkungen zu Einsatzmöglichkeiten des Materials im Unterricht

Die Materialen zur Entstehung der Kalkterrassen von Pammukale 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 $CaCO_3$ 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 CO_2 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 Kalkterrassen 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.)

Materialgebundene Aufgabe bzw. Klausuraufgabe

Die Kalkterrassen von Pamukkale

Aufgabenstellung 1 (für den Einsatz als Lern- oder Klausuraufgabe):

Aufgabe 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.

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

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

Aufgabe 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.

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.

Aufgabenstellung 2 (Visualisierung der Kausalbeziehungen):

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.

Materialgebundene Aufgabe bzw. Klausuraufgabe

Die Kalkterrassen von Pamukkale

M1 | Die Kalkterassen von Pamukkale

Im Südwesten 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



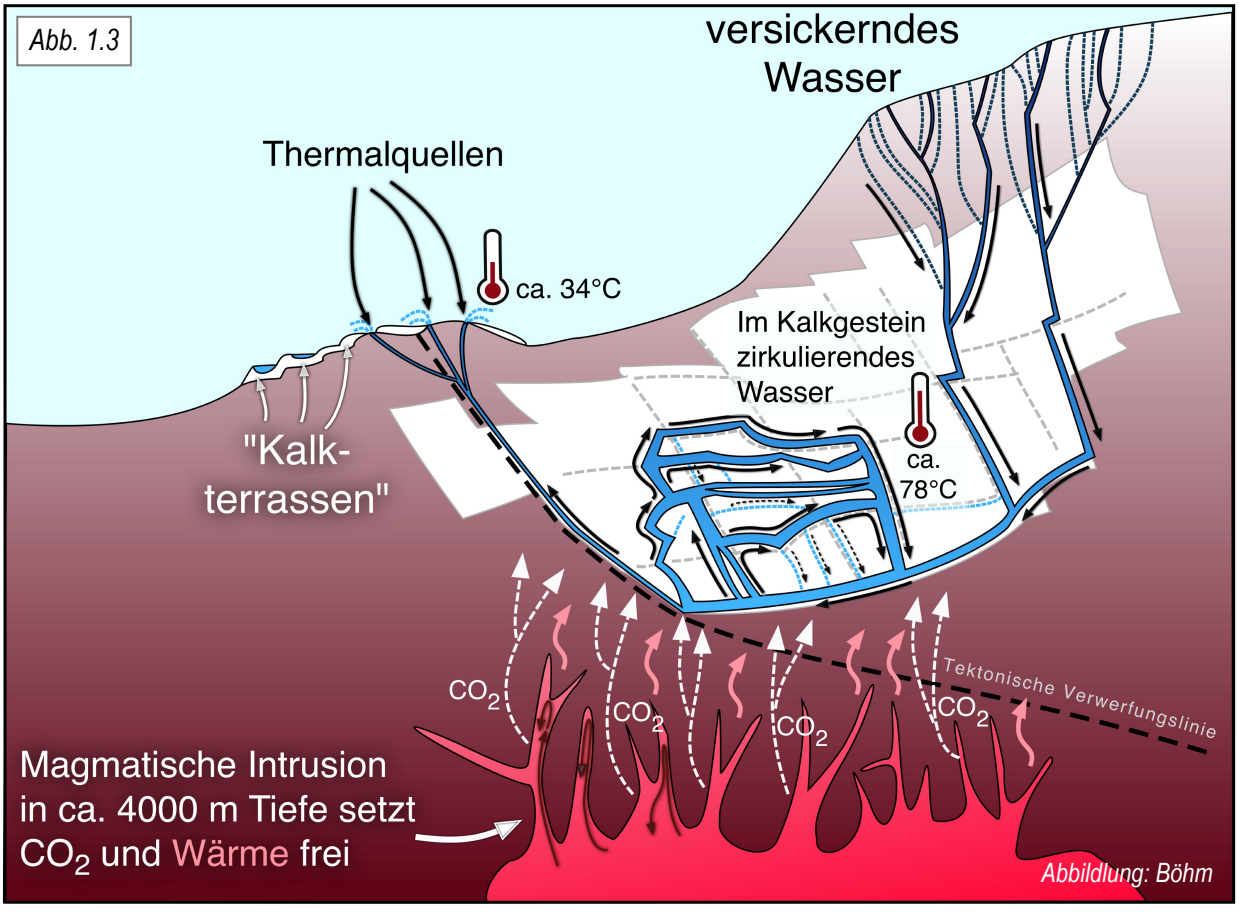
Abb. 1.2



***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



Materialgebundene Aufgabe bzw. Klausuraufgabe

Die Kalkterrassen von Pamukkale

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- Quelle)
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*

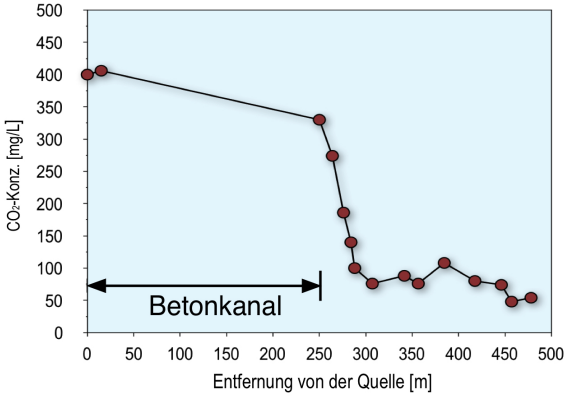
Tab. 2.1

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

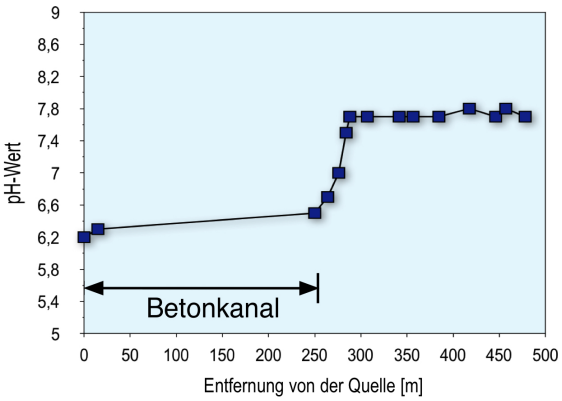
***Vergleichswerte**: Die Ca^{2+}-Konz. von hartem Wasser liegt im Bereich von ca. 100 bis 152 mg/L, die Konz. der HCO_3^- -Ionen im harten Wasser im Bereich von ca. 152 bis 232 mg/L. Der CO_2-Gehalt von typischen Oberflächenwässern liegt in der Regel unter 10 mg/L.

Abb. 2.2

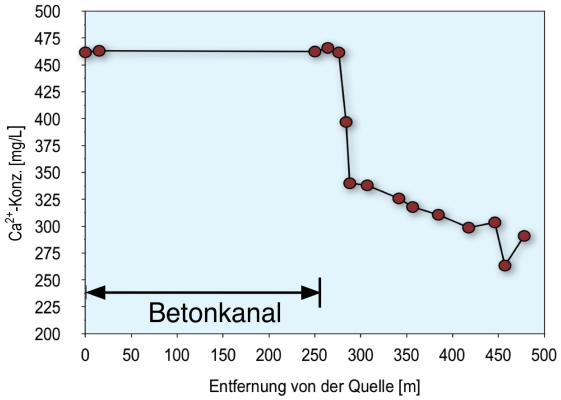
A Veränderung der CO_2-Konz. des Wassers der Jandarma-Quelle



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

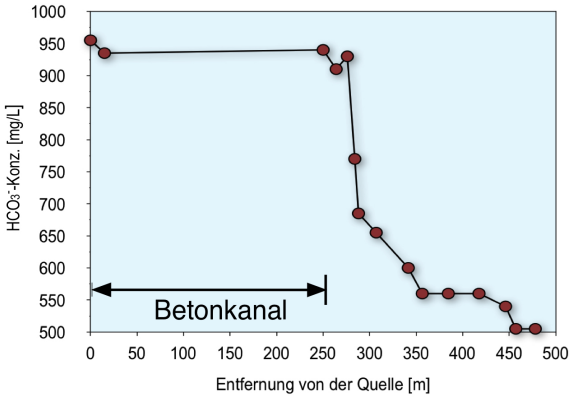


Tabelle 2.1 und Diagramme Abb. 2.2 A bis D: A. Böhm nach Werten von Kele et al. 2011

Materialgebundene Aufgabe bzw. Klausuraufgabe

Die Kalkterrassen von Pamukkale

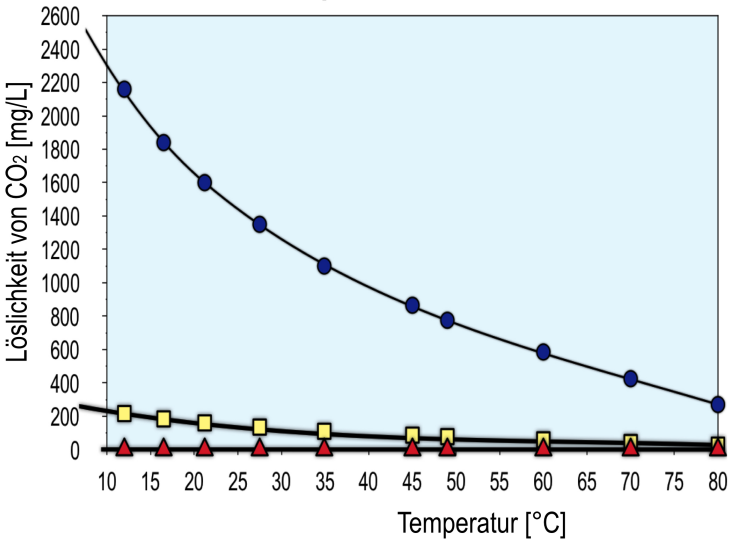
M3 | CO_2-Löslichkeit in Abhängigkeit vom Druck und von der Temperatur

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.

Abb. 3.1 **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%*

Diagramm von A. Böhm

M4 | Einwirkung von CO_2-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

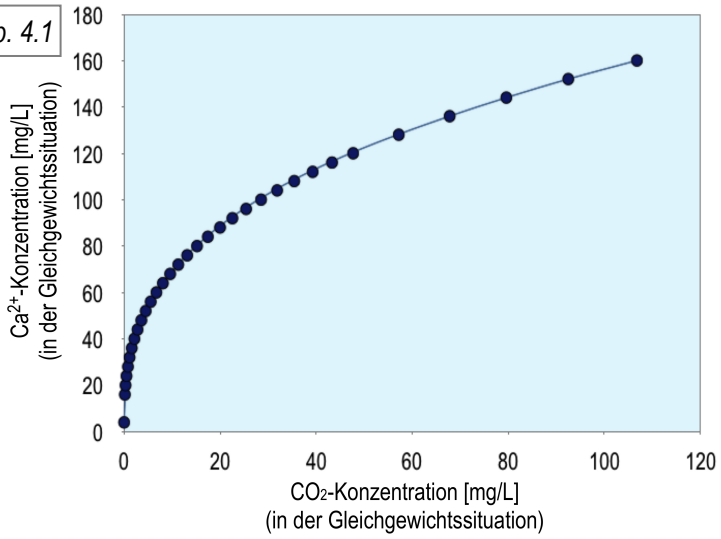


Diagramm von A. Böhm nach Werten von Zehender,, Stumm, Fischer, 1956

Materialgebundene Aufgabe bzw. Klausuraufgabe

Die Kalkterrassen von Pamukkale

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_EifEjfG1fF5jDp-X9u7uew&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.