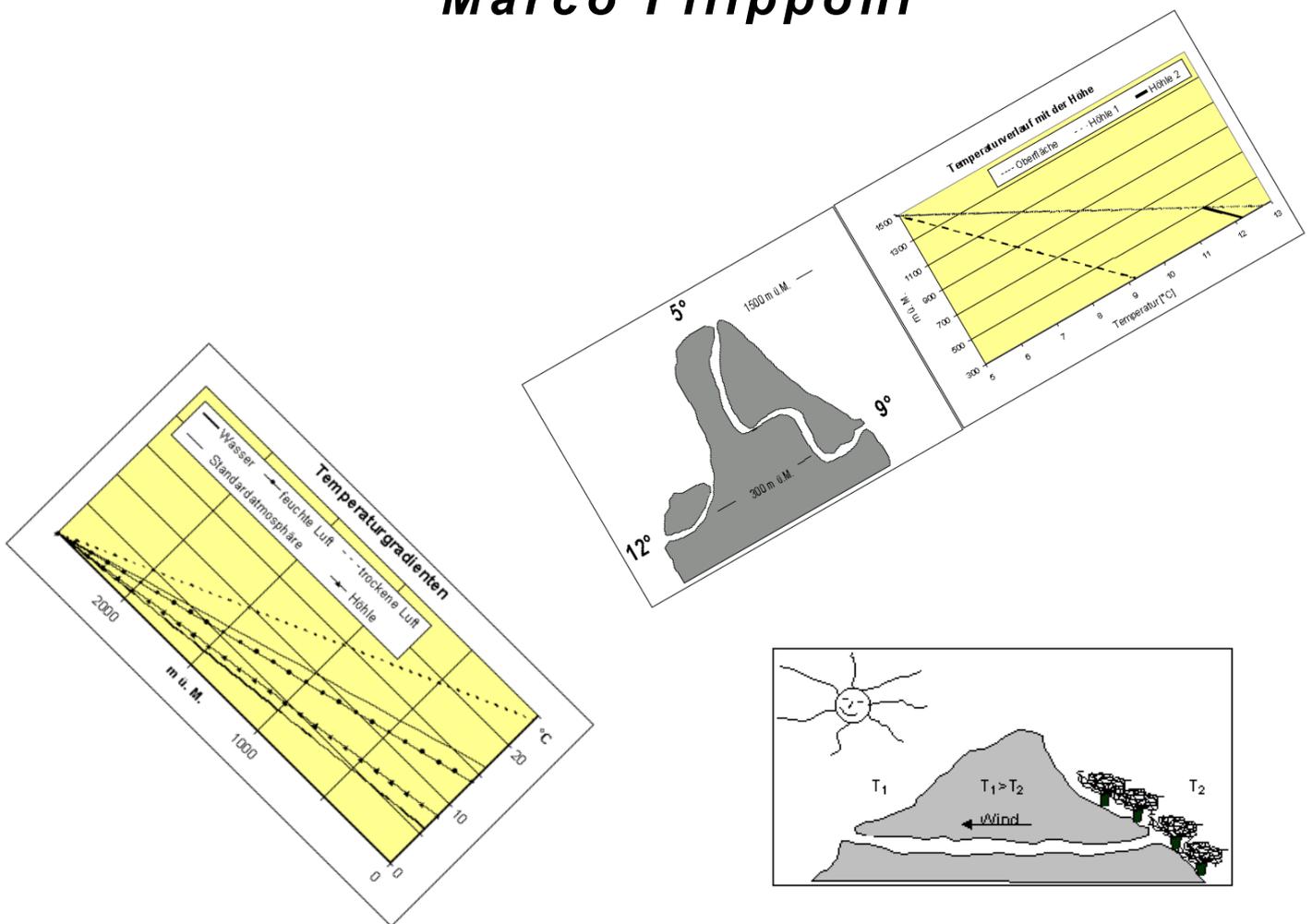


Höhlenklima

Skript von
Marco Filipponi



Vorwort

Das vorliegende Skript wurde als Kursunterlage für einen Kurs über das Höhlenklima zusammengestellt. Da es auch als kleines Nachschlagewerk konzipiert ist, erscheint es zum Teil stichwortartig.

Der Vollständigkeit halber sind viele Formeln aufgeführt, doch habe ich mich bemüht, den Textteil so zu gestalten, dass er auch ohne Studium der Formeln gelesen werden kann.

Mit bestem Dank für die Durchsicht: Hans Stünzi, Oliver Hitz, Sascha Ullmann.

Marco Filipponi

Titel	Höhlenklima
Autor	Marco Filipponi
Mitwirkung	Oliver Hitz, Hans Stünzi, Sascha Ullmann
Redaktion	Hans Stünzi
Produktion / Copyright	Arbeitsgemeinschaft für Speläologie, CH-8105 Regensdorf AGS-Regensdorf, 2000

Inhaltsverzeichnis

Klimabegriffe	5
Klimatologie / Meteorologie	5
Klimavariabilität	6
Die Luft	7
Zusammensetzung der Luft	7
Physik der Luft	8
Zustandsgleichung idealer Gase	8
Luftfeuchtigkeit	9
Sättigungsdampfdruck	9
Absolute Luftfeuchtigkeit	10
Relative Luftfeuchtigkeit	11
Spezifische Luftfeuchtigkeit	11
Virtuelle Temperatur	11
Wärmekapazität	12
Luftdichte	12
Energieinhalt der Luft	12
Die Atmosphäre	13
Entstehung der Atmosphäre	13
Physik der Atmosphäre	14
Standardatmosphäre	14
Temperaturgradienten der Atmosphäre (trockene und feuchte Luft)	14
Adiabatischer hydrischer Gradient	15
Oft verwendete Näherungen für die Temperaturgradienten	16
Erwärmen der Luft durch Steigen und Fallen	16
Luftdruck der Atmosphäre	17
Höhlentemperatur	18
Die Temperatur	18
Wärmeübertragung	19
Hauptsätze der Thermodynamik	19
Anwendungen der Wärmelehre auf die Höhlen	20
Weshalb ist die Lufttemperatur in Höhlen beinahe konstant?	20
Weshalb ist es in Bergwerken warm, während es in Höhlen kalt ist?	21
Weshalb ist die Luft in Höhlen etwas wärmer als das Wasser?	21
Ist die Temperatur in einem Raumprofil überall gleich?	21
Was sagen Temperaturschwankungen in Höhlen aus?	22
Analyse der Temperatur eines aus der Höhle fließenden Luftstroms	22
Zusammenfassung	23
Der Luftdruck in Höhlen	24
Kann ich die Tiefe einer Höhle mit einem Höhenmesser messen?	25
Der Höhlenwind	26
Konvektive Luftzirkulation	26
Bewegungswirksamer Druck	26
Windgeschwindigkeit	27
Meteo hoher und meteotiefer Eingang	27
Kann es einen meteotiefen Höhleneingang am Gipfel geben?	28
Gibt es Höhleneingänge, die immer Luft ausblasen?	28
Konvektive Luftzirkulation zwischen zwei Höhleneingängen auf derselben Höhe	28
Barometrische Luftzirkulation	29
Der Luftfluss	29
Die Charakteristische Zeit	29
Die Physik der Luftbewegung	31
Die Kontinuitätsgleichung	31
Die Bernoulli-Gleichung	31
Arten des Fließens: laminar / turbulent	31
Die Reynold's Zahl	32
Widerstand der Höhle	33

Windbeobachtungen	35
Ist die Windgeschwindigkeit in einem Gangprofil überall gleich?	35
Gibt es noch anders begründete Windzirkulationen?	35
Eine Engstelle die bläst, ist sie wichtig?	36
Wie verhält sich der Luftzug, bei der Erweiterung einer Engstelle?	36
Was kann man mit der Analyse der Luftzirkulation aussagen?	37
Wann ist es sinnvoll die Luftbewegung zu beobachten?	39
Zusammenfassung	40
Die Luftzirkulation in Höhlen – das elektrische Modell	41
Grundkonzept	41
Die fundamentalen Variablen	41
Stromstärke	41
Ladung	41
Spannung	41
Widerstand	42
Die konvektive Luftzirkulation	42
Widerstand von Galerien in Serie	42
Widerstand paralleler Galerien	43
Konvektive Luftzirkulation mit mehreren Eingängen	43
Die barometrische Luftzirkulation	44
Der elementare Fall	44
Luftvolumen ausströmender Luft	44
Widerstand	44
Charakteristische Zeit	45
Kapazität eines Kondensators	45
Der Luftfluss	45
Abfolge von mehreren Sälen	45
Kombination von konvektiver und barometrischer Luftzirkulation	46
Kondensation	47
Kondensationsarten	47
Kondensation durch Abkühlung	47
Kond. durch Erhöhung des Luftdrucks	48
Wieviel Wasser kondensiert?	48
Weshalb gibt es keine Wolken in den Höhlen?	49
Kondensationsprozesse und Speläogenese	49
Korrosionsformen.....	49
Energiehaushalt des Karstes	50
Planung von Höhlenklimaprojekten	53
Zeitpunkt der Messung	54
Messintervall	54
Messwiederholungen	54
Auswerten von Messdaten	55
Reduktion der Daten.....	55
Beispiel einer statistischen Auswertung	56
Mögliche Projekte	57
Einfache Feldmethoden	59
Standards für Langzeittemperaturmessungen in Höhlen	60
Der Top-Down-Ansatz: Standards	60
Standardlufttemperatur	60
Grasminimumtemperatur.....	60
Höhlenlufttemperatur Standard (HLTS)	61
Der Bottom-Up-Ansatz: Messziele sind massgebend	61
Messintervall	61
Messjahr	61
Das „Messprotokoll Höhlenklima“ (MHK)	62
Tips & Tricks zu den Temperatur-Messgeräten	63
Kalibrieren von Temperatur-Loggern	63
Probleme beim Kalibrieren	63
Die Messung in der Höhle	64
Messgenauigkeit ⇔ Auflösung.....	64
Anhang: Variablen, Konstanten, Einheiten	65
Literaturverzeichnis	67

Klimabegriffe

Klimatologie / Meteorologie

Die **Meteorologie** (Wetterkunde) ist die Wissenschaft von den physikalischen Erscheinungen der gasförmigen Erdhülle. Die Meteorologie befasst sich mit den Eigenschaften und Ursachen des sich abspielenden Wettergeschehens.

Die **Klimatologie** befasst sich mit dem mittleren physikalischen Zustand der Atmosphäre, wobei sich der Zustand nicht nur auf zeitliche Mittelwerte bezieht (mittlere Temperaturen, Windgeschwindigkeiten, ...), sondern auf höhere statistische Momente (Varianzen, Kovarianzen, Korrelationen, ...). Damit enthält der Begriff „Klima“ nicht nur Angaben über das mittlere Wetter, sondern eben auch Informationen über die typische Variabilität und die typische Abfolge innerhalb des Klimasystems.

Bei der Erforschung eines noch unverstandenen Sachverhaltes macht es oftmals Sinn, dessen Erscheinungsformen anhand messbarer Parameter zu typisieren und einzuteilen. In der Klimatologie bedient man sich daher den Klimaelementen.

Klimaelemente

Klimaelemente sind einzelne Eigenschaften oder Bedingungen, die zusammen den physikalischen Zustand der Atmosphäre beschreiben.

Die Klimaelemente in der *traditionellen Klimatologie* sind: Strahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Wind, Luftdruck.

In der *Höhlenklimatologie* sind dies: Lufttemperatur, Wassertemperatur, (Felstemperatur), Luftfeuchtigkeit, Kondensation, Wind, Luftdruck.

Klimafaktoren

Klimafaktoren sind die Gesamtheit der Begebenheiten, die das Klima bestimmen.

Wir unterscheiden zwischen externen (solche, die durch die Veränderung des Klimas nicht verändert werden; z.B. Erdbahn um die Sonne, Land-Wasser-Verteilung, ...) und internen Klimafaktoren (solche, die das Klima verändern und vom Klima selbst beeinflusst werden, Rückkoppelung; z.B. Anteil an Wasserdampf in der Atmosphäre, Ausdehnung der vereisten Flächen, Vegetation, ...)

Ein typischer externer Klimafaktor in der Höhlenklimatologie ist die Lufttemperatur an der Erdoberfläche.

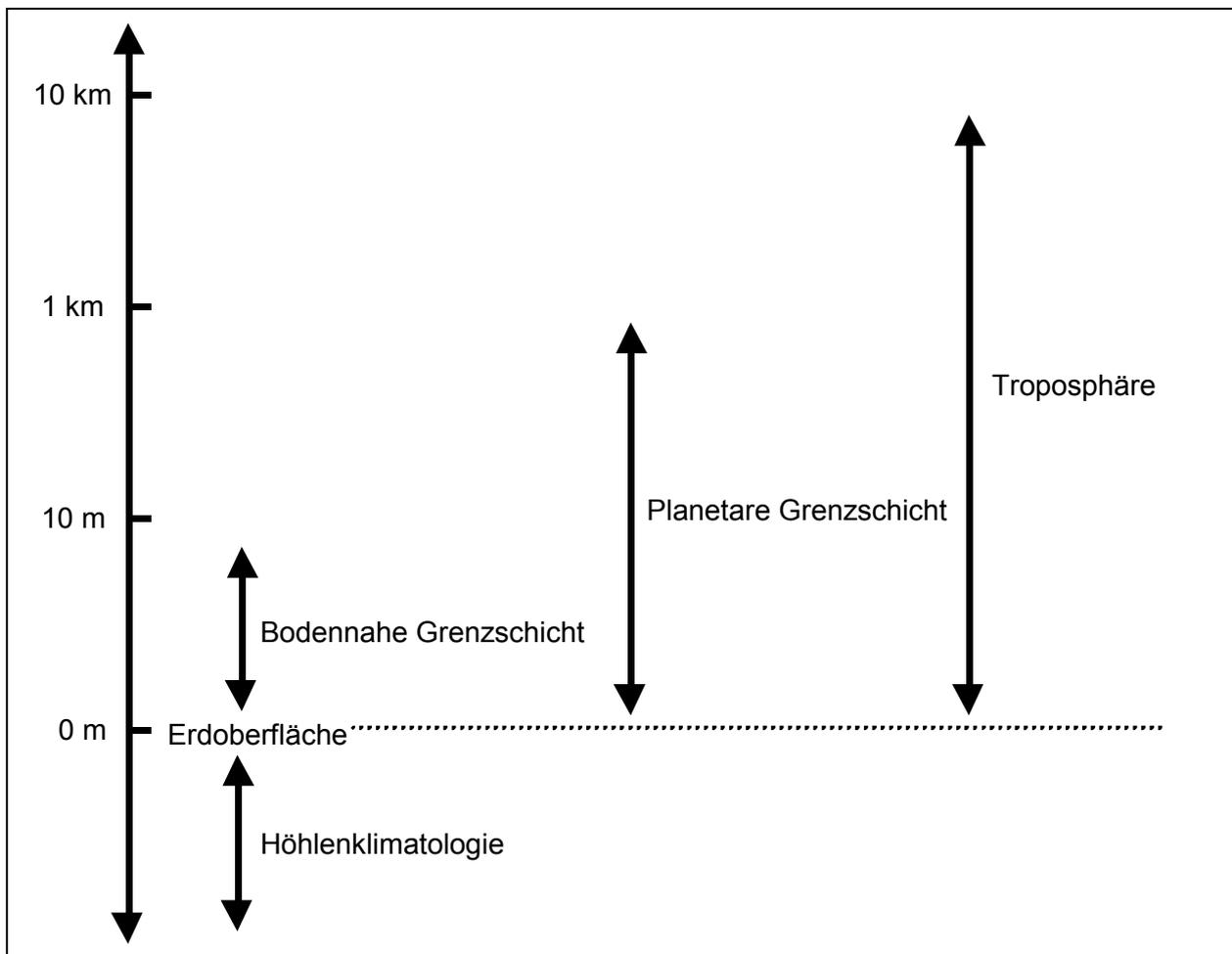
Ein typischer interner Klimafaktor in der Höhlenklimatologie ist das Wechselspiel Kondensation-Lufttemperatur.

Klimavariabilität

Das komplexe Wechselspiel von vielen Elementen im Klimasystem erklärt auch, dass die Klimabedingungen stark variabel sind.

Die periodischen Schwankungen von einem Tag, respektive von einem Jahr sind durch die Erdrotation und den Umlauf der Erde um die Sonne erklärbar. Schwankungen mit kurzen Perioden im Bereich von Tagen können durch die Dynamik in der Erdatmosphäre (Klimaelemente) verstanden werden. Für Perioden mit mehreren Jahren bis Jahrhunderten wirken die ozeanischen Ströme als Schrittmacher. Längere Perioden, wie jene der verschiedenen Eiszeiten, im Bereich von 10^4 bis 10^5 Jahren werden teilweise durch die Schwankung der Erdbahn aufgrund der Gravitation anderer Planeten ausgelöst.

Klimatologische Einteilung des untersten Bereichs der Atmosphäre



Die Luft

Die Luft ist ein Gemisch aus den Gasen Stickstoff, Sauerstoff und Argon. Die prozentuale Zusammensetzung bleibt in den untersten 20 km der Atmosphäre beinahe konstant.

Zusammensetzung der Luft

Name	Formel	Vol-%	Gewichts-%
Stickstoff	N ₂	78.08	75.52
Sauerstoff	O ₂	20.95	23.15
Argon	Ar	0.93	1.28
Kohlendioxid	CO ₂	0.03	0.05

Normalerweise enthält die Luft räumlich und zeitlich unterschiedliche Anteile von Wasser in unterschiedlichen Aggregatzuständen (gasförmig, flüssig oder fest). Dieses Wasser bestimmt wesentlich das Wettergeschehen an der Erdoberfläche.

Auch der CO₂-Gehalt der Luft kann messbar schwanken, so ist die Konzentration im Karst höher als in der Aussenatmosphäre (Beispiel: Schwäbische Alb draussen 0.03 Vol-%, im Karst 2.4 Vol-% [Pechhold 1997]). Wobei die Zunahme des CO₂-Gehalts eine Verringerung des Sauerstoffgehaltes der Luft zur Folge hat und umgekehrt.

Molmasse der Luft

	Molmasse g/mol	
Stickstoff	28.0	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">Die Molmasse ist die Masse von einem Mol = $6.022 \cdot 10^{23}$ Teilchen (Atome, Moleküle, ...).</div>
Sauerstoff	32.0	
Argon	39.4	
Kohlendioxid	44.0	
Wasser (H ₂ O)	18.0	
trockene Luft	28.966	
wassergesättigte Luft	28.785	bei Standardbedingungen (siehe Kapitel „Die Atmosphäre“)

Die Molmasse der feuchten Luft ist kleiner als jene der trockenen, weil Wasser eine kleinere Molmasse als die übrigen Bestandteile der Luft hat.

Viskosität der Luft und des Wassers

Die Viskosität beschreibt die Zähigkeit des Fließens eines Gases oder einer Flüssigkeit. Sie beruht auf der inneren Reibung (siehe Kapitel „Der Höhlenwind“).

Temp. [°C]	β_{Luft} [Ns/m ²]	β_{Wasser} [Ns/m ²]
0	$1.70 \cdot 10^{-5}$	$1.80 \cdot 10^{-3}$
10	$1.75 \cdot 10^{-5}$	$1.31 \cdot 10^{-3}$
20	$1.80 \cdot 10^{-5}$	$1.01 \cdot 10^{-3}$

Die Viskosität von Luft ist um zwei Größenordnungen kleiner als diejenige von Wasser.

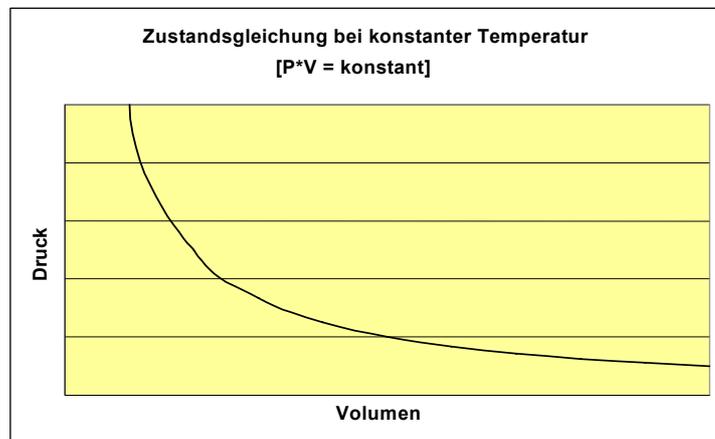
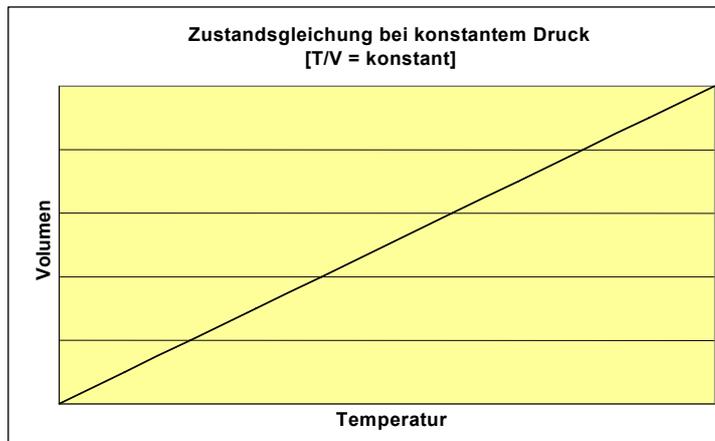
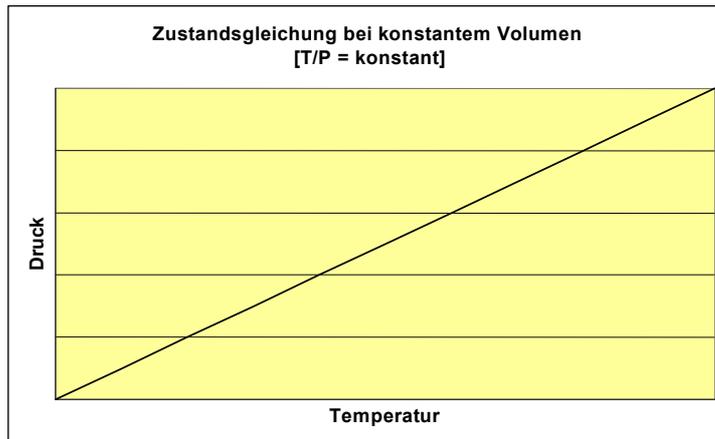
Die Viskosität von Luft nimmt mit zunehmender Temperatur zu, jene von Wasser ab.

Physik der Luft

Zustandsgleichung idealer Gase: $PV = nRT$

Wobei: P = Druck [Pa]
V = Volumen [m³]
n = Anzahl Teilchen [mol]
R = Universelle Gaskonstante [8.31451 J/(mol*K)]
T = Temperatur [K] (Kelvin: absolute Temperatur, siehe Kapitel „Höhrentemperatur“)

Schematische Darstellungen der Zustandsgleichung



Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit gibt den Anteil von gasförmigem Wasser (Wasserdampf) in der Luft an.

Feuchte Luft enthält mengenmässig nie viel Wasser, doch sehr viel Energie (Kondensationsenergie). Dadurch kommt ihr eine wichtige Rolle bei klimatischen Betrachtungen zu.

Sättigungsdampfdruck von Wasser in Luft (P_S)

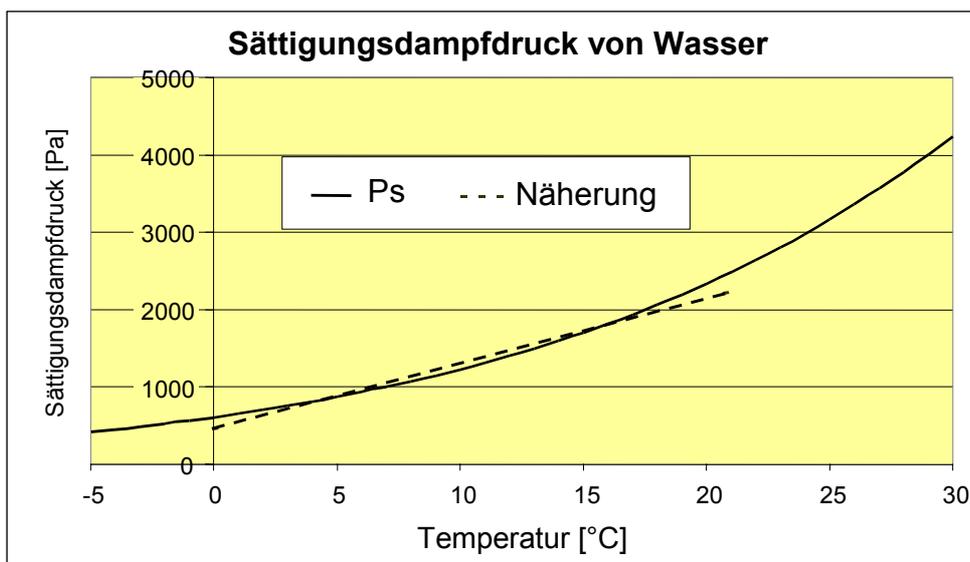
Der Sättigungsdampfdruck von Wasser in der Luft P_S ist der Druck, den die Wassermoleküle ausüben (Partialdruck), wenn die Luft gesättigt ist.

Den Sättigungsdampfdruck P_S [Pa] im Temperaturbereich von Höhlen können wir annähern durch:

$$P_S \approx 85T_{\circ C} + 468 \quad \text{Temperatur in } \circ\text{C}$$

Für genauere Berechnungen des Sättigungsdampfdruckes *über Wasseroberflächen* verwenden wir:

$$P_S = 6.112 * e^{\frac{17.67(T-273.16)}{T-29.65}} \quad \text{Temperatur in } \circ\text{C}$$



Relative Luftfeuchtigkeit (r)

Die relative Luftfeuchtigkeit r gibt an, wie wassergesättigt die Luft ist (gesättigte Luft: 100%).

$$r = \frac{m_V}{m_S} \quad \text{Als Näherung kann verwendet werden: } r \approx \frac{P_V}{P_S}$$

Wobei:

m_V = Masse des Wassers in der Luft [kg]

m_S = Masse des Wassers in gesättigter Luft [kg]

P_V = Partialdruck [Pa]

P_S = Sättigungsdampfdruck [Pa]

Die Luft

Absolute Luftfeuchtigkeit (m_v)

Die absolute Luftfeuchtigkeit m_v ist die Masse des Wassers in 1 m³ Luft.

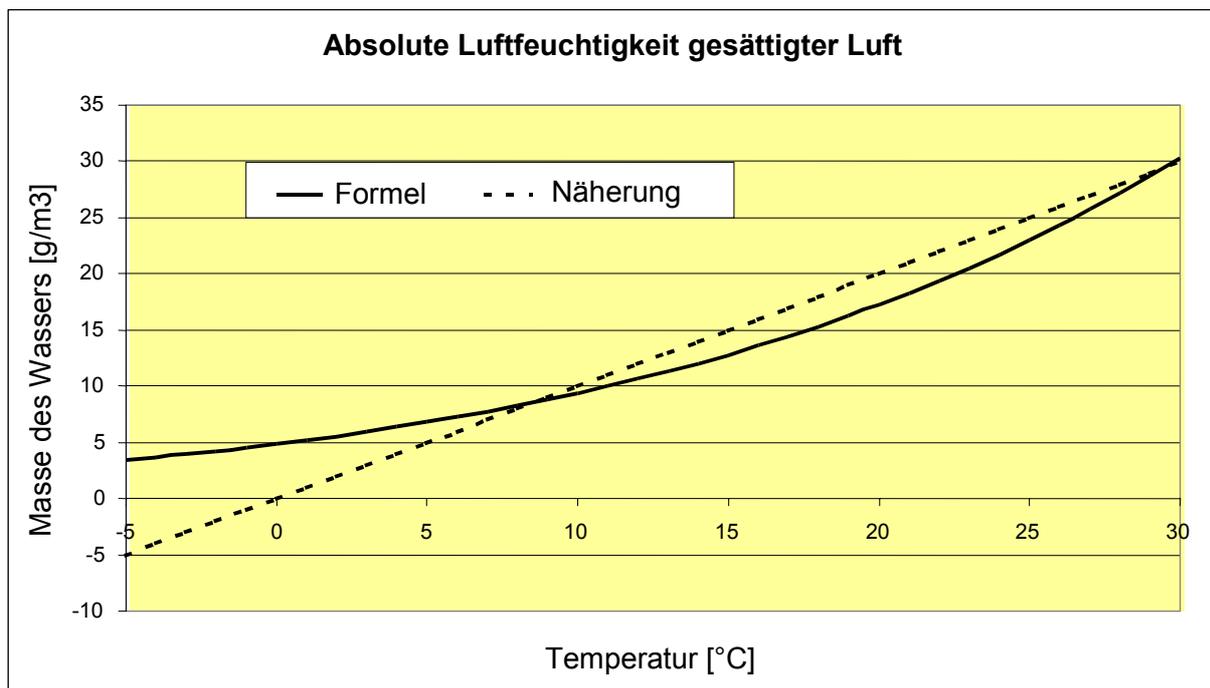
$$m_v = \frac{\mu_{\text{Wasser}} * P_v}{R * T} = 2.17 \frac{P_v}{T}$$

Wobei: m_v = absolute Luftfeuchtigkeit [g/m³]

μ_{Wasser} = Molmasse des Wassers [18 g/mol]

R = universelle Gaskonstante [8.31451 J/(mol*K)]

Beispiel: In 1 m³ gesättigter Luft bei 0 °C sind 4.8 g Wasser enthalten, bei 10 °C bereits 9.4 g.



Als **Näherung** kann man die Lufttemperatur in °C als m_v nehmen, z.B. 3 °C : $m_v \approx 3 \text{ g/m}^3$.

Spezifische Luftfeuchtigkeit (d)

Die spezifische Luftfeuchtigkeit d ist die Masse des Wassers in 1 kg feuchter Luft.

$$d \approx 0.622 \frac{P_v}{P}$$

Wobei: d = spezifische Luftfeuchtigkeit [kg/kg]

P_v = Partialdruck des Wasserdampfes [Pa]

P_s = Luftdruck [Pa]

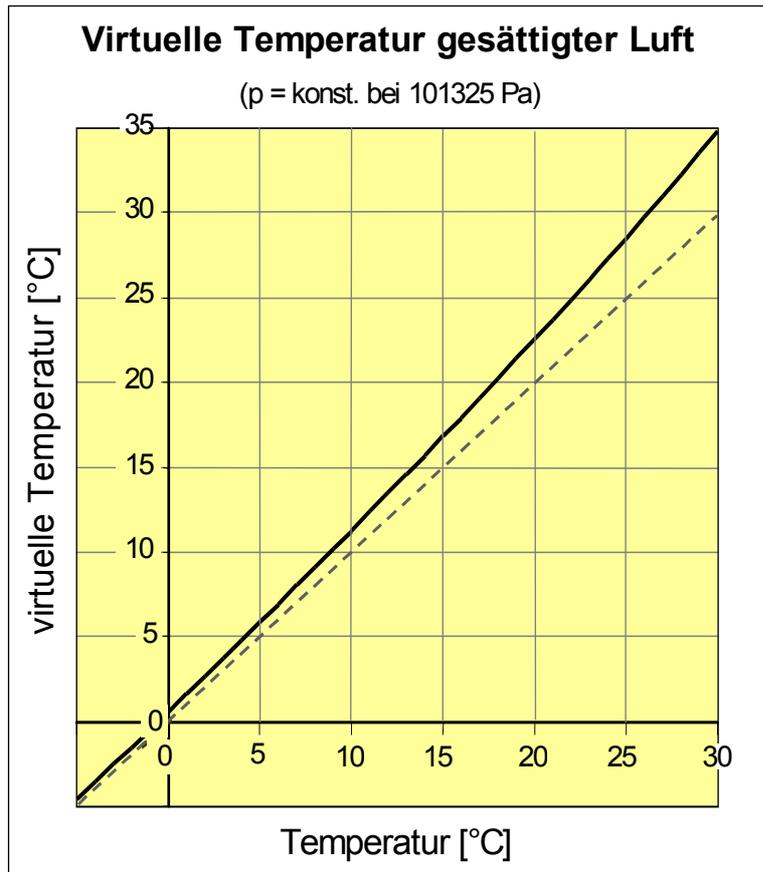
Virtuelle Temperatur

Die virtuelle Temperatur ist die Temperatur der feuchten Luft, die erreicht würde, wenn der Wasserdampf bei gleichbleibendem Druck kondensiert:

Feuchte Luft → flüssiges Wasser und wärmere, trockene Luft.

$$T_V = T \left(1 + 0.375 * \frac{r * P_V}{P} \right)$$

Wobei: T_V = virtuelle Temperatur [K]
 T = Lufttemperatur [K]
 r = relative Luftfeuchtigkeit
 P_V = Partialdruck des Wassers in der Luft [Pa]
 P = Gesamtdruck [Pa]



Die Abweichung der virtuellen Temperatur (ausgezogene Linie) von der wirklichen Temperatur (gestrichelte Linie) wird mit zunehmender Temperatur grösser.

Wärmekapazität (C_p)

Die spezifische Wärmekapazität bezeichnet die Wärmemenge, die benötigt wird, um 1 kg einer Substanz bei konstantem Druck um 1°C zu erwärmen.

Wärmekapazität **trockener Luft** $C_{p_{trocken}} \approx 1000 \frac{J}{kg * K}$

Wärmekapazität **feuchter Luft** $C_{p_{feucht}} \approx 1050 \frac{J}{kg * K}$

Wärmekapazität von **Wasser** $C_{p_{Wasser}} \approx 4200 \frac{J}{kg * K}$

Luftdichte (ρ)

Feuchte Luft hat eine geringere Dichte als trockene.

(Molmasse Wasser < Molmasse trockene Luft - 18 g/mol < 28.966 g/mol)

Dichte der trockenen Luft
$$\rho = \frac{\mu * P}{R * T}$$

Dichte der feuchten Luft
$$\rho = \frac{\mu_{trocken} (P - rP_V)}{RT} + \frac{\mu_{Wasser} rP_V}{RT} = \frac{\mu_{trocken} * P}{R * T_V}$$

Luftdichte in Abhängigkeit von der Höhe
$$\rho_z \approx \rho_0 (1 - y * \frac{\Delta z}{L_z})$$

Wobei:

ρ = Dichte [kg/m³]

P = Druck [Pa]

T = Temperatur [K]

T_V = virtuelle Temperatur [K]

L_z = 10500 m

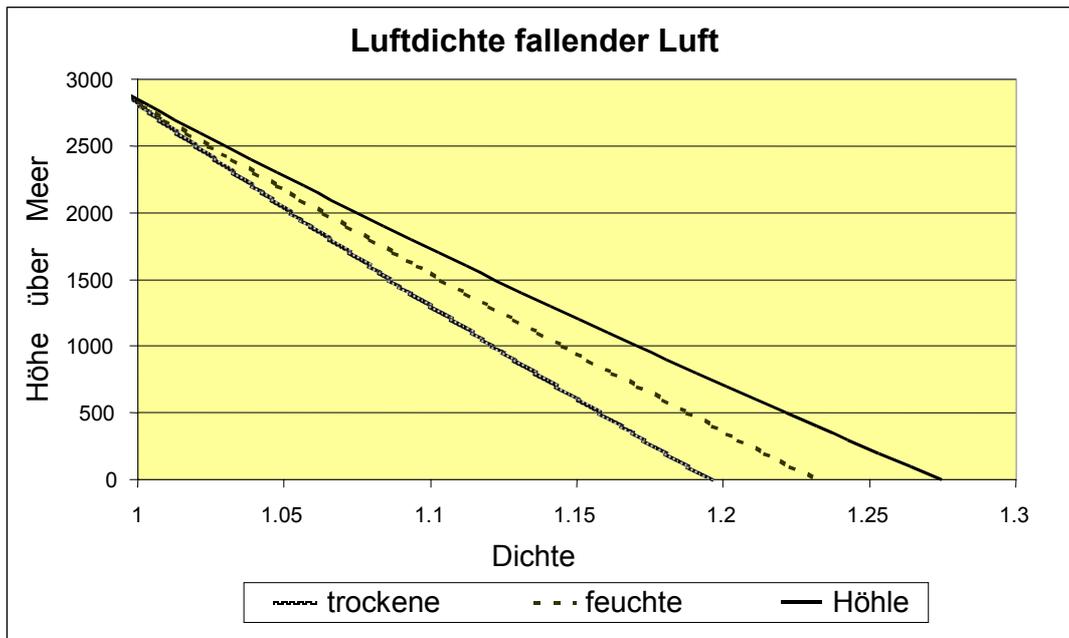
y = 0.71 für nicht gesättigte Luft; 0.82 für gesättigte Luft; 0.9 für Höhlenluft (aus Badino, 1995)

μ = Molmasse [kg/mol]

R = universelle Gaskonstante [8.314510 J/(mol*K)]

r = relative Luftfeuchtigkeit

z = Höhe [m]



Energieinhalt der Luft

(siehe auch Kapitel: „Energiehaushalt des Karstes“)

$$H_{Luft} = T + d(2501 + 1.93 * T)$$

Wobei: H_{Luft} = Enthalpie Luft (die gesamte, in der Luft vorhandene Energie)

T = Temperatur

d = spezifische Feuchte

Die Atmosphäre

Die Luft in der Höhle ist ein Teil der erdumspannenden Atmosphäre und ist daher denselben Gesetzmässigkeiten wie an der Erdoberfläche unterworfen. Die Luftbewegungen in der Höhle stehen in Zusammenhang mit jenen ausserhalb der Höhle.

Um ein wenig besser zu verstehen, was in der Höhle passiert, ist es nötig, eine Ahnung zu haben, was draussen geschieht.

Entstehung der Atmosphäre

Die erste Atmosphäre der Erde muss schon in einer frühen Phase der Akkretion (dem Zusammenstossen und Zusammenkleben von Staubteilchen zu Planeten) entstanden sein. Helium und Wasserstoff waren die dominierenden Gase jener Atmosphäre. Diese leichten Gase konnten durch die Schwerkraft der Erde jedoch nicht lange gehalten werden, so dass diese Atmosphäre wieder ins All verschwand.

Während der weiteren Akkretion brachten Meteoriten neue, leichtflüchtige Substanzen (Wasser, Kohlendioxid, Methan, Stickstoff) auf die Erde. Durch die Einschlagsenergie wurde die Erde aufgeheizt, die schweren Bestandteile (Metalle) sanken ins Erdzentrum, die Gesteine bildeten die äusseren Schichten und die Gase eine dichte Atmosphäre.

Gegen Ende der Akkretion verkleinerte sich der Eintrag von Einschlagsenergie in die Erde und die Atmosphäre, bestehend aus rund 200 bar Wasserdampf, 50 bar Kohlendioxid und anderen Gasen, begann sich abzukühlen. Wasserdampf begann zu kondensieren und ein heisser Ozean entstand. Bis zu diesem Zeitpunkt spielte die Atmosphäre die Rolle einer Decke, welche die Abstrahlung der Einschlagsenergie gegen aussen verhinderte. Danach begann der Treibhauseffekt, der vorwiegend aus Kohlendioxid bestehenden Atmosphäre, die Energiebilanz der Erde zu dominieren. Durch weitere Verringerung der Einschlagsrate und teilweise Lösung des Kohlendioxids im Ozean und Sedimentation von Karbonaten, kühlte sich die Erde weiter ab.

Im Präkambrium (vor 3.8 Milliarden Jahren) haben die ersten Lebewesen (Blaualgae) angefangen Sauerstoff zu produzieren und in die Atmosphäre abzugeben. In einem Quasigleichgewicht mit Oberflächenprozessen (Oxidation, Sedimentation, ...) haben sich die Anteile an Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid über lange Zeiträume auf die heutige Zusammensetzung eingestellt (Vol. Anteile: Stickstoff 78%; Sauerstoff 21%; Kohlendioxid 0.03%).

Die heutige Situation der Atmosphäre scheint nur bedingt stabil zu sein. Sie befindet sich zwischen zwei Extremzuständen, die absolut stabil sind: ein extremes Treibhaus mit hohen Temperaturen (heute noch auf der Venus) und einem Eishaus (wie auf dem Mars).

Physik der Atmosphäre

Um uns nicht in der Komplexität von dynamischen Prozessen zu verlieren, betrachten wir die Atmosphäre in einem statischen Gleichgewicht.

Was uns interessiert, ist der Luftdruck und die Lufttemperatur auf einer bestimmten Höhe über Meer, da diese zwei Parameter einen wesentlichen Einfluss auf die Luftbewegungen in der Höhe ausüben.

Standardatmosphäre

Bei vielen Berechnungen und Modellen wird die Atmosphäre durch die Standardatmosphäre beschrieben.

Sie ist definiert durch:

- Trockene Luft
- Bei 0 m ü. M. $1.01325 \cdot 10^5$ Pa Druck und 15°C
- Temperaturgradient von $-6.5^\circ\text{C}/\text{km}$ bis $10'769$ m ü. M.
- darüber ist die Temperatur konstant (-55°C)

Temperaturgradient der Atmosphäre

Der Temperaturgradient gibt an, um wieviel Grad Celsius die Luft abgekühlt wird, wenn man sie um einen Kilometer in die Höhe verschiebt. Kühlt sich die Luft mit zunehmender Höhe ab, ist das Vorzeichen negativ, nimmt die Temperatur hingegen mit der Höhe zu, so ist das Vorzeichen positiv.

Beim Temperaturgradienten müssen zwei Extremfälle unterschieden werden: beim ersteren ist die Luft trocken, beim zweiten ist die relative Luftfeuchtigkeit nahezu 100%.

Temperaturgradient der trockenen Luft

Wenn wir annehmen, dass die Atmosphäre ein adiabatisches (adiabatisch heisst, dass kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet) System ist, dann gehorcht der Temperaturgradient folgendem Gesetz:

$$\text{trockenadiabatischer Temperaturgradient} \quad G_T = -\frac{g\mu}{C_p} = -0.0098^\circ\text{C} / \text{m}$$

Wobei: G_T = Temperaturgradient der trockenen Luft [$^\circ\text{C}/\text{m}$]
 g = Fallbeschleunigung [9.81 m/s^2]
 μ = Molmasse der Luft (trockene Luft: 0.028966 kg/mol)
 C_p = spezifische Wärmekapazität der Luft [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]

Diese Formel gilt auch dann noch, wenn die Luft leicht feucht ist, aber nicht nahe der Sättigung.

Temperaturgradient der feuchten Luft

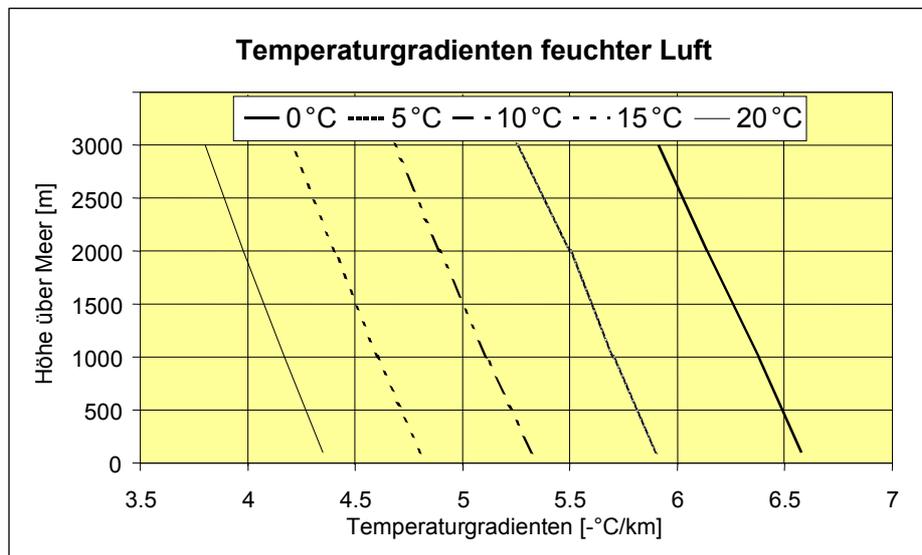
Die Schwierigkeit, das Verhalten der Temperatur durch eine Formel anzugeben, liegt im Wechselspiel der verschiedenen Energiespeicher (Wärme, potentielle Energie, latente Energie). Steigt ein feuchtes Luftpaket in die Höhe, so nimmt der Luftdruck ab. Das Luftpaket expandiert. Durch die Expansion kühlt sich das Luftpaket ab und das darin enthaltene gasförmige Wasser kondensiert. Bei der Kondensation wird Energie frei und erwärmt die Luft wieder.

(Um flüssiges Wasser in Dampf umzuwandeln, muss Wärme zugeführt werden. Wird Dampf wieder zu Wasser, wird dieselbe Wärmemenge wieder frei.)

$$\text{Feuchtadiabatischer Temperaturgradient} \quad G_F = -0.0098 \frac{1 + 8.72 \cdot 10^3 \cdot \frac{d}{T}}{1 + 1.35 \cdot 10^7 \cdot \frac{d}{T^2}} = [^\circ\text{C} / \text{m}]$$

Wobei: T = Temperatur [K] d = spezifische Luftfeuchtigkeit [kg/kg]

Die Temperaturgradienten feuchter Luft, abhängig von der Höhe über Meer und der Temperatur, variieren von -4 bis -6.5 °C/km (L. Matveev 1967):



Adiabatischer hydrischer Gradient („Gradient von Wasser“)

Die potentielle Energie von **Wasser** wandelt sich ganz in Wärme um. Dies ist der wesentlichste Einfluss auf den Temperaturgradienten in Höhlen:

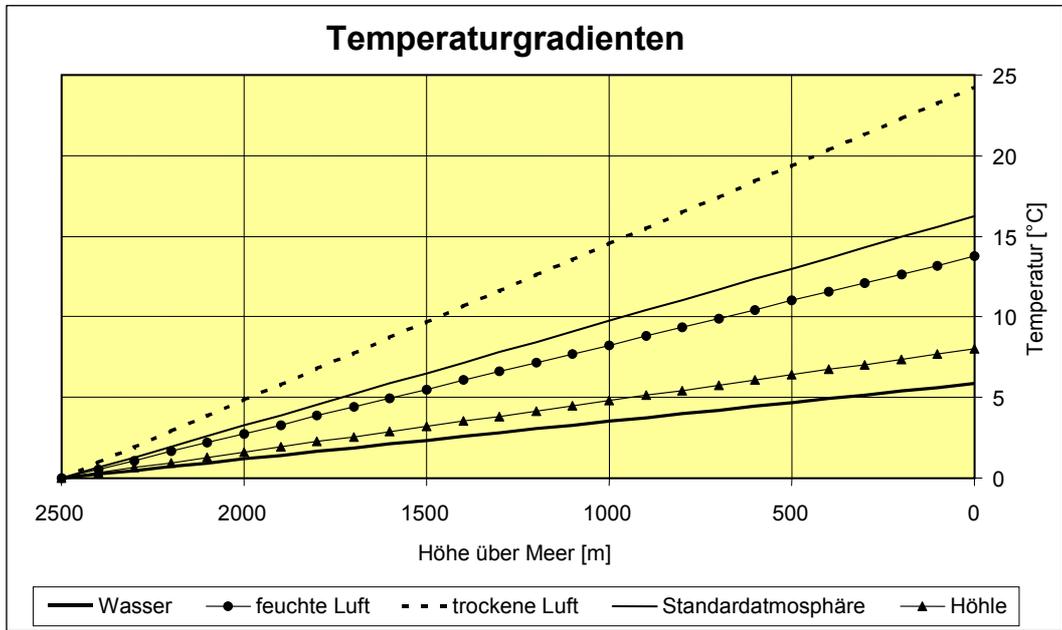
$$G_{\text{Wasser}} = g / c_{\text{Wasser}} = -2.34 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{km}$$

Temperaturgradient von Höhlen

Der Temperaturgradient von **Höhlen** hängt vom Mischungsverhältnis der feuchten Höhlenluft (Gradient = -4 bis -6.5 °C/km) und dem Wassergehalt der Höhle ab und beträgt -3 bis -3.5 °C/km (experimentell bestimmt).

Oft verwendete Näherungen für die Temperaturgradienten

* Standardatmosphäre	-6.5 °C/km
* trockene Luft	-9.7 °C/km
* feuchte Luft	-4 bis -6.5 °C/km
* Höhlenluft	-3 bis -3.5 °C/km

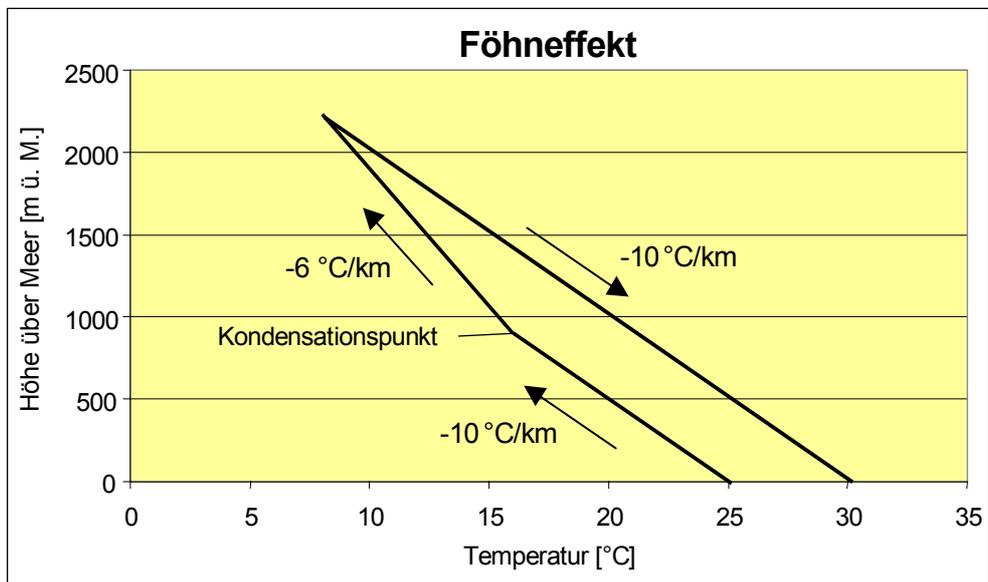


Erwärmen der Luft durch Steigen und Fallen ⇔ Föhnwind

„Trockene“ Luft (d.h., noch weit entfernt von der Sättigung) steigt auf der Südseite der Alpen auf und kühlt sich mit 10 °C/km ab. Ist der Taupunkt (wenn die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist) erreicht, fällt Regen. Die Temperatur sinkt beim weiteren Aufsteigen mit dem Gradienten von feuchter Luft, d.h. nur noch etwa 6 °C/km.

Fällt die Luft auf der Nordseite der Alpen wieder zu Tale, ist sie trocken und erwärmt sich wieder um 10 °C pro Kilometer Fall und gibt den warmen Föhn-Wind.

Die latente Energie des Wasserdampfs in der Luft hat sich in Wärmeenergie umgewandelt.



Luftdruck

Der Luftdruck gehorcht der hydrostatischen Grundgleichung: $\Delta P = -\rho_{(z)} * g * \Delta z$

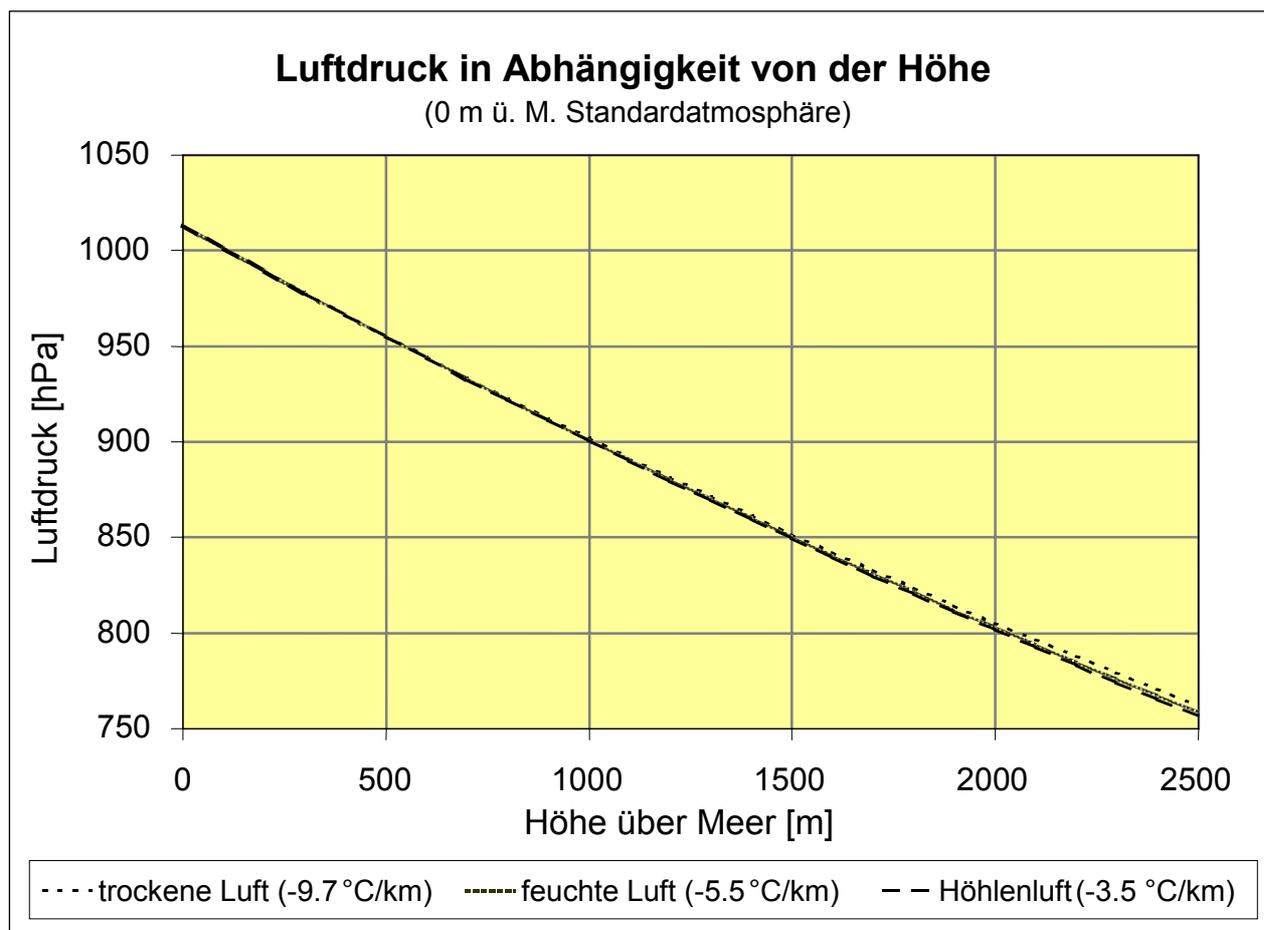
Druckschwankungen können jahreszeitliche, tägliche oder auch kürzere Zyklen haben. Die kurzfristigen sind aufgrund der Intensität pro Zeiteinheit wichtig.

In der barometrischen Höhenformel für eine polytrope Atmosphäre (mit Wärmeausgleich mit der Umgebung), ist der Luftdruck eine Funktion der Höhe und des Temperaturgradienten, wobei der letztere eine sehr unbedeutende Rolle spielt.

$$P_{(z)} = P_0 \left(1 - \frac{G * z}{T_0} \right)^{\frac{g}{287.03 * G}}$$

Wobei:

- P = Druck [Pa] ΔP = Druckdifferenz [Pa]
- $\rho_{(z)}$ = Luftdichte auf der Höhe z [kg/m^3]
(Für unsere Ansprüche ist $\rho_{(z)}$ etwa konstant)
- g = Fallbeschleunigung [9.81 m/s^2]
- z = Höhe [m] Δz = Höhendifferenz [m]
- G = Temperaturgradient [$^{\circ}\text{C/m}$]



Höhlentemperatur

In diesem Kapitel wenden wir uns der Lufttemperatur in Höhlen zu, dabei lassen wir Spezialfälle wie Kaltluftseen oder Warmluftsäcke ausser Betracht.

Die Temperatur

Die Temperatur ist eine Eigenschaft, die den thermischen Zustand eines Systems bzw. Körpers beschreibt. Der physikalischen Definition zufolge ist die Temperatur eine Zustandsgrösse, die Systeme oder Körper im sogenannten thermodynamischen Gleichgewicht charakterisiert. Der physikalische Begriff „Temperatur“ entstand, als man Wärmeunterschiede von Körpern messen wollte. Man erkannte, dass ein Körper (solange er nicht schmilzt oder siedet) heisser wird, wenn man ihm Wärme zuführt. Haben zwei Körper unterschiedliche Temperaturen und befinden sie sich in engem Kontakt miteinander, so fliesst Wärme vom heisseren zum kühleren Körper, bis beide dieselbe Temperatur haben. Dann ist ein thermisches Gleichgewicht erreicht.

Die Temperatur im Mikroskopischen:

Die Atome und Moleküle aller Stoffe weisen eine ständige, ungeordnete Bewegung auf. Führt man dem Stoff Wärme zu, verstärkt sich die Bewegung, entzieht man ihm Wärme, so wird die Bewegung schwächer.

Somit ist die Temperatur eines Körpers also ein Mass für die Bewegung seiner Atome und Moleküle.

Temperaturskalen

Heute sind mehrere, verschiedene Temperaturskalen in Gebrauch:

- Die **Celsiuskala** [°C] mit einem Gefrierpunkt von Wasser bei 0 °C und einem Siedepunkt bei 100 °C (jeweils bei Normaldruck) ist auf der ganzen Welt weit verbreitet, besonders im wissenschaftlichen Bereich.
- Die **Fahrenheitkala** wird in englischsprachigen Ländern im nichtwissenschaftlichen Bereich verwendet.
- Null **Kelvin** [K] entspricht -273.15 °C und ist definiert durch die „Temperatur“, bei der die Atome und Moleküle keinerlei Bewegung mehr aufweisen. Praktisch kann dieser absolute Nullpunkt nicht erreicht werden. Die Grösse einer Kelvineinheit entspricht einem Grad Celsius.

In der Meteorologie verwendet man in der Regel Grad Celsius, in der Thermodynamik Kelvin.

Wärme ⇔ Temperatur

Der Begriff der Temperatur muss deutlich vom Begriff der Wärme unterschieden werden.

Die Temperatur ist eine Eigenschaft und beschreibt den Wärmezustand des betreffenden Körpers. In einem Gleichgewichtssystem nimmt sie überall denselben Wert an. Dagegen ist Wärme eine Energiemenge, die sich in den Körpern befindet oder aufgrund einer Temperaturdifferenz zwischen ihnen fliesst.

Wärme ist die Übertragung von Energie aufgrund eines Temperaturunterschiedes. Wärme ist Energie im Übergang. Sie fließt immer von einer Substanz mit höherer Temperatur zu einer Substanz mit niedrigerer Temperatur. Dabei erhöht sie die Temperatur der letzteren und senkt die der ersteren, vorausgesetzt, dass das Volumen der Körper gleich bleibt.

Da Wärme eine Energieform ist, wird sie auch in Energieeinheiten beschrieben:

$$1 \text{ Joule [J]} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ m}^2\text{kg/s}^2$$

Das Joule [J] ist die Arbeit, die verrichtet wird, wenn eine Kraft von einem Newton einen Gegenstand um einen Meter anhebt.

1 Newton = mkg/s^2 = Kraft von einem Kilogramm im Schwerfeld der Erde.

(Beispiel: Eine Tafel Schokolade (0.1 kg) wird 1000 Meter gehoben. Die Fallbeschleunigung ist 10 m/s^2
 $\Rightarrow 0.1 \text{ kg} * 10 \text{ m/s}^2 * 1000 \text{ m} = 1000 \text{ J}$.

Dieselbe Arbeit wäre nötig, um die Temperatur von 1 kg trockene Luft um $1 \text{ }^\circ\text{C}$ zu erhöhen.)

Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung findet durch drei Prozesse statt: Die ersten beiden sind Wärmeleitung (z.B. Herdplatte \rightarrow Pfanne) und Wärmestrahlung (z.B. Sonne \rightarrow Erde). Der dritte Prozess, der die Bewegung von Materie einschliesst, wird als Konvektion bezeichnet (z.B. Heizung).

Wärmeleitung erfordert physischen Kontakt zwischen Körpern unterschiedlicher Temperatur. Strahlung hingegen erfordert keinen Kontakt der Körper, auch nicht die Anwesenheit von Materie zwischen den Körpern. Konvektion beruht auf der Bewegung einer Flüssigkeit oder eines Gases, das Kontakt zu Materie mit unterschiedlicher Temperatur hat.

Hauptsätze der Thermodynamik

Energieerhaltungssatz

In einem geschlossenen System bleibt die Gesamtenergie konstant. Die einzelnen Energieformen können sich ineinander umwandeln.

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} + U = 0.5 * m * v^2 + m * g * h + U$$

Wobei:

E_{tot} = Gesamtenergie [J]

E_{pot} = potentielle Energie [J]

E_{kin} = kinetische Energie [J]

U = innere Energie [J]

v = Geschwindigkeit [m/s]

g = Fallbeschleunigung [9.81 m/s^2]

m = Masse [kg]

h = Höhe [m]

Erster Hauptsatz

Die Änderung der inneren Energie eines Systems ist gleich der aufgenommenen Wärme plus der äusseren Arbeit, die an dem System geleistet wird.

$$\Delta U = Q + W$$

Wobei: U = innere Energie [J]

Q = Wärme [J]

W = Arbeit [J]

Zweiter Hauptsatz

Die wahrscheinlichsten Vorgänge, die in einem isolierten System ablaufen, sind jene, bei welchen die Entropie (Unordnung) entweder zunimmt oder konstant bleibt.

Anwendungen der Wärmelehre auf die Höhlen

Weshalb ist die Lufttemperatur in Höhlen beinahe konstant?

In Höhlen ist die Lufttemperatur beinahe konstant, da die Wärmekapazität (siehe auch Kapitel „Die Luft“) des Systems hoch ist.

Wärmespeicher sind Luft, Wasser und Fels mit folgenden Wärmekapazitäten:

trockene **Luft** $\sim 1000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ wassergesättigte Luft $\sim 1050 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
Wasser als Höhlengewässer $\sim 4200 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
Fels (Kalkstein) $\sim 800 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

Das beteiligte Volumen des Felsens hängt im wesentlichen von der Kontaktzeit Fels-Luft ab. Je länger die Kontaktzeit, desto wichtiger wird der Einfluss des Felsens, desto tiefer gelangt die Wärme in den Fels.

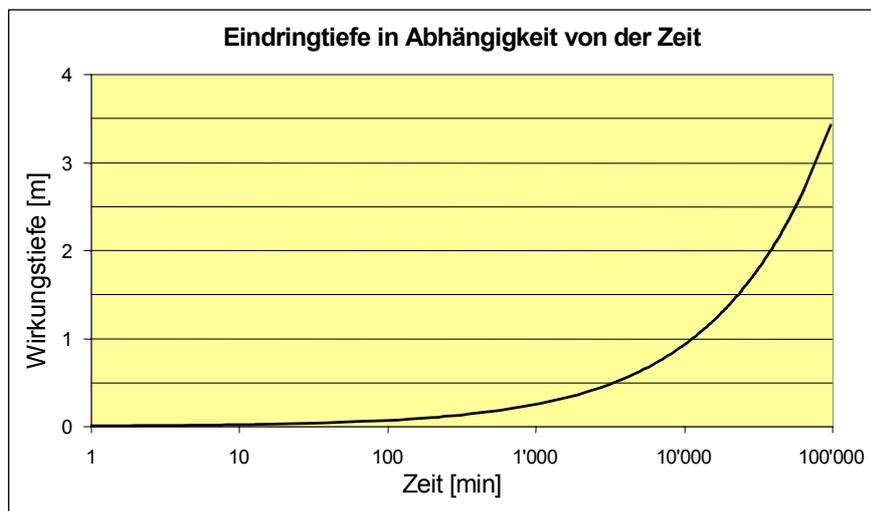
Abschätzung der **Eindringtiefe**:
$$L = \sqrt{\frac{2a \cdot t}{C_{\text{Fels}} \cdot \rho}}$$

Eindringtiefe der Wärme in den Fels in Abhängigkeit von der Zeit			
Zeit t	15 min.	12 h	100 d
Tiefe L	0.04 m	0.3 m	4 m

Wobei:

- L = Bereich des Felsens, der beteiligt ist (Wirkungstiefe) [m]
- a = Wärmeleitfähigkeit des Gesteins [Kalkstein in der Regel 2 - 2.3 W/(m*K)]
- t = Kontaktzeit [s]
- C_{Fels} = Wärmekapazität des Felsens [J/(kg*K)]
- ρ = Dichte des Gesteins ($\sim 2600 \text{ kg/m}^3$)

Der Einfluss des *Felsens* wird *relevant*, wenn $S \cdot 1200 \sqrt{t} > C_{\text{Luft}} + C_{\text{Wasserfilm}} + C_{\text{Wasser}}$, wobei: S = Kontaktfläche Luft-Fels



Schlussfolgerung:

Der Temperaturengleich der Höhlenluft

- mit dem Wasser an den Höhlenwänden: schnell, da die Oberfläche sehr gross ist.
- mit der Luft: schnell.
- mit dem Höhlengewässer: kommt auf die Oberfläche an.
- mit dem Fels: sehr langsam, das heisst, erst nach einigen Minuten.

Weshalb ist es in Bergwerken warm, während es in Höhlen kalt ist?

Höhlen, in zerklüfteten Gesteinen, werden permanent von kaltem Wasser durchflossen, das die Erdwärme ständig abtransportiert. In Bergwerken und Tunnels fehlt dieser Wasserfluss meistens.

Der Wasserfluss von aussen hat über geologische Zeiträume die Temperatur des Felsens in Karstgebieten ungefähr auf seine Jahresmitteltemperatur des Niederschlages auf der entsprechenden Höhenlage gesenkt. Das Wasser, das in Bergwerken anzutreffen ist, „steht“ meistens und befindet sich im thermischen Gleichgewicht mit dem Umgebungsgestein. Die Temperatur steigt dort mit zunehmender Tiefe schnell an (geothermischer Tiefengradient: -33 °C/km).

Zu erwähnen sei auch, dass dem Karst durch die Lösung von Kalk Energie entzogen wird. Dieser Betrag ist auf den ersten Blick nicht sehr gross, doch in geologischen Zeiträumen kommt eine beachtliche Energiemenge zusammen.

Hinzu kommt, dass der Karstaquifer („Karstgrundwasser“) den geothermischen Wärmefluss („Erdwärme“: ca. 67 mW/m^2) aufnimmt und abführt, so dass die Erdwärme keine wesentliche Bedeutung mehr hat (Abschirmungseffekt, vgl. Kapitel „Energiehaushalt des Karstes“).

Zu den Temperaturgradienten: Siehe Kapitel „Die Luft“.

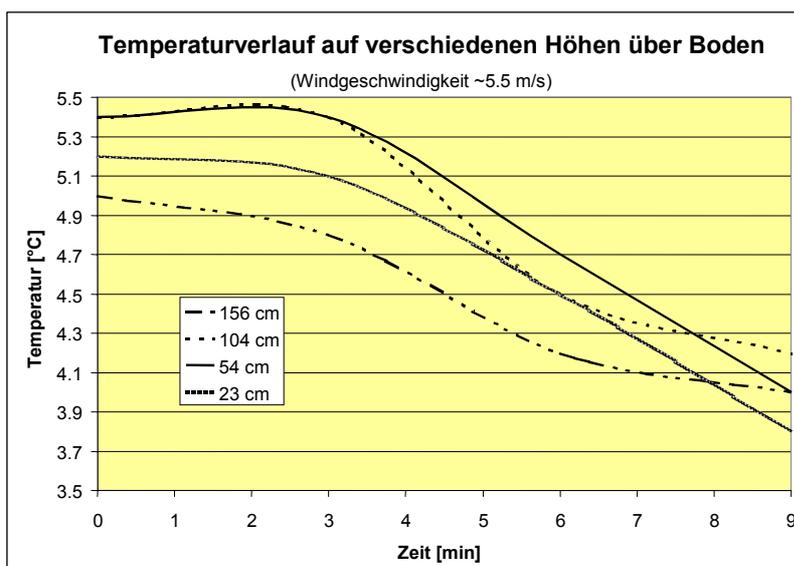
Weshalb ist die Luft in den Höhlen etwas wärmer als das Wasser?

Die Höhle ist kein isoliertes System. Die Luft in den Höhlen ist einige Zehntel Grad wärmer als das Wasser, weil wir einen Wärmefluss von aussen haben. Das thermische Ungleichgewicht ist gebunden an eine Wärmezufuhr von ausserhalb ins System.

Im wesentlichen geht es darum, dass die Luft eine rund 4 mal kleinere Wärmekapazität als das Wasser hat und daher stärker auf Wärmezufuhr von ausserhalb des Systems reagiert.

Ist die Temperatur in einem Raumprofil überall gleich ?

Nein !



Strömt die Luft im Profil *laminar*, entstehen Luftschichten gleicher Dichte (gleicher virtueller Temperatur, vgl. Kapitel „Die Luft“), die untereinander in ständigem Energieaustausch sind.

Ist die Luftströmung im Profil *turbulent*, haben wir ebenfalls eine Temperaturschichtung, die jedoch durch die turbulente Strömung vertikal verschoben werden kann.

Der Einfluss des Wassers in der Höhle und des Felsens auf eine Luftschicht hängt vom Abstand davon ab.

Was sagen Temperaturschwankungen in Höhlen aus?

Jede bewegte Luftsäule in einem Berg hat ihre eigene Geschichte, geprägt durch:

- den Kontakt mit Wasser.
- den Kontakt mit der Höhlenwand.
- den Luftdruck-Unterschied zwischen den verschiedenen Höhleneingängen.

Durch den Druckunterschied wird die feuchte Luftmasse durch die Höhle bewegt. Die Luft hätte ohne Kontakt mit dem Wasser in der Höhle und den Höhlenwänden einen Temperaturgradienten von -5 °C/km . Wegen dem Wärmetransfer mit dem Wasser und den Höhlenwänden beobachten wir jedoch oft einen Wert zwischen -3 und -4 °C/km . Die Details dieser Kondensations- und Diffusionsphänomene hängen ab von der Intensität des Kontakts und der Verweilzeit und lassen sich mit dem heutigen Wissensstand noch nicht genügend genau berechnen.

Die Temperaturdifferenz zwischen zwei Orten in der Höhle ist meistens klein. Brüske Temperaturschwankungen stehen oft in Zusammenhang mit wichtigen Wasser- oder Luftzuflüssen, die das Auffinden von neuen Höhlengängen in einem System vereinfachen können.

Zwei Luftströme können verschiedene Temperaturen aufweisen,

- weil das Wasser, das in zwei Gängen fliesst, auch wenn es dieselbe Anfangstemperatur hatte, als es in den Untergrund versickerte, verschiedene Wege zurückgelegt hat. Die Temperaturgradienten werden durch die Wechselwirkung mit der Höhlenluft und dem Fels beeinflusst. (z.B. schnelles Fliesen in einer Röhre mit geringem Temperaturengleich oder langsames Fliesen in einer Fuge mit grossem Temperaturengleich mit der Umgebung.)

oder

- weil das eintretende Wasser nicht dieselbe Temperatur hatte.

Analyse der Temperatur eines aus der Höhle fliessenden Luftstroms

Eine wichtige Eigenschaft von grossen Höhlen ist, dass die Lufttemperatur in jedem Ort von der Struktur der ganzen Höhlenanlage abhängt.

Dies gilt vor allem für die Höhlenausgänge: Die Temperatur des aus der Höhle fliessenden Luftstroms ist durch die Summe aller Prozesse in der Höhle gegeben und hängt vor allem von der Temperatur des zirkulierenden Wassers ab. Dabei sind die Temperaturen von Höhlenluft und Höhlenwasser annäherungsweise gleich.

Die Temperatur des Wassers setzt sich zusammen aus der Anfangstemperatur, mit dem es in den Untergrund versickerte, plus die gewonnene Wärme durch den Verlust an potentieller Energie, also rund -2.3 °C/km (siehe „adiabatischer hydrischer Gradient“, Kapitel „Die Atmosphäre“).

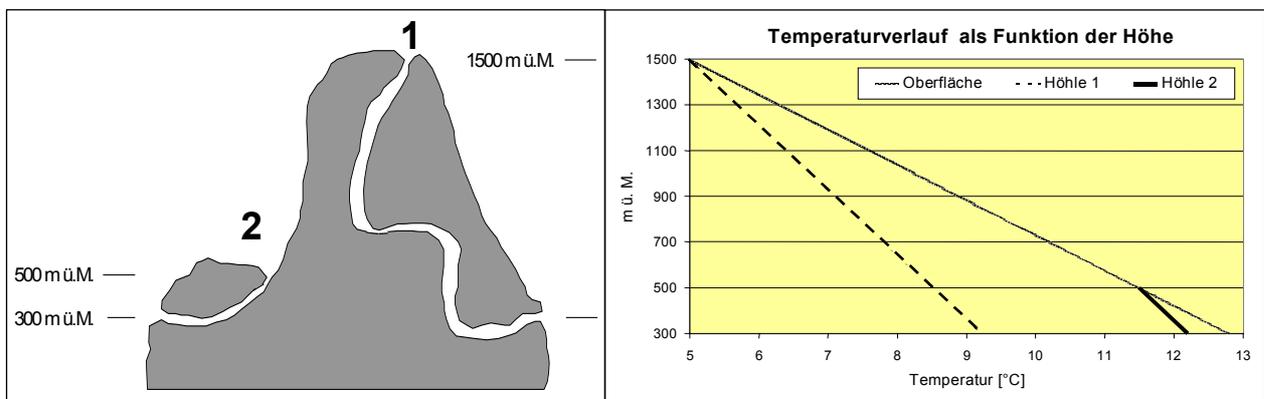
Durch die Temperatur der aus einer Höhle strömenden Luft lässt sich die Höhenlage des meteorologischen Einganges (vgl. Kapitel „Der Höhlenwind“) ableiten:

- Eine Höhle, die vom Rest des Berges hydrologisch isoliert ist, hat etwa die mittlere Temperatur des Niederschlags auf jener Höhenlage (~ gleich der Jahresdurchschnittstemperatur).
- Höhlen, die nicht zu einem grossen System gehören, haben höhere Temperaturen als jene, die auf derselben Höhenlage zu einem System mit vertikaler Ausdehnung gehören.

Beispiel zur Analyse der Temperatur eines aus der Höhle fließenden Luftstroms

Annahmen: Wassertemperatur auf 1500 m ü. M. = 5 °C
 Der Temperaturgradient in der Höhle sei -3.5 °C/km
 Der Temperaturgradient der Aussenluft und des damit im Gleichgewicht stehenden Wassers sei -6.5 °C/km
 Wasser- und Luft-Temperatur seien ähnlich (im Gleichgewicht)

	Höhle 1	Höhle 2
Wassereintritt auf	1500 m ü. M.	500 m ü. M.
Der untere Eingang liege auf	300 m ü. M.	300 m ü. M.
Temperatur am unteren Eingang:	$5 + 3.5 \cdot (1.5 - 0.3)$ = 9.2 °C	$5 + 6.5 \cdot (1.5 - 0.5) + 3.5 \cdot (0.5 - 0.3)$ = 12.2 °C



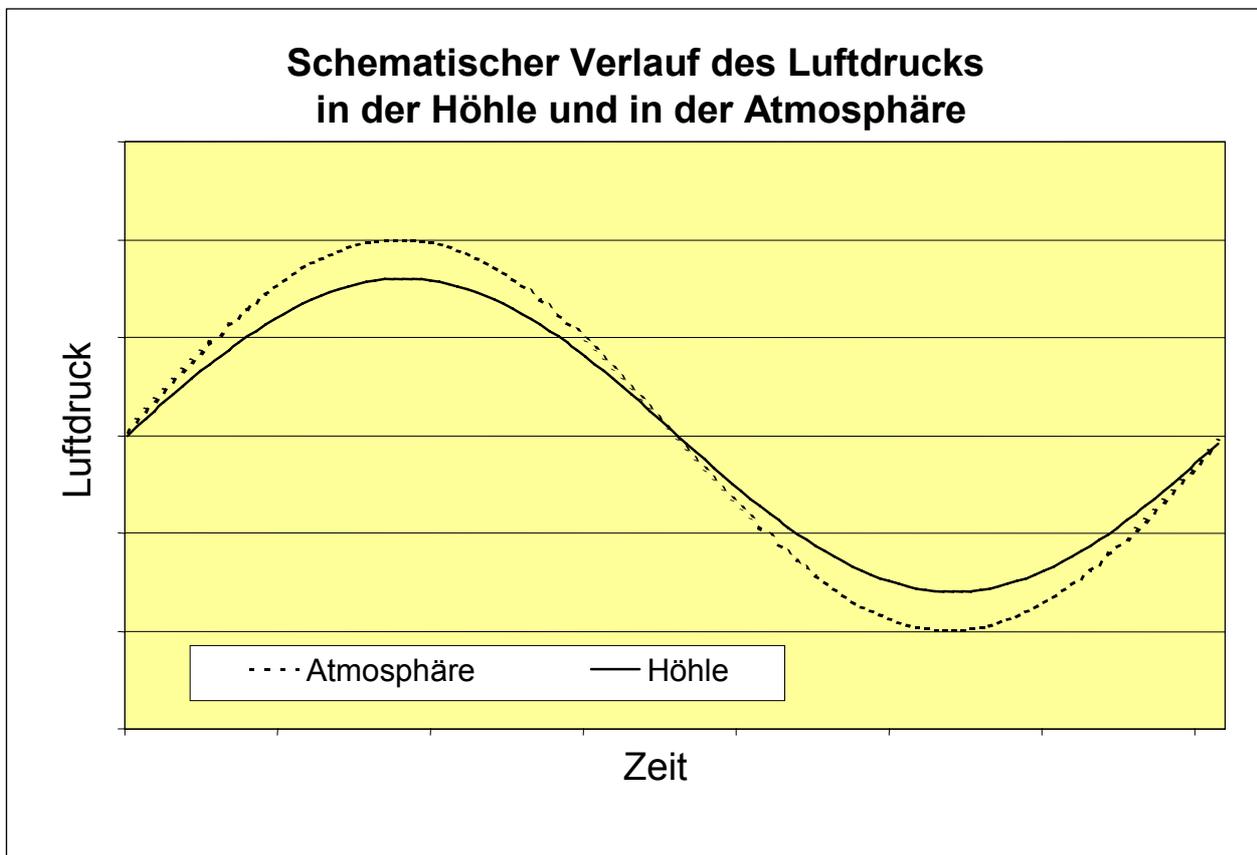
Zusammenfassung - Höhlentemperatur

- Der Karst hat mehr oder weniger die Temperatur des Wassers, das ihn durchfließt.
- Der Temperaturgradient im Karst wird von jenem des Wassers dominiert.
- Kleine, keinem System angehörende Höhlen haben ungefähr die Jahresdurchschnittstemperatur des auf der Höhenlage versickernden Wassers (~ Jahresdurchschnittstemperatur der Luft).
- Der Unterschied zwischen den Temperaturgradienten der Höhlenluft und des Wassers hängt ab:
 - von der Durchschnittstemperatur des eintretenden Wassers.
 - vom Massenverhältnis Wasser/Luft
 Je mehr Luft es hat, desto höher (luftähnlicher) ist der Temperaturgradient.

Der Luftdruck in Höhlen

Der Luftdruck in der Höhle folgt dem Verlauf des Luftdrucks der Atmosphäre, mit einer für jede Höhle typischen Verzögerungszeit, die wir später im Kapitel Höhlenwind als „Charakteristische Zeit T_c “ bezeichnen werden. In der Regel sind die „Barometerausschläge“ in der Höhle weniger stark als ausserhalb, da die Höhle unter anderem wegen der „Charakteristischen Zeit“ als Dämpfer wirkt.

Der Gradient des Luftdruckes in der Höhle ist jedoch nicht ganz gleich wie jener ausserhalb: Bedingt durch die meist höhere Luftfeuchtigkeit ist der Temperaturgradient tiefer; dazu kommt der Widerstand der Höhlengänge, etc. Als Annäherung können wir den Luftdruck in der Höhle und denjenigen ausserhalb als ähnlich betrachten (vgl. Formel und Grafik „Luftdruck in Abhängigkeit von der Höhe“; Kapitel: „Die Atmosphäre“).



Kann ich die Tiefe einer Höhle mit einem Höhenmesser messen?

Ein Höhenmesser ist im wesentlichen nichts anderes als ein Barometer. Die Messung des Luftdrucks wird durch eine Skala, in der "X" Millibar "Y" Metern über Meer entsprechen, in eine Höhe über Meer konvertiert. Diese Skala hält sich in der Regel an die Standardatmosphäre.

Die Höhlenatmosphäre entspricht nicht genau der Standardatmosphäre, doch ist der Unterschied klein. Deshalb lässt sich ein Höhenmesser durchaus unter Tag verwenden.

Folgende Fehlerquellen sind jedoch zu beachten:

1. Die Höhenmesser sind temperaturempfindlich. Fehler entstehen durch den Temperaturunterschied zwischen ausserhalb, wo wir das Gerät kalibrieren (einstellen), und innerhalb der Höhle, wo wir messen. Der Fehler variiert von Gerät zu Gerät und kann erheblich sein (bis zu ± 30 m).

Wie hilft man sich? - Höhenmesser auf Höhlentemperatur kalibrieren.

2. Eine offensichtlichere Fehlerquelle ist die Variation des Luftdruckes durch das Wettergeschehen, der bis zu ± 200 m in 10 Stunden ausmachen kann. In kürzeren Zeitintervallen können die Fehler pro Zeiteinheit leicht höher sein ± 30 bis ± 40 m in einer Stunde. Dies kann vorkommen, wenn grosse Wetterstörungen über das Karstfeld ziehen. In der Regel wird der Fehler jedoch selten mehr als ± 30 m betragen.

Wie hilft man sich? - Beim Abstieg und beim Aufstieg messen und dann mitteln. Noch besser wäre es, einen Höhenmesser ausserhalb der Höhle zu plazieren, dessen Verlauf notiert wird, damit die Messungen in der Höhle korrigiert werden können (Nicht vergessen, jeweils die Zeit der Höhenmessungen in der Höhle zu notieren). Aber auch damit haben wir den Dämpfungseffekt der Höhle (Charakteristische Zeit T_c) nicht berücksichtigt. Die Gewichtung dieses Fehlers müssen wir bei jeder Höhle separat beurteilen.

3. Eine weitere Fehlerquelle ist das nicht konstante Luftdruckprofil der Atmosphäre. Dieses Problem ist schwierig zu umgehen, fällt jedoch nicht allzu stark ins Gewicht. Im Sommer wird die Höhe leicht zu tief angegeben, im Winter etwas zu hoch.
4. In der Höhle gibt es noch eine Fehlerquelle: Den *Höhlenwind*. Er kann kleine Luftdruckschwankungen hervorrufen, aber dieser Fehler ist - verglichen mit den anderen - meist unbedeutend, sofern wir uns nicht in einer Engstelle mit starkem Luftzug befinden.

Der Höhlenwind

In diesem Kapitel betrachten wir die Luftzirkulation in Höhlensystemen. Dabei beschränken wir uns auf die allgemeinen Luftbewegungen und lassen die Spezialfälle wie Luftbewegungen angekurbelt durch einen Wasserfall oder durch einen Höhlenbach ausser acht.

Der Höhlenwind hat zwei Antriebe:

konvektive Luftzirkulation Luft in der Höhle hat eine mehr oder weniger konstante Dichte und damit auch eine konstante virtuelle Temperatur, jene der Aussenatmosphäre variiert => Steigen oder Sinken der Höhlenluft

barometrische Luftzirkulation Druckausgleich zwischen Aussenatmosphäre und Höhlenatmosphäre

Bemerkung: In der Regel hat jedes Höhlensystem sowohl konvektive als auch barometrische Luftzirkulation!

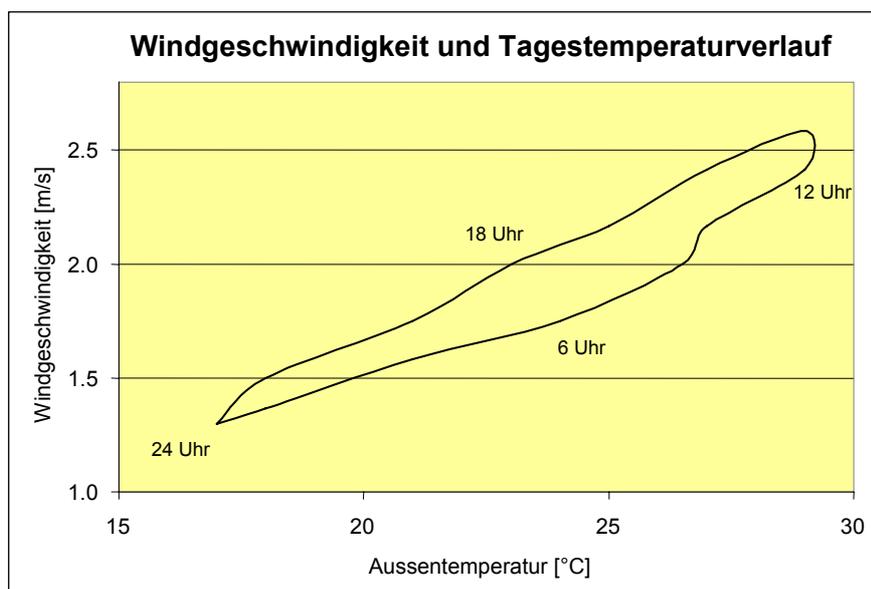
Konvektive Luftzirkulation

Kältere Luft ist dichter als warme und sinkt (und umgekehrt).

Luft, die aus dem tieferliegenden Ausgang ausströmt, muss oben in gleichem Volumen nachgesehen werden (und umgekehrt).

Bewegungswirksamer Druck $P_M = (\rho_{INNEN} - \rho_{AUSSSEN}) * g * \Delta z$

Pinargözü-Höhle, Türkei (nach Bakalowiz, 1972)



Windgeschwindigkeit (turbulentes Fließen)

Die Windgeschwindigkeit stellt sich ein als Gleichgewicht des bewegungswirksamen Drucks und dem Druckverlust durch den Widerstand der Höhle (siehe weiter unten).

$$v^2 = \frac{2 * D * (\rho_{INNEN} - \rho_{AUSSEN}) * g * \Delta z}{f * L * \rho_{INNEN}} \qquad v^2 \approx \frac{2 * D * \Delta T_V * g * \Delta z}{f * L * T_{Innen}}$$

Wobei: P_M = bewegungswirksamer Druck [Pa]
 ρ = Dichte der Luft [kg/m^3]
 g = Fallbeschleunigung [9.81 m/s^2]
 z = Höhe [m]
 v = Geschwindigkeit [m/s]
 D = mittlerer Durchmesser für Gänge; mittlere Breite für Klüfte [m]
 f = Reibungskoeffizient (vgl. „Widerstand der Höhle“)
 L = Ganglänge [m]
 T_V = virtuelle Temperatur [K] (siehe Kapitel „Die Luft“)

Meteohoher und meteotiefer Eingang

Die Dichte der Höhlenluft (somit auch die virtuelle Temperatur) ist im allgemeinen über das Jahr hinweg mehr oder weniger konstant. Die Luft der Aussenatmosphäre hat grosse tägliche und jahreszeitliche Schwankungen.

Dichtere (kältere) Luft fällt, während die weniger dichte (wärmere) steigt, um die fallende oben zu ersetzen. Im Sommer fällt normalerweise die Luft in der Höhle, während sie im Winter steigt.

Meteohoch: Ein Eingang saugt im Sommer Luft an und stösst im Winter Luft aus.

Meteotief: Ein Eingang stösst im Sommer Luft aus und saugt im Winter Luft an

Diese Bezeichnungen kommen aus der Vorstellung, dass sich die Eingänge eines Systems oberhalb einer gewissen Höhenlage meteohoch verhalten, darunter meteotief.

Existiert ein intermediärer Höhleneingang zwischen dem meteohohen und dem meteotiefen Eingang?

Gibt es bei einem ausgedehnten Kalkberg voller Höhleneingänge eine Höhenlage, oberhalb derer sich alle Eingänge meteohoch, darunter meteotief verhalten?

Dazu müssten alle Eingänge Luft in einen Gang geringen Widerstands führen. Der maximale Widerstand würde in den Eingangsgalerien herrschen; danach kann die Luftsäule mit wenig Widerstand fließen. Eine solche Anlage kann nur in Höhlen sehr einfacher Struktur vorkommen. Die Antwort auf die eingangs gestellte Frage wäre also: Unwahrscheinlich!

Die „normale“ Situation ist, dass Orte grösseren Widerstandes in den inneren Teilen des Systems vorkommen. Dies führt oft dazu, dass das System in eine Vielzahl von Untersystemen aufgeteilt ist: Der Luftstrom kann beim Eingang A ins System eintreten und es beim Eingang B, der ein wenig tiefer liegt, wieder verlassen. Beim Eingang C (noch einiges tiefer) kann ein anderer Luftstrom in das System eintreten und beim Eingang D (nochmals tiefer) wieder ausströmen. Diese Situation herrscht vor, wenn die Untersysteme durch Galerien mit sehr hohen Widerständen kommunizieren.

Zu beachten ist die Bedeutung der Gänge mit hohen Widerständen. In der Regel handelt es sich um Engstellen mit starkem Luftzug.

Das heisst: - man gelangt in einen anderen Teil des Systems.
 - man gelangt nur durch diesen Gang in dieses Untersystem.

Kann es einen meteotiefen Höhleneingang am Gipfel geben?

Wir beobachten am Gipfel eines Berges einen Höhleneingang, der im Sommer Luft ausbläst. Was ist passiert?

- Die wahrscheinlichste Ursache ist, dass wir eine barometrische Luftbewegung (siehe unten) beobachtet haben.
- Eine weitere Möglichkeit ist, dass wir zu wenig gut inspiziert haben, oder der noch höher liegende Eingang nicht schließbar ist.

Gibt es Höhleneingänge, die immer Luft ausblasen?

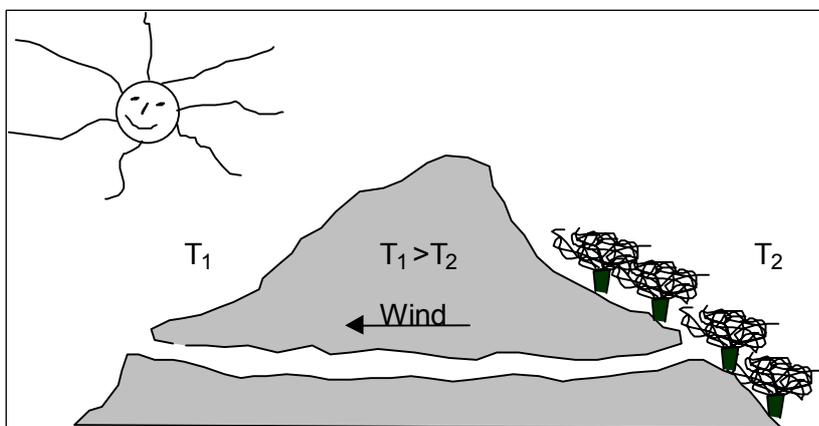
Theoretisch wäre dies möglich, doch fehlen konkrete Beobachtungen.

Dazu müsste eine der folgenden Bedingungen erfüllt sein:

- Im Winter werden die höher liegenden Höhleneingänge durch Schnee geschlossen (dies wäre die wahrscheinlichste Möglichkeit).
- Zwei Subsysteme sind durch zwei, was den Luftfluss betrifft, stark verschiedene Verbindungsgänge verbunden.

Ist eine konvektive Luftzirkulation zwischen zwei Höhleneingängen auf derselben Höhenlage möglich?

Bis hierhin haben wir Temperaturdifferenzen jeweils unter dem Aspekt des Temperaturgradienten betrachtet. Wir haben ausser acht gelassen, dass Luft lokal erwärmt werden kann, zum Beispiel über einer dunklen Erdoberfläche. Solche Situationen können bei kleinen Höhlensystemen ebenfalls konvektive Luftzirkulation verursachen. Liegt zum Beispiel der eine Eingang eines Höhlensystems in einem Waldstück im Schatten eines Berges und der andere Eingang auf derselben Höhenlage, jedoch in einem der Sonne zugewandten Karrenfeld, wird sich tagsüber ein Höhlenwind vom Eingang im Wald zu jenem im Karrenfeld einstellen. Der dazu notwendige Temperaturunterschied kann wie bei der „normalen“ konvektiven Luftzirkulation durch $\Delta T_{\text{konv}} = 3+6 \cdot \Delta z$ abgeschätzt werden (siehe weiter unten). Wobei Δz hier die Ganglänge zwischen den beiden Höhleneingängen bezeichnet.



Barometrische Luftzirkulation

Beachte, dass es möglich ist, aus den folgenden Formeln das Volumen des Hohlraums zu berechnen, der bei der Luftzirkulation beteiligt ist.

Zustandsgleichung (bei T = konstant)
$$-\frac{\Delta P}{P_{Innen}} = \frac{\Delta V}{V}$$

Die prozentuale Druckzunahme ist gleich der prozentualen Volumenzunahme und umgekehrt.

Der Luftfluss

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V * \Delta P}{P_{Innen} * \Delta t}$$

Näherungen für das Berechnen des Luftflusses

- für **normale Druckschwankungen** der Aussenatmosphäre.

Grössenordnung von 0.001% in einigen Minuten ($\frac{\Delta P}{P} \approx 10^{-5}$):
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = 3 * 10^{-7} * V$$

- für eine **Schlechtwetterfront**.

Druckänderungen von ca. 0.1% in einigen Stunden ($\frac{\Delta P}{P} \approx 10^{-3}$):
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = 3 * 10^{-6} * V$$

Die Charakteristische Zeit T_c

Die Charakteristische Zeit, ist die Zeit, die die Höhle benötigt, um wieder ins Gleichgewicht mit dem Druck der Aussenatmosphäre zu gelangen.

$$T_c = \frac{\Delta V}{S * v}$$

- Wobei
- V = Volumen des Systems [m³]
 - ΔV = Volumen der ausströmenden Luft [m³]
 - P = Luftdruck [Pa]
 - ΔP = Druckschwankung [Pa]
 - t = Zeit [s]
 - T_c = Charakteristische Zeit [s]
 - S = Profil der geschwindigkeitsbestimmenden Höhlenpartie [m²]
 - v = Windgeschwindigkeit [m/s]

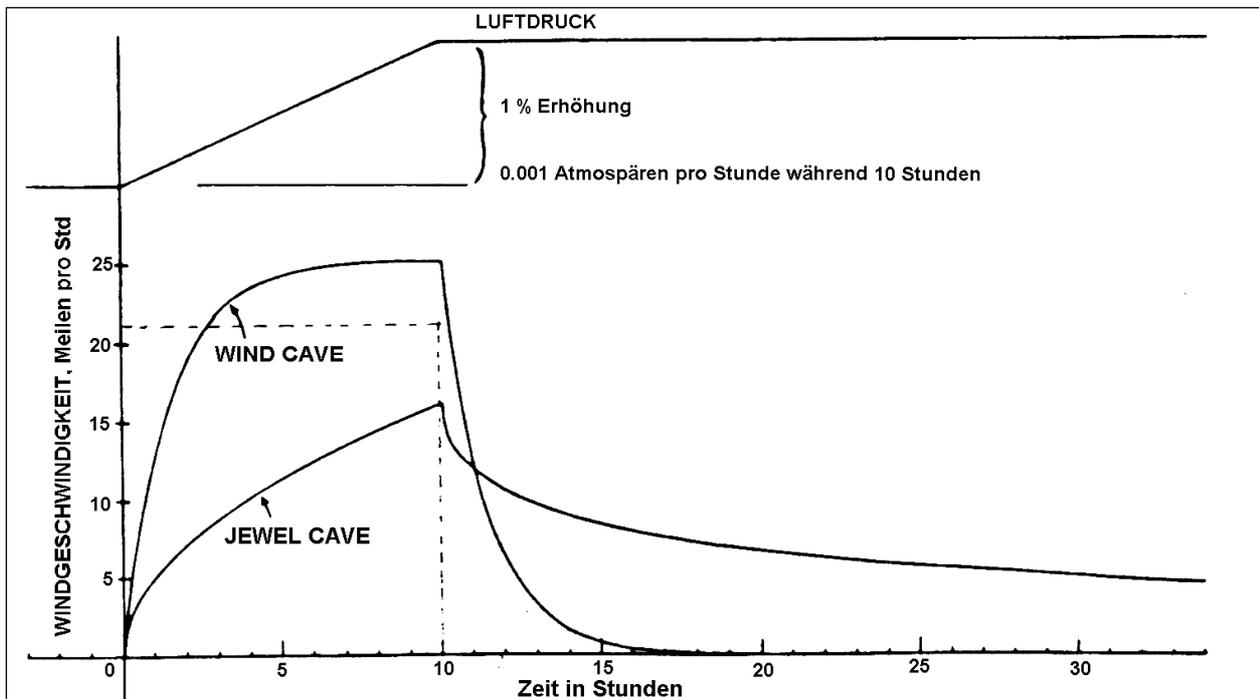
Ein Rechenbeispiel

Nehmen wir an, wir haben eine Höhle, deren Luftbewegung durch die barometrische dominiert wird. Hinter einem Eingang von 0.5 m^2 Profilfläche (S) liegt eine grosse Halle. Wir möchten wissen, wie gross das Volumen der Halle ist.

Wir messen, wenn gerade eine Schlechtwetterfront über das Karstgebiet zieht (Aussendruck fällt um 100 Pa , $\Delta P/P \sim 10^{-3}$; die Lufttemperatur bleibt unverändert). Die Höhle benötigt 15 Minuten, um auf das Niveau des Aussendrucks zu gelangen (T_c). Dabei hat der Höhlenwind eine mittlere Geschwindigkeit (v) von 0.1 m/s .

In dieser Zeit hat $(15 \cdot 60) \cdot 0.5 \cdot 0.1 = 45 \text{ m}^3$ Luft die Höhle verlassen (ΔV).

Über die Zustandsgleichung berechnen wir das Volumen der Höhle $45/0.001 = 45'000 \text{ m}^3$.



Windgeschwindigkeit bei Steigen des Atmosphärendrucks in zwei Höhlen von South Dakota (US) (verändert, nach Conn 1966)

Die Physik der Luftbewegung

Die Kontinuitätsgleichung

Stellen wir uns ein Medium (Luft oder Wasser) vor, das durch einen Gang mit Profilen verschiedener Querschnittflächen fließt, so gilt für zwei Punkte mit Querschnitt S_1 und S_2 :

$$\rho_1 * S_1 * v_1 = \rho_2 * S_2 * v_2$$

Für Flüssigkeiten gilt: $S_1 * v_1 = S_2 * v_2$, da Flüssigkeiten inkompressibel sind.

Die Bernoulli-Gleichung: $0.5 * \rho * v^2 + P + \rho * g * H = const.$

Die Bernoulli-Gleichung gilt, - wenn die Luftbewegung stationär ist
- wenn die Viskosität null ist

Wobei: S = Gangquerschnitt [m^2] ρ = Dichte [kg/m^3]
 v = Geschwindigkeit [m/s] P = Druck [Pa]
 g = Fallbeschleunigung [$9.81 m/s^2$] H = Enthalpie [J]

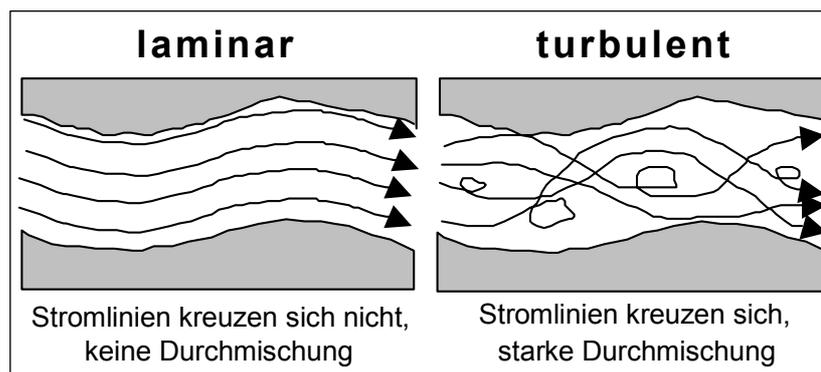
Arten des Fließens: laminar / turbulent

Flüssige und gasförmige Medien haben zwei grundlegende Strömungsformen, die sich anhand der Bahnen der Teilchen darstellen lassen (Stromlinien).

Im einfachsten Fall, der **laminaren Strömung**, verlaufen die Stromlinien parallel zueinander, ohne dass sich Schichten durchmischen oder Wirbel entstehen. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die langsame Bewegung von zähem, flüssigem Honig.

Die kompliziertere Form ist die **turbulente Strömung**, die ein verwirbeltes Muster von Stromlinien zeigt, wobei sich die Stromlinien vermischen, überkreuzen, gegenseitig beeinflussen und Strudel bilden. Schnelle Strömungen zeigen typischerweise diese Art von Bewegung.

Ob ein Fließen laminar oder turbulent ist, hängt von der Fließgeschwindigkeit, der Geometrie des strömenden Mediums (in erster Linie seiner Schichtdicke) und den physikalischen Eigenschaften des fließenden Stoffs ab. Je schmaler der durchflossene Gang und je langsamer das strömende Medium, desto eher erfolgt das Fließen laminar.



Die Reynold's Zahl R_e

Ob die Strömung laminar oder turbulent ist, hängt einerseits von der Viskosität und Dichte des Mediums ab, andererseits vom Gangdurchmesser und der Fließgeschwindigkeit.

Die Reynold's Zahl R_e gibt an, ob laminares oder turbulentes Fließen vorherrscht. Der Wechsel zwischen laminarem und turbulentem Fließen ist sehr abrupt:

$$R_e = \frac{Dv\rho}{\beta} \quad \text{laminar} < (R_e = 2000 - 2500) < \text{turbulent}$$

- Je grösser die Dichte, desto eher ist das Fließen turbulent (Masse dominiert).
- Je grösser die Viskosität, desto eher ist das Fließen laminar (Viskosität dominiert).
- => Je kleiner die Dichte, je viskoser das Medium, desto eher fließt es laminar.

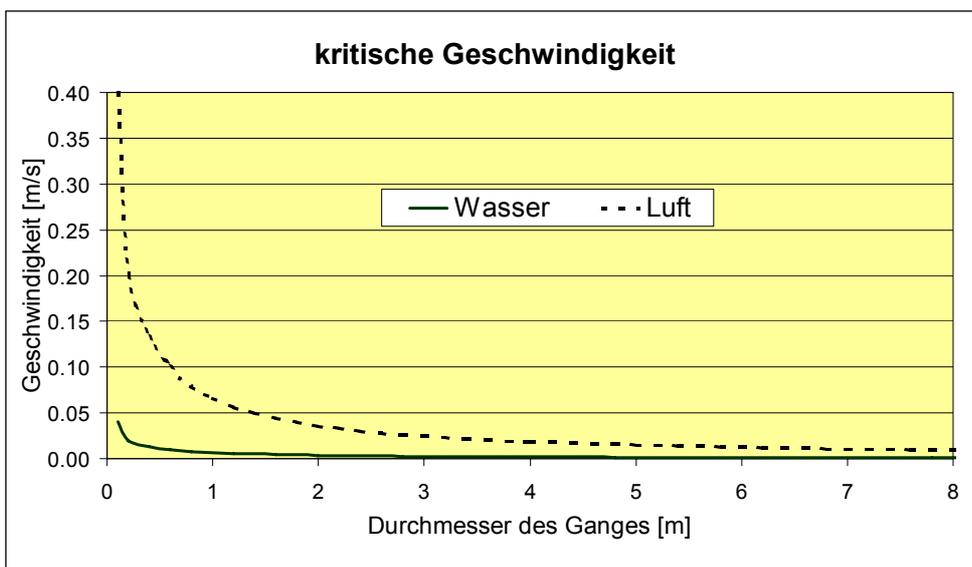
Die kritische Geschwindigkeit:

Über der kritischen Geschwindigkeit v_{krit} ist das Fließverhalten laminar, darunter turbulent. Sie kann mit folgenden Näherungen abgeschätzt werden:

$$\text{Wasser} \quad v_{krit} \approx \frac{0.004}{D} \quad \text{Luft} \quad v_{krit} \approx \frac{0.04}{D}$$

- Wobei: R_e = Reynold's Zahl
 D = Durchmesser des Ganges [m]
 v = Geschwindigkeit [m/s]
 v_{krit} = kritische Geschwindigkeit [m/s]
 ρ = Dichte [kg/m^3]
 β = Viskosität [Nsm^{-2}]

Die **Viskosität** ist die innere Reibung eines Mediums, die dem Fließen Widerstand entgegengesetzt. Je viskoser oder zähflüssiger ein Medium ist, desto langsamer fließt es. Die Viskosität ist auf die Anziehungskraft zwischen den Molekülen eines fließenden Stoffs zurückzuführen. Die Viskosität der meisten Medien nimmt mit steigender Temperatur ab. (vgl. auch Kapitel „Die Luft“)



Der Widerstand der Höhle

Im folgenden Abschnitt gilt:

- H_R = Widerstand eines Höhlenabschnittes [m]
- f = Reibungskoeffizient
- L = Ganglänge [m]
- v = Geschwindigkeit [m/s]
- D = Durchmesser des Höhlenganges [m]
- g = Fallbeschleunigung [9.81 m/s²]
- P = Druck [Pa]
- ρ = Dichte [kg/m³]
- K = winkelabhängiger Faktor
- R_e = Reynold's Zahl

Alle Formeln stammen aus Badino (1995)

Der Widerstand eines Höhlenganges hängt ab von:

- seiner Ganglänge
- seiner Gangform
- dem Durchfluss
- der Art des Fließens
- der Felsoberfläche

Der Widerstand eines Höhlenganges

$$H_R = \frac{fLv^2}{2Dg}$$

Der Reibungskoeffizient f

Der Reibungskoeffizient hängt davon ab, ob die Strömung laminar oder turbulent ist. Er ist also eine Funktion der Reynold's Zahl R_e .

Reibungskoeffizient bei turbulentem Fließverhalten ($R_e > 2300$)

- Für perfekte Röhren, die zum Beispiel in Eishöhlen vorkommen, oder für Gänge mit sehr grossen Dimensionen können wir den Reibungskoeffizienten näherungsweise ausdrücken durch:

$$f \approx \frac{0.316}{R_e^{0.25}}$$

- Für die üblichen Höhlengänge können wir annehmen : $f \approx 0.08$

Reibungskoeffizient bei laminarem Fließverhalten ($R_e < 2300$)

- Hier können wir den Reibungskoeffizienten ausdrücken durch: $f \approx \frac{64}{R_e}$

Reibungskoeffizient einer Höhle

- Für den Widerstand einer ganzen Höhle können wir $f \approx 1$ annehmen.

Der Widerstand der Richtungsänderung eines Höhlenganges

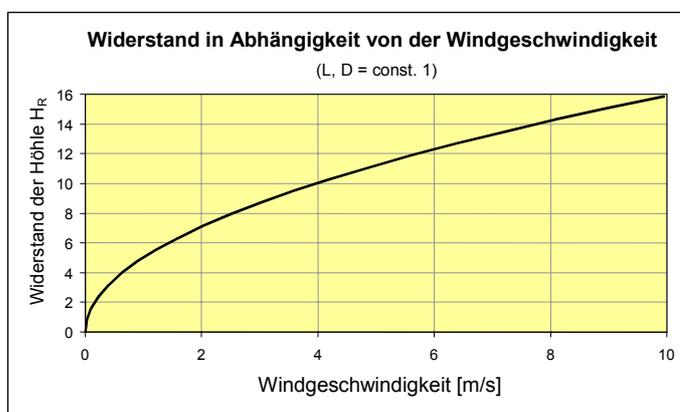
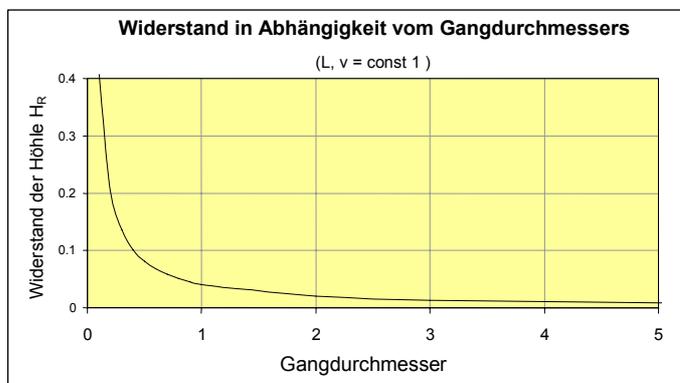
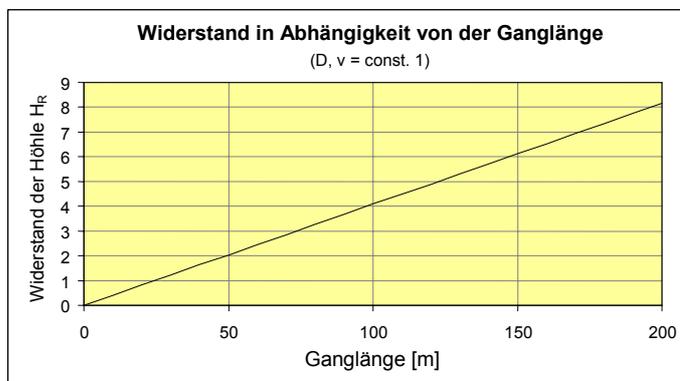
Die Richtungsänderung eines Höhlenganges bewirkt einen Widerstand von: $H_R = \frac{Kv^2}{2Dg}$

Dabei ist K (nach Giles, 1975)

Winkel	K
<90°	0.25 - 0.5
90°	1
T-Kreuzung	2

Der Widerstand und der Druckverlust

Der Widerstand eines Höhlenganges verringert den bewegungswirksamen Druck um: $\Delta P = \rho g H_R$

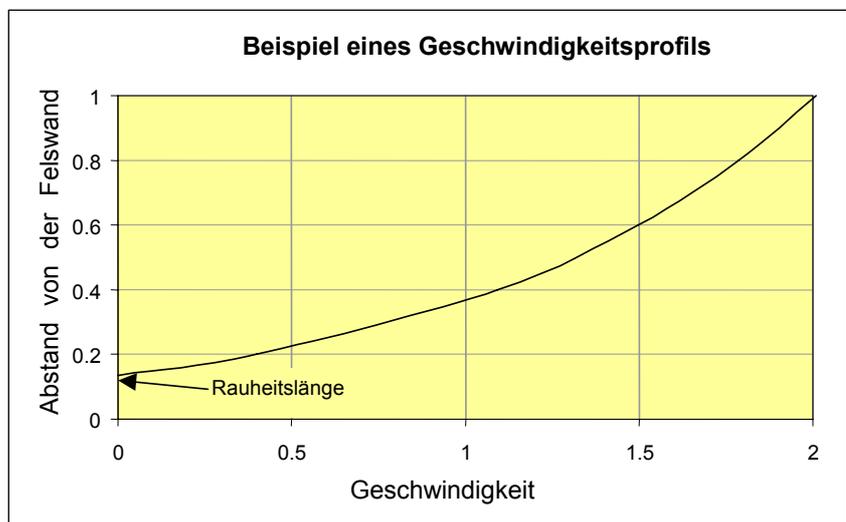
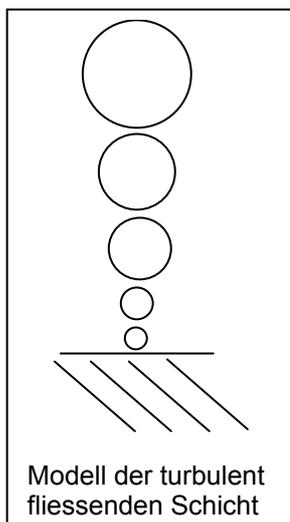


Windbeobachtungen

Ist die Windgeschwindigkeit in einem Gangprofil überall gleich?

Nein, sie variiert mit dem Abstand von der Höhlenwand. Nahe der Wand ist die Geschwindigkeit so klein, dass das Fliessverhalten laminar ist. Die Mächtigkeit dieser Schicht (Rauheitslänge) ist ein Mass für die Rauheit der Oberfläche - je rauher, desto mächtiger. An der Erdoberfläche kann sie bis zu mehreren zehn Metern mächtig sein. In der Höhle dürfte sie in der Regel im Bereich von Millimetern bis Zentimetern liegen.

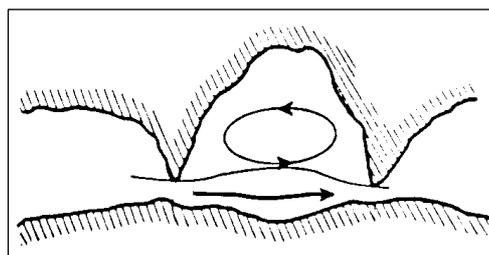
Weiter von der Wand entfernt ist das Fliessen turbulent und in der Geschwindigkeit ebenfalls nicht homogen. Die Luftteilchen bewegen sich in einem komplizierten Bewegungsmuster entlang des Ganges. Stellen wir uns vor, um die Sache ein wenig zu vereinfachen, dass sich die Luftteilchen in einer spiralförmigen Bewegung nach vorne bewegen. Nahe der Felswand sind die Ringe der Spirale klein. Gegen Gangmitte werden sie grösser. Die Windgeschwindigkeit ist um so grösser, je grösser die Ringe sind.



Gibt es noch anders begründete Windzirkulationen?

Leider ja. - Weil die Luft meistens turbulent fliesst, kann der Hauptluftzug einen lokalen, umgekehrten Luftzug antreiben.

Auch hier ist es notwendig zu unterstreichen, dass Luftzirkulationen von grösseren unterirdischen Regionen abhängen und daher nicht nur an einem Punkt beobachtet werden sollen.



(nach Andrieux 1971)

Eine Engstelle die bläst, ist sie wichtig?

Luftströme tendieren dazu, den Weg des geringsten Widerstandes zu wählen. Ausserdem versuchen sie den Widerstand zu verringern, indem sie Raumverengungen durch Energieeinwirkung erweitern (vgl. dazu Kapitel „Kondensation“).

Eine Engstelle mit starkem Luftzug sagt uns,

- dass die Engstelle die Luftbewegung in einer grösseren Region des Berges dominiert
- dass die Luft keinen alternativen Durchgang zu dieser Engstelle hat.

Für die Exploration ist der zweite Punkt der interessantere. Wenn wir uns vor einer Raumverengung (einer echten Engstelle, nicht ein Versturz) mit starkem Luftzug befinden, ist es sinnlos eine Umgehung zu suchen, die grössere Dimensionen haben soll: Gäbe es sie, würde der Luftstrom diese Alternative wählen.

Die Bemerkung zum Versturz ist nötig, weil der „offene“ Teil eines Versturzes in den meisten Fällen sehr gross ist, jedoch für den Menschen nicht passierbar. Hier könnte es eine Umgehung geben, die einen kleineren Durchmesser hat und daher dem Luftstrom mehr Widerstand entgegenbringt als der Versturz.

Wie verhält sich der Luftzug bei der Erweiterung einer Engstelle?

Ist es möglich, durch die Änderung der Windgeschwindigkeit und des Luftflusses während der Erweiterung einer Engstelle Aussagen über den Rest des Höhlensystems zu machen?

Wir unterscheiden zwei Fälle: Im ersten dominiert die Engstelle die Luftzirkulation des Höhlensystem, in einem zweiten nicht. In anderen Worten: Ist diese Engstelle wirklich diejenige, welche die Luftbewegung zwischen zwei Höhleneingängen steuert.

Nehmen wir an, dass wir mit einer Türe die luftdurchlässige Querschnittfläche einer Engstelle verkleinern, jedoch nicht ganz abdichten.

Fall 1: Die **Engstelle dominiert die Luftzirkulation**. Verengen wir die Engstelle:

- wird die Windgeschwindigkeit [m/s] blitzartig sinken.
- verkleinert sich das transportierte Luftvolumen [m³/s] blitzartig.

$$v = \sqrt{\frac{2gP_M x}{fL_S}} \quad Q = x^2 \sqrt{\frac{2gP_M x}{fL_S}} \quad (\text{Badino, 1995})$$

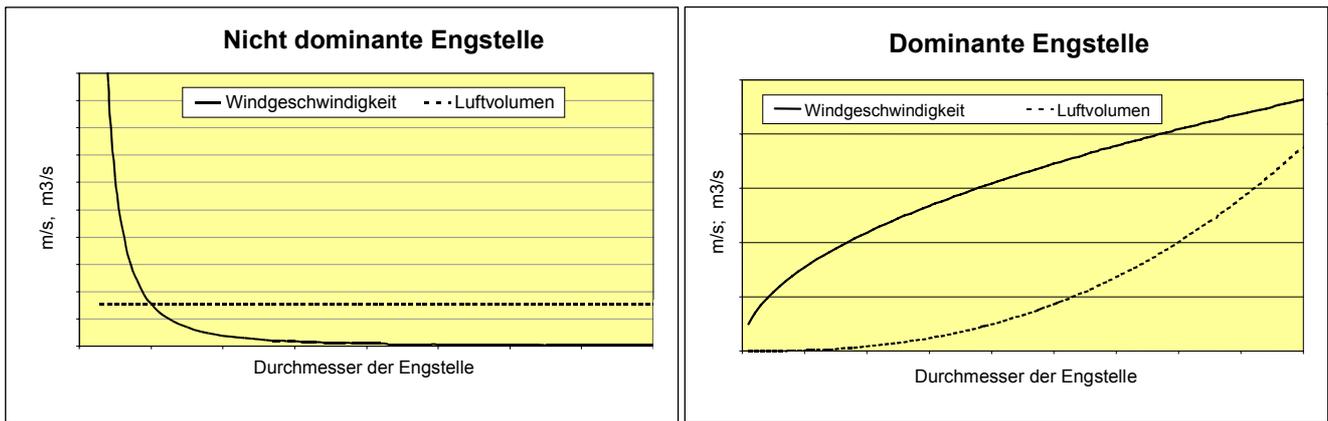
Fall 2: Die **Engstelle dominiert die Luftzirkulation nicht**. Verengen wir die Engstelle:

- nimmt die Windgeschwindigkeit [m/s] nur langsam ab.
- bleibt das transportierte Luftvolumen [m³/s] konstant.

$$v = \sqrt{\frac{2gP_M D_0^5}{fL_0} \frac{1}{x^4}} \quad Q = \sqrt{\frac{2gP_M D_0^5}{fL_0}} \quad (\text{Badino, 1995})$$

Wobei: v = Windgeschwindigkeit [m/s] Q = Luftfluss [m³/s]
 D_0 = Durchmesser der Engstelle [m] P_M = bewegungswirksamer Druck [Pa]
 x = Einheitslänge [m] g = Fallbeschleunigung [9.81 m/s²]
 L_S = Länge der Engstelle [m] L_0 = Ganglänge hinter der Engstelle [m]

Der 1. Fall ist für uns der interessantere, denn wir können annehmen, dass hinter der Engstelle nur grössere Gangdimensionen anzutreffen sind. Doch besagt er auch, dass das Höhlenklima durch die Erweiterung der Passage erheblich verändert wird. Der Einbau eines dauerhaften und effektiven Tores, der den ursprünglichen Luftfluss gewährleistet, sollte bei einer Erweiterung der Engstelle ins Auge gefasst werden.



Der 2. Fall lässt uns erahnen, dass weitere Engstellen folgen werden.

Was kann man mit der Analyse der Luftzirkulation aussagen?

Vorerst müssen wir uns bewusst sein, dass das, was wir „Höhle, Eingang, Engstelle, ... die bläst“ nennen, vor allem eine Situation ist, in der sich die generelle Bewegung der Atmosphäre bis unter Tag widerspiegelt.

Windstärke

Die konvektive Luftzirkulation wächst:

- mit der Differenz der Luftdichte innen/aussen (im wesentlichen dominiert von der Temperaturdifferenz innen/aussen).
- mit dem Höhenunterschied der Eingänge.
- mit der Grösse der Gangdimensionen zwischen den Eingängen.

$$v^2 = \frac{2 * D * (\rho_{INNEN} - \rho_{AUSSEN}) * g * \Delta z}{f * L * \rho_{INNEN}} \approx \frac{2 * D * \Delta T_V * g * \Delta z}{f * L * T_{V_{AUSSEN}}}$$

Die barometrische Luftzirkulation wächst:

- mit der Druckdifferenz innen/aussen.
- mit dem Volumen der Höhle.
- mit der Grösse der Gangdimensionen hinter einer Engstelle.

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V * |P_{ausseen} - P_{Innen}|}{P_{Innen} * \Delta t} \quad T_c = \frac{\Delta V}{S * v}$$

- Wobei:
- v = Windgeschwindigkeit [m/s]
 - D = mittlerer Durchmesser für Gänge; mittlere Breite für Klüfte [m]
 - ρ = Dichte der Luft [kg/m³]
 - z = Höhe [m]
 - f = Reibungskoeffizient (vgl. „Widerstand der Höhle“)
 - v = Geschwindigkeit [m/s]
 - L = Ganglänge [m]
 - T_V = virtuelle Temperatur [K] (siehe Kapitel „Die Luft“)
 - V = Volumen des Systems [m³]
 - ΔV = Volumen der ausströmenden Luft [m³]
 - P = Luftdruck [Pa]
 - t = Zeit [s]
 - T_c = Charakteristische Zeit [s]
 - S = Profil der geschwindigkeitsbestimmenden Höhlenpartie [m²]

Mögliche Aussagen/Schlussfolgerungen

Das Vorhandensein konvektiver Luftzirkulation sagt uns, dass der Höhleneingang mit anderen Zonen des Berges verbunden ist.

Eine barometrische Luftzirkulation sagt uns, dass ein grosses Luftvolumen vorhanden ist.

Welchen Ursprung ein Höhlenwind hat, ist meistens nicht besonders schwierig herauszufinden. Die konvektive Luftbewegung hängt vom Temperaturunterschied zwischen innen und aussen ab, während die barometrische durch die Druckdifferenz bestimmt wird. Letztere hält nur kurze Zeit (einige 10 Minuten) an, erstere kann über mehrere Tage hinweg stabil sein.

Leider kommt es oft vor, dass sie sich überlagern. Deshalb ist es notwendig, den Luftzug bei verschiedenen Wetterlagen zu beobachten.

Gelingt es uns, sie separat zu messen, so können wir:

- * aus der konvektiven Luftzirkulation den Höhenunterschied zwischen dem meteohohen und dem meteotiefen Höhleneingang berechnen;
- * aus der barometrischen Luftzirkulation das Volumen der Höhle berechnen;
- * aus beiden Luftzirkulationen die Gangdimensionen abschätzen.

Welche Aussagen sind möglich durch das Schliessen eines Höhleneinganges?

Theoretisch ist es möglich, aus den Beobachtungen beim Verschliessen einer Höhle sowohl das Volumen des Systems als auch die Höhenlage des anderen Einganges zu interpretieren.

Wir stellen eine Türe am unteren Eingang einer röhrenförmigen Höhle auf und messen in einer Periode, in welcher der Atmosphärendruck stabil ist:

1. Die Lufttemperatur und den Temperaturgradienten der Höhle (Als Näherung können wir einen Temperaturgradienten zwischen -3 und -4 °C/km annehmen).
2. Die Lufttemperatur und den Temperaturgradienten der Aussenluft (Als Näherung können wir bei feuchten und grauen Tagen einen Gradienten von -6 °C/km annehmen, bei strahlendem Wetter einen solchen von -10 °C/km).
3. Den Luftfluss am Eingang.

Für die **Höhenlage des meteohohen Einganges** verwenden wir die Formel zur Berechnung der Windgeschwindigkeit konvektiver Luftbewegungen. Dieses Resultat können wir durch die Temperaturgradientenüberlegung, wie im Kapitel Höhlentemperatur besprochen, überprüfen und so einen passenden Wert für den *Durchmesser* D abschätzen.

Für die Berechnung des **Volumens des Höhlensystems** schliessen wir die Tür und sehen (im Sommer), wie der Luftdruck hinter der Tür steigt, bis er sich erneut einpendelt. Mit Hilfe der gemessenen Zeit, bis der Luftdruck wieder stabil ist, und dem Endwert des Überdrucks können wir - mittels der Formel der Charakteristischen Zeit - das Volumen des Hohlraumes, der an der Luftbewegung teilnimmt, berechnen.

Die obigen Berechnungen können für eine theoretisch konstruierte, röhrenförmige Höhle angewendet werden. Der Normalfall mit verzweigten Höhlengängen ist einiges komplexer, denn die Beziehung zwischen dem Druck hinter der verschlossenen Tür und dem Aussendruck hängt im wesentlichen ab von:

1. der Höhenlage des Einganges mit der Tür
2. der Höhenlage des unmittelbar höher liegenden Einganges des Systems
3. dem Volumen des Höhlensystems zwischen diesen beiden Eingängen
4. dem Widerstand des Systems
5. dem Totalvolumen des Systems
6. der Höhenlage der anderen Eingänge

Wann ist es sinnvoll, die Luftbewegung zu beobachten?

Konvektive Luftbewegung

Da die Dichte (Temperatur) der Luft mit zunehmender Höhe über Meer abnimmt, müssen wir eine Situation suchen, in der die Temperatur der Aussenluft möglichst verschieden von der des Höhleninnern ist. Dieser Temperaturunterschied muss umso grösser sein, je grösser der Höhenunterschied des Systems ist, das wir untersuchen. Da mit der Höhenlage grosse Temperaturvariationen vorkommen können, ist nicht gesagt, dass die Temperaturdifferenz (innen - aussen), die wir an einer Höhenlage messen, an einer anderen auch gemessen wird (innen und aussen verschiedene Temperaturgradienten).

$$\text{Faustregel: } \Delta T_{konv} = 3 + 6\Delta z$$

Wobei: ΔT_{konv} = die notwendige Temperaturdifferenz für konvektive Luftbewegungen [°C]

Δz : = die vermutete Höhendifferenz der zwei Eingänge [km]

Mit der Faustregel erhalten wir $\Delta T_{konv} \sim 10^\circ\text{C}$ für grosse alpine Systeme mit 1 Kilometer Höhenunterschied und $\Delta T_{konv} \sim 5^\circ\text{C}$ für Höhlen mit kleinem Höhenpotential.

Möchten wir konvektive Luftzirkulation beobachten, so sollte die Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen grösser als ΔT_{konv} sein. Ist sie kleiner, können Effekte beobachtet werden, die durch lokale Begebenheiten hervorgerufen werden (z.B. Wind prallt auf die Felswand, lokale Luftfeuchtigkeit, ...).

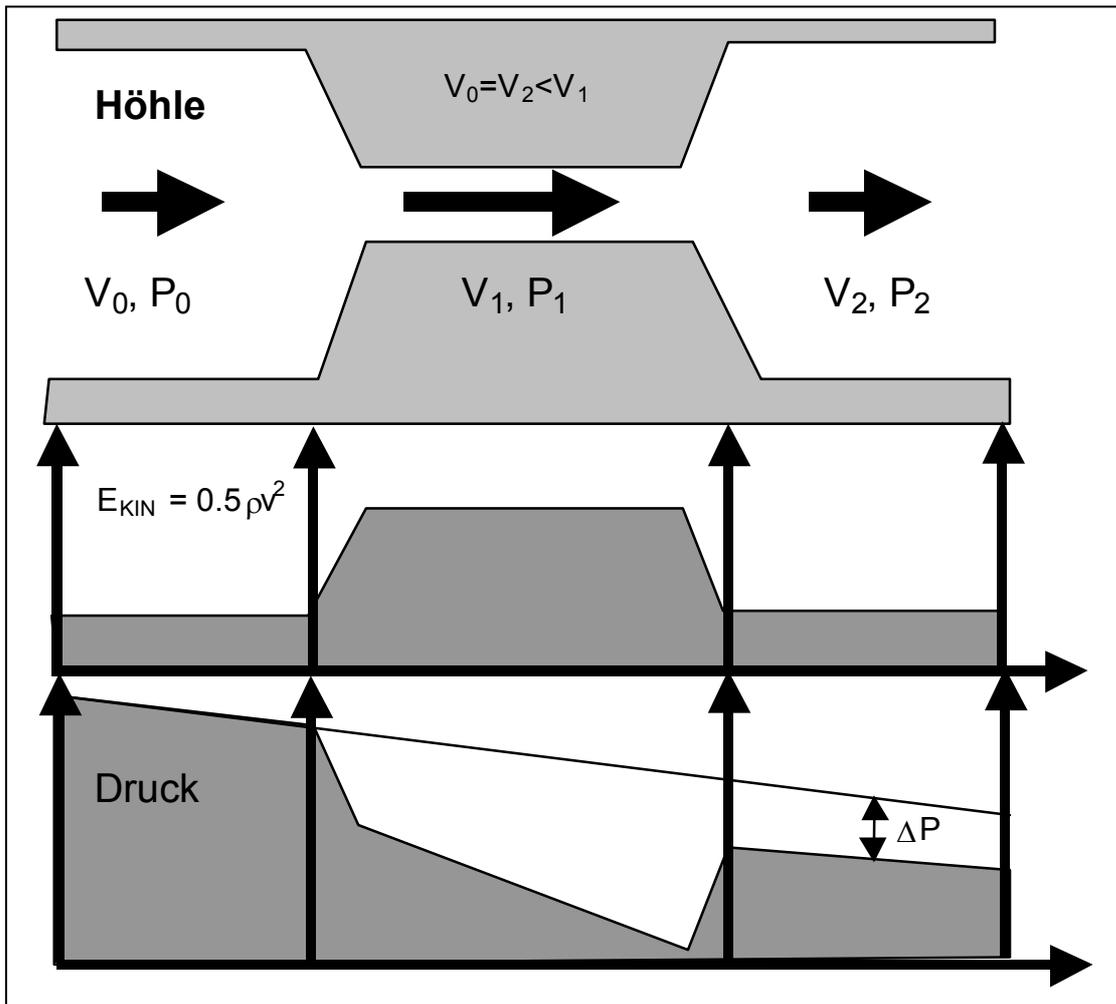
Barometrische Luftbewegung

Die barometrische Luftbewegung hängt von den Druckschwankungen der Atmosphäre ab. Die Höhle tendiert zu blasen, wenn das Wetter sich verschlechtert (Aussendruck fällt, Tiefdruck), oder Luft anzusaugen, wenn das Wetter wieder besser wird (Aussendruck steigt, Hochdruck).

Dies sind also die Situationen, in denen es sich lohnt, Beobachtungen zu barometrischen Luftbewegungen zu machen.

In diesen Wetterlagen stellt man sich am besten für eine halbe Stunde mit einem Höhenmesser vor den Höhleneingang des zu untersuchenden Höhlensystems und schaut, ob sich die angezeigte Höhe verändert. Steigt diese, heisst das, dass der Luftdruck abnimmt, also sollte die Höhle Luft ausblasen. Sinkt dagegen die angezeigte Höhe, sollte die Höhle Luft ansaugen.

Zusammenfassung



Wir haben einen Gang mit einer Engstelle in der Mitte, in dem ein Wind von links nach rechts weht.

Die kinetische Energie (E_{kin}) im Gang ist proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ($E_{kin} = 0.5\rho v^2$). Die Windgeschwindigkeit ist auf der linken und der rechten Seite der Engstelle gleich gross ($V_0 = V_2$), in der Engstelle selbst ist sie grösser ($V_1 > V_0$).

Der Luftdruck ist umgekehrt proportional zur kinetischen Energie. Doch gibt es Druckverlust durch den Widerstand der Höhle $\Delta P = (\rho f L v^2)/(2D)$. Beachte den Druckverlust in der Engstelle.

- Wobei:
- E_{kin} = kinetische Energie [J]
 - P = Luftdruck [Pa]
 - ρ = Dichte [kg/m^3]
 - v = Windgeschwindigkeit [m/s]
 - f = Reibungskoeffizient
 - L = Ganglänge [m]
 - D = Gangdurchmesser [m]

Die Luftzirkulation in Höhlen - das elektrische Modell

[Alle Formeln und Graphiken in diesem Kapitel stammen aus Badino, 1995]

Wie behandelt man das Problem „Höhlsystem mit mehreren Eingängen“?

In diesem Abschnitt stellen wir das „elektrische Modell“ vor. Es stammt aus dem Bergbau, wo es der Berechnung der Belüftungssysteme dient und stellt eine Analogie zur Berechnung von elektrischen Stromkreisen dar.

Grundkonzept

Die Luftsäule wird solange beschleunigt, bis der Druckunterschied zwischen der inneren und der äusseren Luftsäule gleich dem Druckverlust durch den Widerstand der Höhle ist.

Die fundamentalen Variablen

S = Gangprofil [m ²]	D = Gangdurchmesser [m]	V = Volumen [m ³]
v = Windgeschwindigkeit [m/s]	P = Druck [Pa]	T = Temperatur [K]
L = Ganglänge [m]	g = Fallbeschleunigung [9.81 m/s ²]	δ = Dichte [kg/m ³]
μ = Molmasse [kg/mol]	x = Einheitslänge [m]	
H _R = Widerstand der Höhle [m] (vgl. Kapitel „Der Höhlenwind“)		
k = Korrekturfaktor für Ganganlage (vgl. Kapitel „Der Höhlenwind“)		
R = universelle Gaskonstante [8.31451 J/(mol*K)]		

Zusätzlich verwenden wir in Analogie zur Elektrizitätslehre folgende Variablen:

Die **Stromstärke I** für den Luftfluss.

Wir unterscheiden zwischen einem Volumen- und einem Massenfluss:

$$\begin{aligned} \text{Volumenfluss} & \quad I_V = Sv \quad [\text{m}^3/\text{s}] \\ \text{Massenfluss} & \quad I_M = Sv\delta = I_V \frac{\mu P}{RT} \quad [\text{kg/s}] \end{aligned}$$

Die **Ladung Q** für das Luftvolumen in der Einheitslänge: $Q = Sx$

Die **Spannung U** für den Druckunterschied: $U = \delta g H_R$

Der **Widerstand R** eines Ganges im elektrischen Modell [Pa/m³s]:

Zu beachten ist, dass R - im Gegensatz zum Ohm'schen Widerstand der Elektrizitätslehre - nicht konstant ist, sondern von I abhängt. R kann nur dann als konstant betrachtet werden, wenn sich das System in einer Gleichgewichtslage befindet, also der Luftfluss in allen Teilen des Systems gleich ist.

$$R = \frac{\partial g}{Sv} H_R$$

Vorher haben wir gesehen:

für einen Gang
$$H_{R_{Gang}} = \frac{fLv^2}{2Dg} \Rightarrow R_{Gang} = \frac{f\partial Lv}{2S^{3/2}} = \frac{f\partial L}{2S^{5/2}} I$$

für einen Richtungswechsel
$$H_{R_{Richtung}} = \frac{Kv^2}{2g} \Rightarrow R_{Richtung} = \frac{K\partial v}{2S} = \frac{K\partial}{2S^2} I$$

Die konvektive Luftzirkulation

Zwei Basiszirkulationen

In Analogie zu Widerständen in Stromkreisen unterscheiden wir Gänge, die in Serie (hintereinander) geschaltet sind, von denen die parallel (nebeneinander) geschaltet sind.

Der Widerstand von Galerien in Serie (I = konstant)

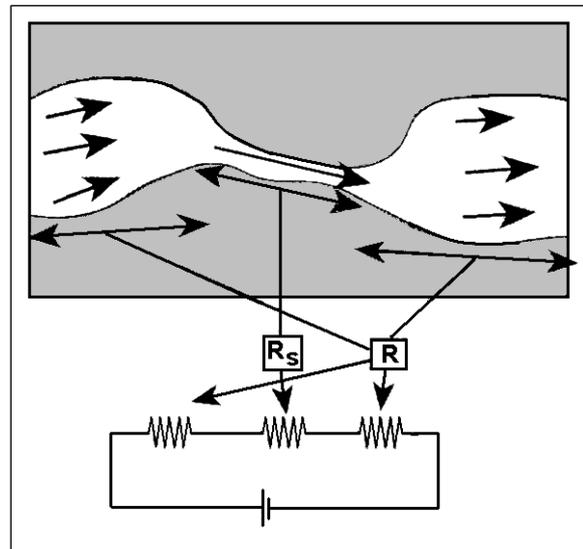
Wenn die Luft durch hintereinander liegende Gangabschnitte unterschiedlicher Dimensionen fließt, dann kann der Widerstand der beiden Gänge (wie beim elektrischen Stromkreis) addiert werden.

Doch was passiert genau? Die Luft bewegt sich im einen Gangabschnitt schneller als im anderen. Zu beachten ist, dass sich auch der Volumenfluss ändert, weil eine Geschwindigkeitsänderung zu einer Druckvariation führt und sich dadurch die Dichte ändert. Da der Massenfluss konstant bleiben muss (Kontinuitätsgleichung), ändert sich der Volumenfluss.

Beispiel:

Von zwei sich folgenden Höhlengängen gleicher Länge und Beschaffenheit der Felsoberfläche, betrage der Durchmesser D des 2. Abschnittes 1/5 des ersten (Profilfläche S=1/25).

Da der Widerstand mit S^{-5/2} wächst, ist er in der Engstelle 3125 mal grösser als im grösseren Gangabschnitt.



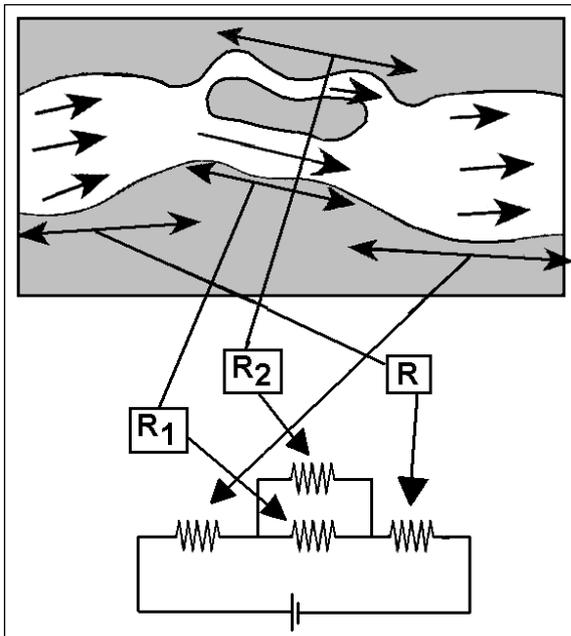
→ Der Widerstand eines Ganges wird von den Engstellen dominiert.

Der Widerstand paralleler Galerien (U = konstant)

Nehmen wir an, dass der Höhlenwind die Wahl zwischen zwei parallelen Gängen hätte. Für welchen wird er sich entscheiden? Diesmal bleibt die Ladung (Luftvolumen) in den beiden Gängen nicht gleich, statt dessen bleibt die Spannung (Druckunterschied) gleich ($V_1=V_2 \Rightarrow R_1 I_1=R_2 I_2$).

$$\frac{f\partial L_1 I_1}{2S_1^{5/2}} I_1 = \frac{f\partial L_2 I_2}{2S_2^{5/2}} I_2$$

Wenn $L_1 \approx L_2$ dann: $\frac{f I_1}{2S_1^{5/2}} I_1 = \frac{f I_2}{2S_2^{5/2}} I_2 \Rightarrow I_1 = I_2 * \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{5/4}$



Beispiel:

Nehmen wir zwei parallele Gänge mit einem Gangdurchschnittsverhältnis von 1/5 an:

Aus $S_1/S_2 = 25$ bekommen wir $I_1 = I_2 * 56$.

Der Fluss durch den breiteren Gang ist mehr als 50 mal grösser als im engeren. Die Windgeschwindigkeit ist auch ~ 2.2 mal ($56/25$) grösser.

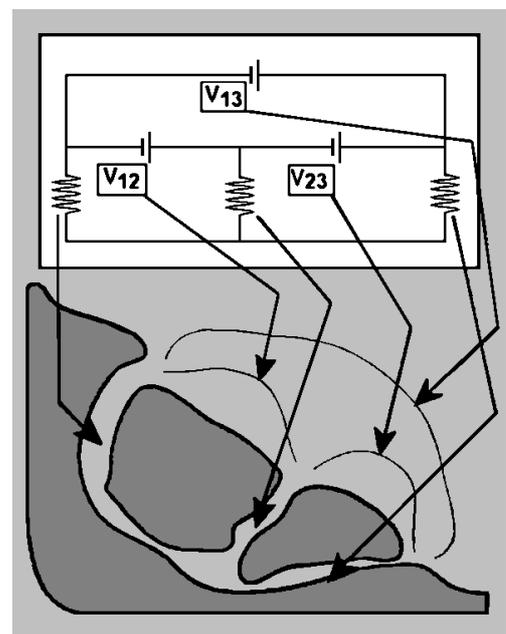
→ Im Gegensatz zu den Gängen in Serie wird bei parallelen Gängen das Verhalten des Systems vor allem durch den grösser dimensionierten Gang bestimmt.

Generelle Situation:

konvektive Luftzirkulation mit mehreren Eingängen

1. Wir ersetzen jeden Gang durch seinen Widerstand.
2. Wir verbinden jeden Höhleneingang mit den anderen, bis alle miteinander verbunden sind.
3. Wir verbinden die Widerstände so miteinander, wie die Höhlengänge miteinander verbunden sind.

Auch hier kann analog zum Stromkreis weiter gerechnet werden, was jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.



Die barometrische Luftzirkulation

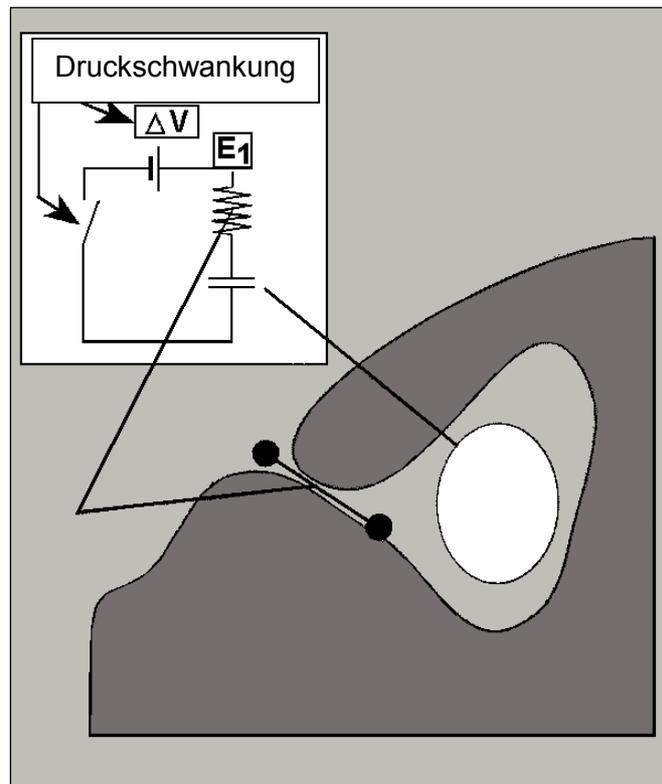
Wir betrachten die Höhlen in diesem Falle als Lufttanks mit endlicher Grösse, die wir in unserem elektrischen Modell als Kondensatoren darstellen.

Der elementare Fall

Betrachten wir zuerst einmal den einfachsten Fall:

Ein Hohlraum ist mit der Oberfläche verbunden.

Ob der Kondensator geladen ist oder nicht, hängt von der Wetterlage ausserhalb der Höhle ab.



Das Luftvolumen ausströmender Luft:

$$\Delta V = - \frac{V * \Delta P}{k * P_{Innen}}$$

Wobei: ΔV = Volumen der ausströmenden Luft [m^3]

V = Volumen der Höhle [m^3]

ΔP = Druckdifferenz ($P_{Aussen} - P_{Innen}$) [Pa]

k = langsamer Prozess (isoterm) => $k=1$;

schneller Prozess (adiabatisch) => $k=1.4$

Der Widerstand: $R = \frac{\Delta P_{Widerstand}}{Sv}$

Die Charakteristische Zeit:
$$T_C = \frac{\Delta V}{Sv} = \frac{V\Delta P}{kP_{Innen}} * \frac{1}{Sv} = \frac{V}{kP_{Innen}} * R$$

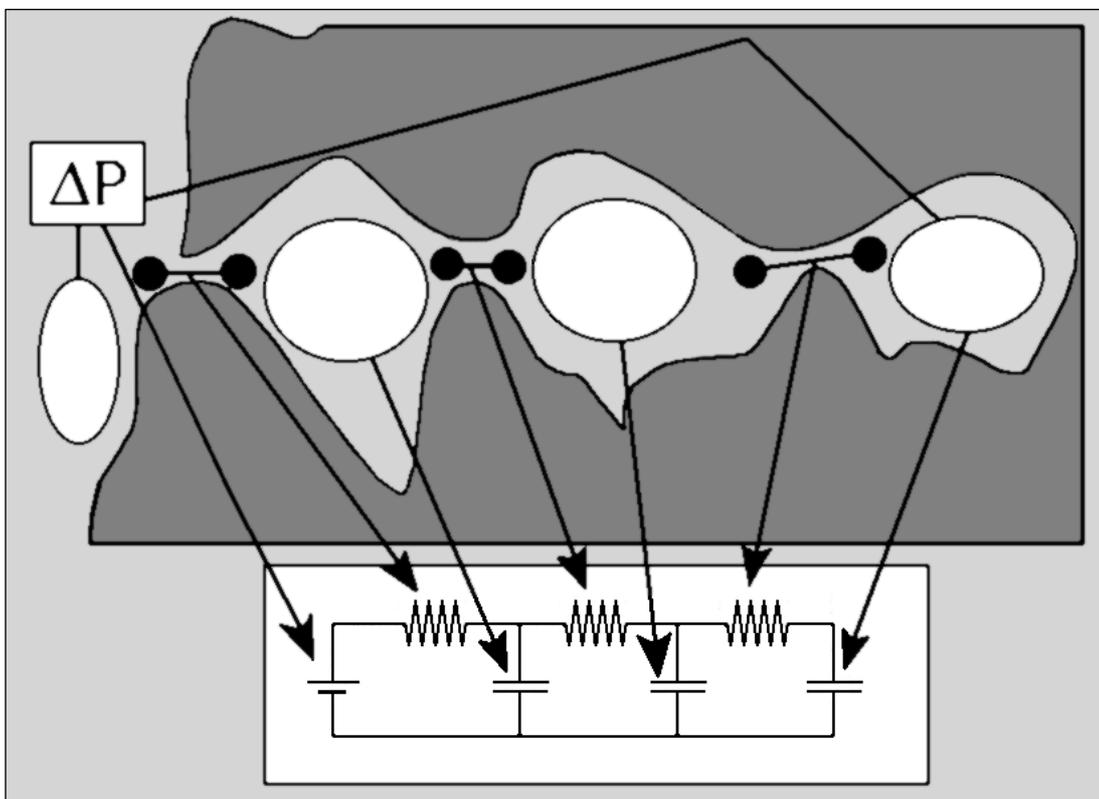
Verändert sich der atmosphärische Luftdruck schneller als die Charakteristische Zeit, entleert oder füllt sich die Höhle mit dieser letzteren. Ist die atmosphärische Druckänderung langsamer als die Charakteristische Zeit, verändert sich der Luftdruck in der Höhle im Gleichschritt dazu, also im ständigen Ausgleich.

Die Kapazität eines Kondensators:
$$C = \frac{V}{kP_{Innen}}$$

Der Luftfluss:
$$I_{(t)} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \sqrt{\frac{2S^{5/2}\Delta P}{f\partial L}} - \frac{S^{5/2}}{f\partial L} * \frac{kP_{Innen}}{V} * t$$

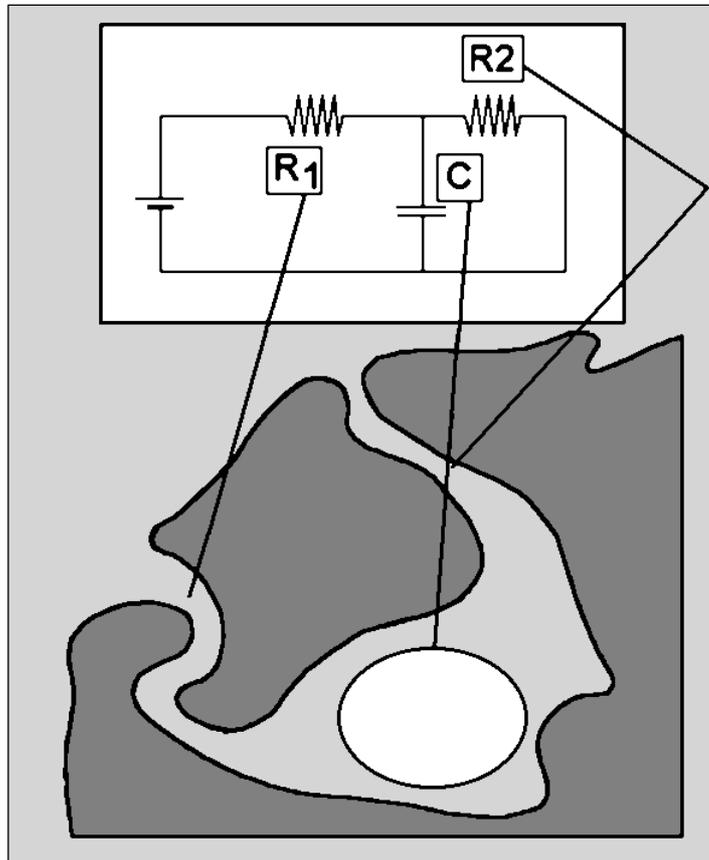
Abfolge von mehreren Sälen

Das Modell, das bei einer Höhle mit mehreren Sälen ohne einen zweiten Eingang entsteht, ist eine Folge von Kondensatoren und Widerständen. Die Kondensatoren sind die Säle, die Widerstände sind die Verbindungen zwischen den Sälen. (Zu beachten ist, dass streng genommen jeder Höhlengang oder Saal gleichzeitig ein Widerstand und ein Kondensator ist.)



Kombination von konvektiver und barometrischer Luftzirkulation

Stellen wir uns vor, wir befinden uns in einem Saal, der durch zwei Gänge mit der Aussenwelt verbunden ist:



Diese Modelle zu berechnen, sprengen den Rahmen dieser Arbeit. Für den allgemeinen Gebrauch reicht es jedoch festzuhalten, dass:

- grundsätzlich jeder Hohlraum als Widerstand (Gang) oder als Kondensator (Saal) wirken kann, die jeweilige Wirkungsweise wird durch das ganze System bestimmt.
- wenn der Saal verglichen mit den beiden Zugängen riesig ist, die barometrische Luftzirkulation vorherrschen wird.
- wenn ein Eingang viel enger ist als der andere, die barometrische Luftzirkulation dominieren wird.
- wenn die Zugänge gross sind, oder der Saal klein, die konvektive Luftzirkulation vorherrschen wird.

Kondensation

Wenn Wasser siedet, muss weiterhin Energie (Wärme) zugeführt werden, damit alles Wasser verdampft. Es braucht also Energie, um Wasser vom flüssigen in den gasförmigen Zustand zu bringen. Dieses Phänomen kennen wir gut, doch gilt auch das Umgekehrte: Wenn Wasser vom gasförmigen in den flüssigen Zustand übergeht, wird Energie (Wärme) frei, bis sämtliches Wasser in flüssiger Form vorliegt. Diesen Vorgang nennen wir Kondensation. Die durch diesen Prozess frei werdende Energie nennen wir Kondensationswärme. Sie ist gleich gross wie die Verdampfungsenergie.

Damit Wasserdampf kondensiert, muss einerseits die Luft von Wasserdampf gesättigt oder übersättigt sein (Partialdruck des Wasserdampfes $P_V \geq$ Sättigungsdampfdruck P_S), andererseits müssen „Kondensationskeime“ vorhanden sein (in absolut reiner Luft müssten die Tröpfchen ausgehend von einem infinitesimal kleinen Volumen zu wachsen beginnen, was unendlich langsam vor sich ginge).

Als **Kondensationsoberflächen** („Keime“) kommen in Frage:

- Felsen
- Oberflächen von Höhlengewässern
- Wasserfilme auf Felsen
- Wassertropfen
- Luftverunreinigungen / schwebende, kleine Partikel / Aerosole

Kondensationswärme ($2.256 \cdot 10^6$ J/kg)

Die Verdampfungswärme ist gleich gross wie die Kondensationswärme. Die spezifische Kondensationswärme ist ein Mass für die Energiemenge, die benötigt wird, um 1 kg eines Stoffes zu verdampfen. Es ist dieselbe Energiemenge, die bei der Kondensation wieder an die Umgebung abgegeben wird.

Kondensationsarten

Als Kondensationspunkt (Taupunkt) bezeichnet man diejenige Temperatur, bei welcher der Dampfdruck P_V dem Sättigungsdampfdruck P_S ($P_V = P_S$) entspricht.

Kondensation durch Abkühlung

Diesen Prozess haben wir bereits im Kapitel Luft besprochen, als wir den Sättigungsdampfdruck P_S behandelten. Beim Abkühlen der Luft sinkt der Sättigungsdampfdruck, unterschättigte Luft kann die Sättigung erlangen und kondensieren.

$$P_S = 85 \cdot T_{\circ C} + 468$$

Wobei: P_S = Sättigungsdampfdruck [Pa]
 $T_{\circ C}$ = Temperatur [°C]

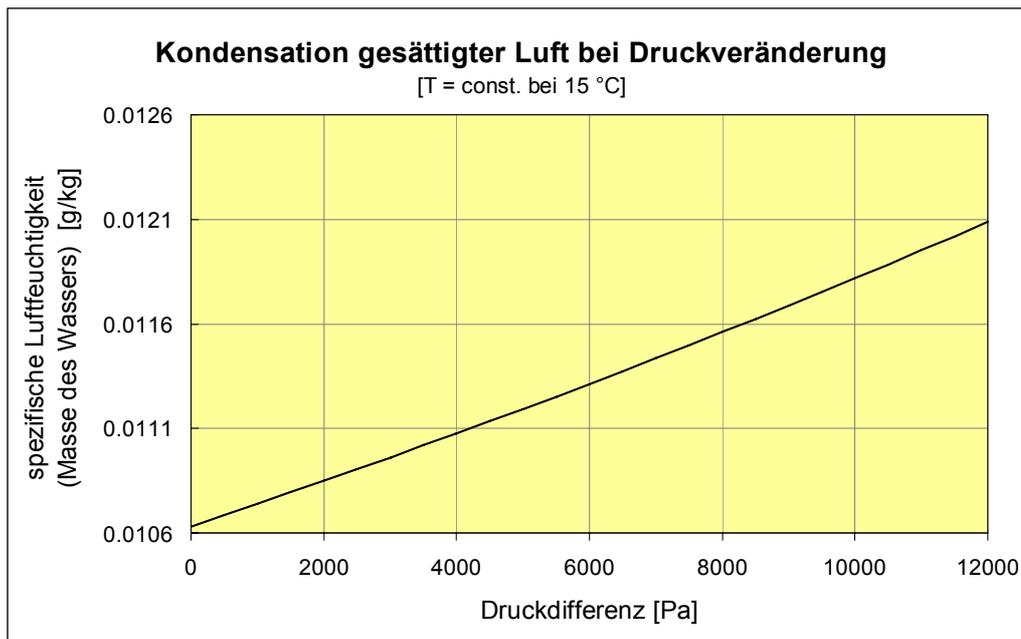
Kondensation durch Erhöhung des Luftdrucks

Dieser Effekt ist um einige Größenordnungen kleiner als jener der Abkühlung.

$$d = 0.622 \frac{P_V}{(P_0 - P_V)} = \left[\frac{g}{kg_{\text{trockeneLuft}}} \right]$$

Wobei:

- d = spezifische Luftfeuchtigkeit [g/kg] (vgl. Kapitel „Die Luft“)
- P_V = Partialdruck des Wasserdampfs [Pa]
- P_0 = Luftdruck [Pa]



Wieviel Wasser kondensiert?

Zur Abschätzung des Wassertransportes in oder aus dem Karst durch den Höhlenwind können wir folgende Formel benutzen:

$$Q \approx N(T_{\text{Aussen}} * r_{\text{Aussen}} - T_{\text{Innen}} * r_{\text{Innen}})$$

Wobei:

- Q = Wasserfluss durch Kondensationsprozesse [(g/s)]
- N = Luftfluss des Karstes [m³/s]
- T = Temperatur [°C]
- r = relative Luftfeuchtigkeit

Beispiel:

Nehmen wir an, wir haben eine Höhle mit einer Lufttemperatur von 6 °C, die relative Luftfeuchtigkeit betrage 100 %, der Höhlenwind blase mit 2 m³/s.

Dadurch werden im **Sommer** - bei einer Aussentemperatur von 20 °C und 60% relativer Luftfeuchtigkeit - rund 12 Gramm Wasser in der Sekunde der Höhle zugeführt. Im Winter werden bei einer Aussentemperatur von 2 °C und derselben relativen Luftfeuchtigkeit (60%) der Höhle rund 9.6 Gramm Wasser in der Sekunde entzogen.

Weshalb gibt es keine Wolken in den Höhlen?

In der Aussenatmosphäre bilden sich Wolken, wenn die Luft durch Abkühlung übersättigt wird und Wasserdampf zu Wassertröpfchen oder Eiskristallen kondensiert. Die Grösse der Partikel in einer Wolke liegt im Bereich von einigen Hundertstelmmillimetern. Die Teilchen sind so klein und leicht, dass sie von schwachen, vertikal verlaufenden Strömungen in der Luft gehalten werden.

Doch was geschieht mit dem Wasserdampf, der in der Höhle kondensiert?

- Er bildet den feinen Wasserfilm, der die Höhlenwände stets bedeckt. An speziellen Orten bilden sich sogar Tröpfchen.
- In geringem Masse sinkt das Kondenswasser mit einem Kondensationskern zu Boden. Da diese Kondensationskeime auch Pollen sein können, gilt die Höhlenluft als keimfrei (was in der Speläotherapie ausgenützt wird).

Kondensationsprozesse und Speläogenese

Die Ausmasse des Einflusses von Kondenswasser auf die Speläogenese ist zur Zeit noch recht umstritten. So versucht zum Beispiel Badino (1995) mit Kondensationsphänomenen zu erklären, weshalb nach engen Mäandern oft grossdimensionierte Schächte folgen.

Fest steht jedoch, dass Kondenswasser eigentlich destilliertes Wasser ist und keinen Kalk enthält. Dadurch ist es „aggressiv“, d.h., es vermag Kalk zu lösen. Im Gegensatz dazu ist das Wasser, das von aussen einsickert, in der Tiefe der Höhle bereits mit Kalk gesättigt und vermag keinen Kalk mehr zu lösen.

Hinterlässt das Kondenswasser Korrosionsformen?

Der Wirkungsgrad der „Kondenswasserkorrosion“ und die typischen Korrosionsformen, die durch Kondenswasser entstanden sind, hängen im wesentlichen von der Menge an Kondenswasser und von der Luftzirkulation ab. Es sollen sich gar langgezogene „Fließfacetten“ bilden können (Slabe, 1995).

Korrosion durch Kondenswasser hebt oft Sedimentstrukturen hervor. Flächen, bei denen das Kondenswasser korrosiv gewirkt hat, sind meistens rau. Diese Rauheit besteht aus Unreinheiten im Kalkgestein, die nicht gelöst wurden und ohne die erosive Wirkung von fließendem Wasser nicht weggespült werden. Die dadurch entstandene Schicht aus „unlöslichem“ Material ist oft auch das Haupthindernis für die Ausbildung makroskopischer Formen. Nur an denjenigen Stellen, wo hin und wieder ein fließendes Wasser den Felsen von dieser „unlöslichen“ Schicht befreit, können sich fließfacettenartige Eintiefungen bilden, die Hinweise auf die Luftzirkulation geben können.

In diesem Bereich steckt die Wissenschaft noch in Kinderschuhen. Eine einfache Methode, um dieses Phänomen zu untersuchen, beschreibt Slabe (1995).

Energiehaushalt des Karstes

In diesem Kapitel werden wir an einem Beispiel eine Abschätzung des Energiehaushalts eines Karstgebiets durchführen.

[Um das Beispiel nachzurechnen, siehe Badino, 1995]

Annahmen zum folgenden Beispiel-Modell:

Beschreibung des Karstsystems:

Topographie

Oberfläche	1 km ²
Höchster Punkt	2000 m ü.M.
Kote der Karstquellen	1000 m ü.M.

Wasser

Wasserfluss durch den Karst	20 kg/s
Ca-Gehalt des Wassers an der Quelle	0.1g/kg

Luft

Luftfluss durch den Karst	5 kg/s
Höhlenlufttemperatur auf 2000 m ü.M.	2 °C
Luftfeuchtigkeit der Höhlenluft	6 g/kg
Höhlenlufttemperatur auf Quellniveau	5.5 °C

In diesem Beispiel unterscheiden wir zwischen der Sommer- und Wintersituation:

- Bei einer typischen **Sommersituation** haben wir auf 2000 m.ü. M. eine Aussentemperatur von 20 °C bei 60 % relativer Luftfeuchtigkeit. Die Aussentemperatur auf 1000 m.ü. M. beträgt 26 °C. Weiter nehmen wir an, die Regenmenge sei auf allen Höhenlagen gleich.
- Die typische **Wintersituation** zeichnet sich durch eine Aussentemperatur von -10 °C auf 2000 m.ü. M. bei 60 % relative Luftfeuchtigkeit aus, wobei auf 1000 m.ü. M. die Aussentemperatur -4 °C sei.

Die Beiträge zum Energiehaushalt:

1. Der geothermische Energiefluss

Der Fluss der Erdwärme beträgt im globalen Durchschnitt 67 mW/m², in den nördlichen Kalkalpen der Schweiz liegt er bei 70 - 80 mW/m².

Der Karstaquifer schirmt den vadosen Teil des Karsts vom geothermischen Energiefluss ab, dadurch erwärmt sich das Wasser im phreatischen Bereich.

2. Der Fall des Wassers

Wenn das Wasser an Höhe verliert, wandelt sich die potentielle Energie in Wärme um.

- 3. Der Fall der Luft** Die Umwandlung der potentiellen Energie von fallender Luft. (Es handelt sich um einen kleinen Wert, der auf die Engstellen konzentriert ist.)
Tritt warme Luft in den Karst ein, erfolgen Temperatur- und Feuchtigkeitsausgleich nach wenigen Metern.
Die Luft fällt, wenn die virtuelle Temperatur des Luftpaketes kleiner ist als diejenige der Umgebung.
- 4. Die Expansion der Luft (netto)** Bei Expansion kühlt sich die Luft ab.
Bei Kompression wird sie warm.
- 5. Die Enthalpie einströmender Luft** Eindringen von Aussenluft in den Karst führt zu einem Energietransfer. Dabei wird der Enthalpieunterschied zwischen der Aussenluft und der Innenluft mit dem Luftfluss multipliziert.
Die Enthalpie der Luft besteht aus einem Term für die Temperatur und einem für die latente Energie.
- 6. Die Enthalpie einfließenden Wassers** Ist der Temperaturgradient der Höhle konstant, liefert der Eintritt von warmem oder kaltem Wasser keinen signifikanten Beitrag.
- 7. Die Enthalpie „Wasserweg“** Beschreibt die Enthalpieaufnahme des Wassers, wenn es durch den Berg fließt (z.B. Reibung, Austausch mit der Höhlenluft)
- 8. Die Erwärmung des Karstaquifers** Aufnahme der geothermischen Wärme durch das Wasser des Aquifers.
- 9. Die Kalklösung** Hier wird versucht die „Energie“ abzuschätzen, die verbraucht wird, um die Höhle zu bilden.
Im Beispiel wird angenommen, dass das eintretende Wasser kein gelöstes Ca enthält.

Resultat der Rechnung dieses Modells (Badino,1995)

Energiebilanz [kW]	Sommersituation		Wintersituation	
	Abgabe	Entnahme	Abgabe	Entnahme
1. Geothermischer Fluss	60		60	
2. Fall des Wassers	200		200	
3. Fall der Luft	3		2	
4. Expansion der Luft	20			20
5. Enthalpie Luft (ein)	155			105
6. Enthalpie Wasser (ein)	0 - 10			0 - 10
7. Enthalpie „Wasserweg“		300		300
8. Erwärmung Aquifer		60		60
9. Kalklösung		10		10
Total	430+	370	260	450+
Überschuss		60	190	

Schlussfolgerungen aus der Modellrechnung:

- => Der resultierende Beitrag des geothermischen Flusses [1, 8] ist in der Regel gering, da diese Wärme durch das Wasser wieder abgeführt wird.
- => Der resultierende Beitrag des im System zirkulierenden Wassers ist negativ [2, 7].
- => Der Beitrag der zirkulierenden Luft [4] ist nicht vernachlässigbar. Er ist positiv im Sommer und negativ im Winter.
- => Der Beitrag der eintretenden Luft ist gross, doch ist er auf die Eingangspartie lokalisiert [5].
- => Der Beitrag des in den Karst eintretenden Wassers [6] ist sehr klein (Hat jedoch eine gewisse Bedeutung, da die Energie weit in die Tiefe dringt).
- => Wasser, das durch den Karst fliesst, entnimmt dem Karst eine grosse Menge Energie.

PS: Diese Diskussion bezieht sich auf Flüsse (Energie pro Zeit) und nicht auf eine Energiebilanz

Fazit

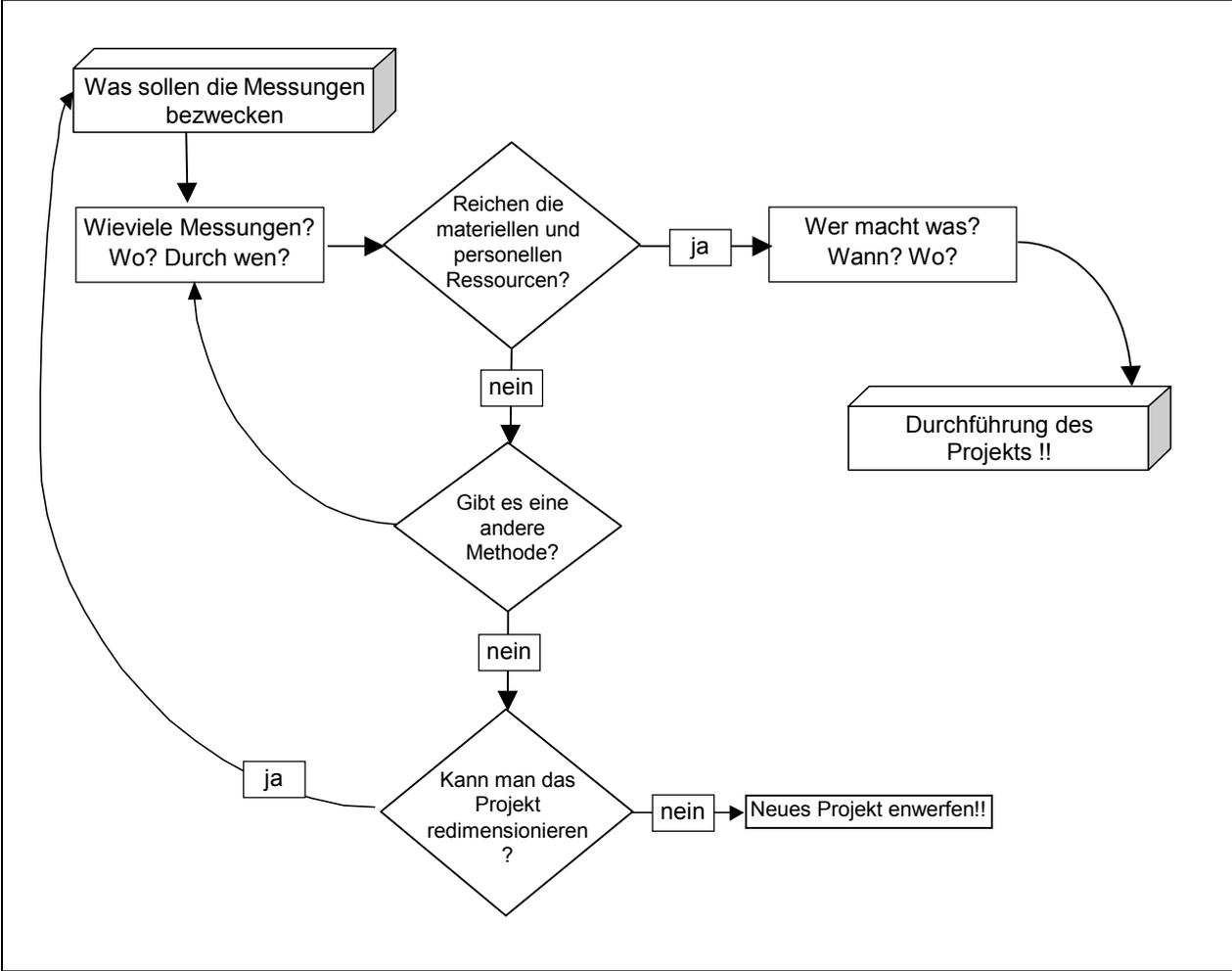
Der Anteil der Kalklösung in dieser Energieabschätzung ist klein und liegt unter den zu erwartenden Unsicherheiten der übrigen Prozesse.

→ Möchte man die speläogenetisch wirksamen Prozesse des Höhlenklimas untersuchen, muss die Genauigkeit der Berechnungen vorangetrieben werden (Fachmann für Thermodynamik).

Planung von Höhlenklimaprojekten

Planung eines Projektes

Ziellose Messungen führen meistens zu Frust. Man hat zum Beispiel 1000 mühsam erarbeitete Messwerte, mit denen man selbst und der Fachmann nichts anfangen kann. Deshalb ist eine gute Projektplanung unabdinglich.



Zeitpunkt der Messung

Der Zeitpunkt einer Messung muss so gewählt werden, dass der Parameter, den wir messen wollen, möglichst „rein“ ist und nicht vermischt wird durch andere Erscheinungen.

Das heisst zum Beispiel: Wenn wir die **konvektive Luftzirkulation** untersuchen wollen, wählen wir für unsere Messungen Tage, bei denen die Differenz zwischen der Innentemperatur und der Aussentemperatur möglichst gross ist, mindestens sollte sie ΔT_{konv} betragen. Ist sie kleiner, könnten Effekte beobachtet werden, die durch lokale Begebenheiten hervorgerufen werden (z.B. Wind prallt auf die Felswand, lokale Luftfeuchtigkeit, ...).

Wollen wir hingegen die **barometrische Luftzirkulation** beobachten, so wählen wir Zeiten, in denen die Druckveränderungen draussen sehr schnell sind ($T_{\text{Aussen}} \approx T_{\text{Innen}}$). Die Höhle tendiert zu blasen, wenn das Wetter sich verschlechtert (Aussendruck fällt: Tiefdruck), oder Luft anzusaugen, wenn das Wetter wieder besser wird (Aussendruck steigt: Hochdruck).

In diesen Wetterlagen stellt man sich am besten für eine halbe Stunde mit einem Höhenmesser vor den Höhleneingang des zu untersuchenden Höhlensystems und schaut, ob sich die angezeigte Höhe verändert. Steigt sie, so heisst dies, dass der Luftdruck abnimmt, also sollte die Höhle Luft ausblasen. Sinkt dagegen die angezeigte Höhe, sollte die Höhle Luft ansaugen.

Messintervall

Das Messintervall sollte so gewählt werden, dass es viel kleiner ist als die erwartete zeitliche Änderung. Wir wollen zum Beispiel die Änderung der Windrichtung messen! Nehmen wir an, dass die Windrichtung in der zu untersuchenden Höhle zweimal pro Tag wechselt, so müssen wir mindestens stündlich die Windrichtung messen. Einerseits können wir damit den Zeitpunkt der Änderung der Windrichtung genauer bestimmen, andererseits erhöht sich die Zuverlässigkeit der Messungen.

Messwiederholungen

Jede Messung ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Diese kann zufällig sein (z.B. Ablesegenauigkeit) oder systematisch (Schreibfehler). Deshalb ist es nützlich, mehrere Messungen oder Beobachtungen für die gleichen Versuchsbedingungen (zum Beispiel Temperaturmessung an zwei ähnlichen Stellen in der Höhle) durchzuführen. Solche Wiederholungen werden auch Replikate genannt.

Sie führen, wie jede Erhöhung der Anzahl Beobachtungen, zu einer grösseren Genauigkeit der Aussagen. Zudem ermöglichen sie eine genauere Prüfung des Modells. Man kann aus den Wiederholungen eine Schätzung der Streuung der zufälligen Fehler gewinnen. Statistische Methoden erlauben, aus dieser Streuung die Vollständigkeit des Modells und das Vorhandensein von Wechselwirkungen zu beurteilen.

Die Auswertung von Messdaten

Das Auswerten und Interpretieren der Messresultate ist wohl der schwierigste Teil eines „Höhlenklimaprojektes“. Es ist umso schwieriger, je mehr Messstationen und Klimafaktoren miteinander verglichen werden sollen. Doch darf man vor dieser Hürde nicht zurückweichen, denn ohne sinnvolle Auswertung der Daten ist das ganze Projekt nichts wert.

Es nützt wenig, wenn viele Daten lediglich zu einem Wert zusammengefasst werden. Es wäre schade, wenn man zum Beispiel ein Jahr lang jede Stunde misst und daraus nur den Jahresmittelwert bestimmt.

Die Temperaturdaten einer Messstation können mit den Daten anderer Stationen verglichen werden. Noch interessanter ist es, Messwerte verschiedener Klimafaktoren miteinander zu vergleichen, zum Beispiel die Temperatur mit dem Luftdruck. Die Möglichkeiten sind beinahe unbeschränkt, es ist auch möglich, nicht-parametrische Daten (Schätzwerte, Ja/Nein-Antworten) zu korrelieren.

Die Statistik erlaubt uns, Zusammenhänge zwischen einzelnen Faktoren zu erkennen (Varianzanalyse) und die Wichtigkeit des Einflusses eines Faktors auf die untersuchten Parameter zu bestimmen (Hauptkomponentenanalyse). Doch können wir mit statistischen Methoden kaum Rückkopplungen erkennen, dazu müssen wir uns mit den hinter dem Phänomen steckenden, physikalischen und chemischen Prozessen abgeben.

Beachte: Die Statistik vermag keine Ursachen aufzuzeigen!

Es lohnt sich auf jeden Fall, bereits bei der Planung Gedanken über die Auswertung der Daten zu machen. Jedenfalls soll für die Planung und ganz sicher für die Auswertung der *Daten ein statistisch sattelfester Berater konsultiert* werden, der sich in der multivariaten Statistik (Varianzanalyse, Hauptkomponentenanalyse) und den nicht-parametrischen Methoden auskennt.

Reduktion der Daten

Hier geht es um das Zusammenfassen der Messungen mit dem Ziel, einen besseren Überblick zu erlangen. Dabei versuchen wir, allfällige von uns beobachtete Zyklen zu beschreiben. Ein Zyklus kann z. B. einen Tag oder eine Woche dauern. Jedoch sollen nicht zu grosse Zyklen gewählt werden, denn das interessante sind die Variationen und nicht die Mittelwerte.

Einen **Zyklus** können wir beschreiben durch:

- den **Mittelwert** der Messwerte (Mittelwert = $\frac{\text{Summe der Messwerte}}{\text{Anzahl der Messwerte}}$)
- die **Standardabweichung der Messwerte** (Mass für die Streuung der Daten)
- den **Median** (mittlerer Messwert, wenn diese nach Grösse sortiert werden)
- den höchsten Messwert (**Maximum**)
- den tiefsten Messwert (**Minimum**)
- der Unterschied zwischen Maximum und Minimum (**Amplitude**)

Beispiel einer Beschreibung eines Tageszyklus eines Klimafaktors.

Tageszyklus		
Messstation	Höhlenregion	Höhle
Mittelwert der Messwerte	Mittelwert der Messwerte	Mittelwert der Messwerte
Maximum	Mittelwert der Maxima	Mittelwerte der Maxima
Minimum	Mittelwert der Minima	Mittelwerte der Minima
Amplitude	Mittelwerte der Amplituden	Mittelwerte der Amplituden

Beispiel einer statistischen Auswertung:

Leider würde es den Rahmen dieser Arbeit sprengen, alle statistischen Begriffe zu erläutern. Hier sind zur Veranschaulichung einige **statistischen Kenngrössen** an folgendem konstruierten Beispiel von Temperaturmessungen aussen und an 2 Stellen in der Höhle berechnet:

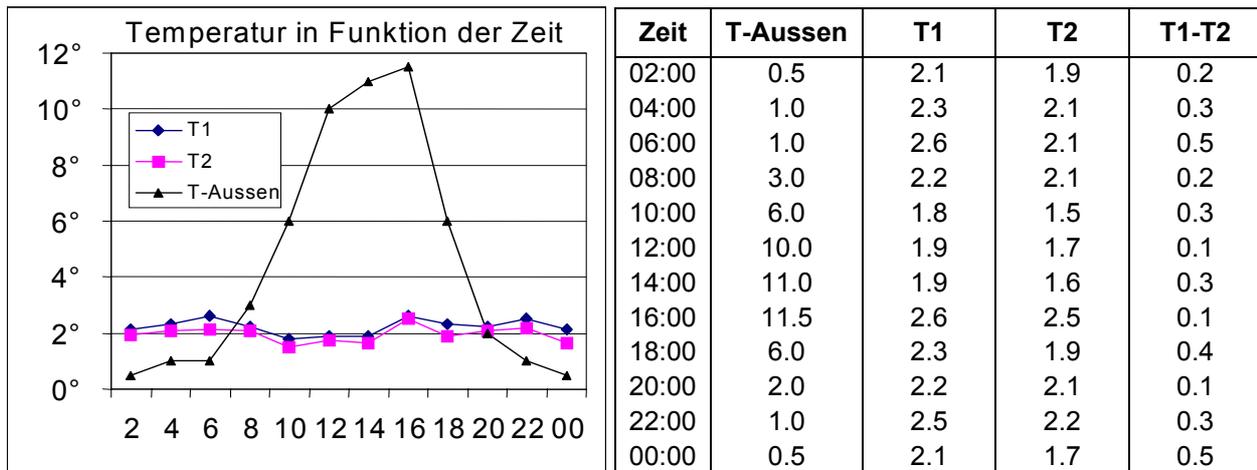
Modell

T-Aussen = Phantasiewerte

T1 = $2.2^\circ + \text{Zufallszahl von } -0.5 \text{ bis } +0.5$

T2 = $T1 - 0.3^\circ + \text{Zufallszahl von } -0.2 \text{ bis } +0.2$ d.h. 0.3 kleiner als T1 mit Zufallsfehler

Alle Zahlen sind gerundet, darum stimmt T1-T2 mit einer Dezimalstelle scheinbar nicht immer



Die „einfachen“ statistischen Kenngrössen

Diese beruhen je auf einer Serie von Messdaten:

- Mittelwert (Durchschnitt pro Kolonne)
- Standardabweichung (Schwankung der Daten)
- 95% Vertrauensbereich des Mittelwerts
- kleinster Wert (Minimum)
- grösster Wert (Maximum)
- Amplitude
- Median (Zentralwert)

T-Aussen	T1	T2	T1-T2
4.5	2.2	2.0	0.3
4.3	0.3	0.3	0.1
4.5 ± 2.7	2.2 ± 0.2	2.0 ± 0.2	0.3 ± 0.1
0.5	1.8	1.5	0.1
11.5	2.6	2.5	0.5
11.0	0.9	1.0	0.4
2.5	2.2	2.0	0.3

Dieses Beispiel zeigt, dass als „Messwert“ nicht nur die Temperatur einer Messstelle betrachtet werden kann. Es kann auch interessant sein, statistische Grössen an Temperaturdifferenzen zu berechnen: Hier beträgt die Amplitude der 2 Messstellen T1 und T2 je ca. 1°C , diejenige der Temperaturdifferenzen aber nur 0.4°C (siehe Beispiel).

Zum Vertrauensbereich: Mit 95% Wahrscheinlichkeit liegt der „wahre“ Wert innerhalb des Vertrauensbereichs). Stark vereinfacht kann man 2 Mittelwerte dann als verschieden betrachten, wenn sich die Vertrauensbereiche nicht überdecken.

Zur Bedeutung des oft vernachlässigten Medians: Dieser ist bezüglich Ausreisser stabiler als der Mittelwert. Im obigen Beispiel gewichtet er die 3 hohen Temperaturen weniger als die 6 tiefen. (Anderes Beispiel: Der Mittelwert von [0.6, 1, 1.5, 1.9, 20] beträgt 5, der Median 1.5).

Vergleichende statistische Grössen

Die **Regression** beschreibt den Zusammenhang von 2 Messreihen, hier die Temperaturen T1 und T2.

Die Regression von T2 und T1 mit den Daten des obigen Beispiels gibt:

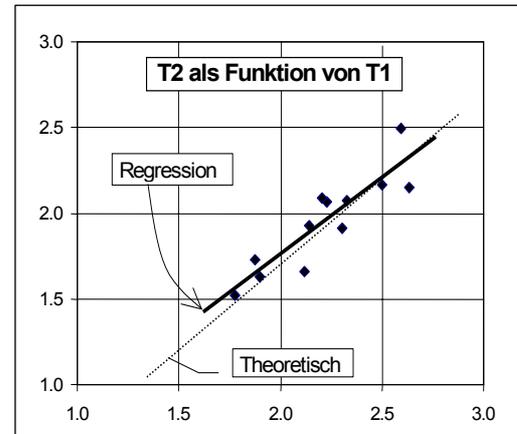
$$T2 = 0.89 \times T1 - 0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

mit einem Bestimmtheitsmass $R^2 = 0.80$.*)

Dies kann verglichen werden mit dem Sollwert aus der Konstruktion der Daten:

$$T2 = 1.00 \times T1 - 0.30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

*) $R^2 = 0.80$ bedeutet: 80% der Variation können durch die Gerade $T2 = 0.89 \times T1 - 0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$ erklärt werden.



Die **Korrelationen** zeigen, ob Messreihen voneinander abhängig sein könnten. Dabei variieren die Korrelationskoeffizienten von -1 (grösste gegenläufige Abhängigkeit) bis +1 (gleichläufige Abhängigkeit). Mit dem obigen Beispiel:

Korrelationskoeffizienten

	Zeit	T-Aussen	T1	T2	T1-T2
Zeit	1				
T-Aussen	0.12	1			
T1	0.05	-0.31	1		
T2	-0.02	-0.10	0.89	1	
T1-T2	0.15	-0.44	0.23	-0.23	1

Wie aus der Konstruktion der Daten erwartet, sind T1 und T2 hoch korreliert.

Allerdings scheint es auch einen gewissen Zusammenhang zwischen T-Aussen und T1-T2 zu geben. Aus der Konstruktion der Daten ist dies aber unmöglich, was zeigt, dass die statistischen Grössen mit Vorsicht interpretiert werden müssen.

Mögliche Projekte

Windkarte

Erstellen von meteorologischen Karten des Höhlensystems: Je eine Karte für die konvektive und für die barometrische Luftzirkulation. Die Karten sollten nicht nur Richtungspfeile, sondern soweit möglich auch Informationen über Windgeschwindigkeiten und Volumen beinhalten. Nicht vergessen, jeweils Datum, Lufttemperatur und Luftdruck der Aussenatmosphäre anzugeben.

Windprofil eines Gangquerschnittes

Die Windgeschwindigkeit wird auf verschiedenen Höhen über Boden gleichzeitig gemessen. Ideal wäre ein Abstand der einzelnen Anemometer (Windmessgeräte) von 20 bis 50 cm. Ist der Gang genügend breit, kann die Windgeschwindigkeit zusätzlich bei verschiedenen Abständen von den Höhlenwänden gemessen werden.

Kondensationskarte

Erstellen einer Karte über die Kondensationsphänomene in Höhlen. Interessant sind jene Stellen, an denen sich richtige Tropfen an den Wänden bilden (Kondensation), sowie jene, an denen der Fels „trocken“ ist.

Höhleneiskarte

Erstellen einer Karte über das Höhleneisvorkommen, ihre Ausdehnung, sowie ihre jahreszeitliche Verteilung sollten dokumentiert werden.

Temperaturgradient der Luft

Alle 30 bis 50 Höhenmeter wird eine Messstation in der Luft eingerichtet. Der Verlauf, der durch die Messdaten entstandenen Kurve könnte uns erlauben, Aussagen darüber zu machen, in welchen Höhlenabschnitten Luft und in welchen Wasser die Lufttemperatur dominiert, oder ob es Luftzufuhren von noch nicht erschlossenen Höhlenpartien gibt.

Temperaturgradient des Wassers

Alle 30 bis 50 Höhenmeter wird eine Messstation im Wasser eingerichtet. Der Verlauf, der durch die Messdaten entstandenen Kurve, kann Aufschluss geben über unbekanntes Zuflüsse.

Vergleich Temperaturgradient des Wassers mit jenem der Luft

Vorgehen wie oben, doch je eine Messstation im Wasser und eine an der Luft.

Temperaturprofil eines Gangquerschnittes

An die Decke eines hohen Ganges wird ein Seil gehängt, an dem alle Meter eine Messstation befestigt ist. Ist der Gang genügend breit, können im Abstand von ebenfalls einem Meter weitere Seile eingerichtet werden.

Felstemperatur

In einem ca. 10 cm tiefen Bohrloch im Fels wird ein Thermometer plaziert und das Loch zugekittet.

Mittlerer Tagesverlauf der Temperatur

Wir messen jede Stunde die Temperatur, machen jedoch keine Tagesmittel, sondern mitteln die Temperatur der jeweiligen Tagesstunden. So erhalten wir eine mittlere Jahrestemperatur um Mitternacht, ein Uhr, zwei Uhr ...

Analog könnte man auch die Temperaturen bei Sonnenaufgang etc. mitteln.

Einfache Feldmethoden

[Messungen nach Möglichkeit mehrmals durchführen]

Luftdruck

Der Luftdruck kann mit jedem normalen Höhenmeter gemessen werden.

Abschätzung der Windgeschwindigkeit

Praktisch in allen Höhlenteilen zirkuliert Luft oft so fein, dass wir sie mit unseren Sinnen nicht mehr wahrnehmen können. Um die Luftbewegung sichtbar zu machen, kann man Rauch (notfalls auch Hauch) beobachten. Gleichzeitig kann man mit einer Uhr die Zeit messen, die der Rauch für das Zurücklegen einer gewissen Distanz benötigt. Damit kann man die Windgeschwindigkeit abschätzen (Beispiel: 4 Meter in 2 Sekunden = 2 m/s). Die Abschätzung sollte mehrmals hintereinander durchgeführt werden, um das Resultat zu bestätigen (Durchschnitt nehmen).

Abschätzen einer Bachschüttung

1. Variante

Die Fülldauer [s] eines Litermasses wird mit der Uhr gemessen. Die Litermenge des Gefässes geteilt durch die Fülldauer ergibt dann die Schüttung [l/s]. Beispiel: Ein 2-Liter-Mass wird in 10 Sekunden gefüllt, dies ergibt 0.2 l/s. An Stelle eines Litermasses kann einfacher auch ein Plastiksack bekannter Grösse verwendet werden. Er hat den Vorteil, dass er formrichtig an den Felsen angepasst werden kann.

2. Variante

Zuerst wird die Durchflussfläche S [dm²] an einer Stelle mit mehr oder weniger konstantem Profil geschätzt: Bachbreite [dm] mal Bachtiefe [dm]. Zur Berechnung der Fliessgeschwindigkeit wird geschaut, wie weit ein schwimmendes Teilchen (Korkzapfen o.ä.) in einer gegebenen Zeit schwimmt. Zum Messen ist es praktisch, wenn man während 3 bis 5 Sekunden misst und die zurückgelegte Strecke durch die Schwimmdauer [s] teilt. Die durchströmte Fläche [dm²] multipliziert mit der Fliessgeschwindigkeit [dm/s] ergibt dann die Schüttung (dm³/s = l/s). Wegen verschiedenen Effekten muss dieser Wert noch mit einem ziemlich empirischen Korrekturfaktor von 0.4 multipliziert werden:

$$Q = 0.4 * S * v$$

Wobei: Q = Schüttung [dm³/s = l/s]
 S = Durchflussfläche [dm²]
 v = Fliessgeschwindigkeit [dm/s]

Standards für Langzeittemperaturmessungen in Höhlen

Zum Vergleich von Temperaturen braucht es eine Übereinkunft, wie gemessen wird. So ist zum Beispiel der oft verwendete Begriff „Aussentemperatur“ eine schlecht definierte Grösse. Es kommt sehr darauf an, ob wir im Schatten oder an der Sonne messen, ob wir am Boden oder 10 Meter über Boden messen, ...

Die Festlegung eines Standards für die Messung der Höhlenlufttemperatur hat sich als problematisch erwiesen. Die Arbeitsgruppe „Standards“ der Höhlenklimagruppe SGH/SISKA schlägt daher zwei alternative Konzepte vor:

Top-Down-Ansatz Festlegung relativ willkürlicher, theoretisch begründeter Messstandards, mit der Gefahr, dass sie nicht eingehalten werden können und sich deshalb als wenig brauchbar erweisen.

Bottom-Up-Ansatz Die Erfahrung aus den einzelnen Projekten sollen zeigen, welche Regeln für alle Sinn machen.

Der Top-Down-Ansatz: Standards

Standardlufttemperatur

Für die Messung der Aussenlufttemperatur werden die Standards von SMA-MeteoSchweiz vorgeschlagen:

- * Vor Sonne geschützt
- * 2 Meter über Boden
- * Windgeschwindigkeit maximal 4 m/s
- * Messintervall 1 Stunde (SMA: 10 Minuten)

Grasminimumtemperatur

In Bodennähe ist die Temperatur wesentlich anders als 2 m über Boden. Da die Höhleneingänge am „Boden“ sind, könnte diese Temperatur interessant sein (Untersuchungen dazu sind zur Zeit in Gange).

- * einige Zentimeter über Boden
- * ohne Strahlungsschutz, dafür aber in weissem Kunststoff eingegossen/eingepackt.

Höhlenlufttemperatur Standard (HLTS)

Aus den obigen Standards (Standardlufttemperatur und Grasminimumtemperatur) wurde ein Standard für die Höhlenlufttemperatur abgeleitet. Dieser Standard versucht die Störfaktoren bei der Messung der Lufttemperatur in einem Höhlengang möglichst auszuschalten oder wenigstens zu vereinheitlichen.

- * kein Höhlenwind
- * kein fliessendes Wasser in der Nähe
- * in Raummitte messen
- * Messintervall: 1 Stunde

Bei dieser Festlegung ergeben sich einige Probleme:

- * Es gibt Messstandorte, bei denen diese Bedingungen nicht eingehalten werden können.
- * Ein Messstandort kann unter dem Einfluss des vorangegangenen Gangabschnittes stehen, der vielleicht massiv Wasser führt.

Es empfiehlt sich, beim Messprotokoll auf allfällige Abweichungen vom Standard hinzuweisen.

Der Bottom-Up-Ansatz: Messziele sind massgebend

In diesem Ansatz steht das Projekt der Temperaturmessung im Zentrum.

Der erste Schritt muss festlegen, welche Fragestellung mit den Messungen verfolgt werden soll. Erst danach erfolgt die Auswahl des geeignetsten Messkriteriums.

Wie die Temperatur gemessen wird, ist also abhängig vom Ziel des Projekts und nicht von einem Standard.

Auch bei diesem Ansatz ist entscheidend, dass jede Messung gut dokumentiert ist, d.h. von jeder Messung muss sich nachvollziehen lassen, wie gemessen wurde (siehe Messprotokoll).

Messintervall

Klimatische Prozesse sind dynamisch: Die Temperatur verändert sich kontinuierlich, wenn auch meistens innerhalb einer bestimmten Bandbreite. Eine Messung ist daher als Stichprobe einer dieser unzähligen Temperaturen zu verstehen, die einen Augenblick später vielleicht um 0.2 °C höher oder tiefer liegen kann. Der vorgeschlagene Höhlenlufttemperatur-Standard mit dem Intervall von einer Stunde geht davon aus, dass die meisten Projekte den zeitlichen Verlauf der Temperatur (z.B. über Tage, Monate, Jahre) untersuchen wollen. Dieses Intervall erlaubt es, die Datalogger ein Jahr ohne Wartung in der Höhle auszuhängen. Wenn auch Informationen über kurzfristig ablaufende Temperaturveränderungen verloren gehen, macht das für unsere Untersuchungen Sinn, solange man Veränderungen im Bereich von 0.1 Grad nicht überbewertet. Je kürzer wir das Intervall wählen, desto mehr Informationen erhalten wir über den Temperaturverlauf, desto kleiner muss aber der Messfehler sein (unter 0.1°C!). Das stellt uns aber klar vor technische Probleme (kaum realisierbare Auflösung der Datalogger).

Messjahr

Das hydrologische Jahr mit Einzugsgebiet im Gebirge dauert jeweils vom 1. Oktober bis zum 30. September des folgenden Jahres. Für das glaziologische Jahr wurden die gleichen Daten festgelegt, da es sehr gut mit der grössten Ausaperung der Gletscher, respektive dem ersten Einschneien übereintrifft. Da die Endoklimatologie stark von der Hydro- und Kryosphäre (Bezeichnung für die gesamte Eis- und Schneehülle der Erde) abhängen dürfte, stellt sich für uns die Frage, ob wir unsere Messungen ebenfalls auf das hydrologische Jahr ausrichten sollen, um die Daten besser vergleichen zu können.

Das „Messprotokoll Höhlenklima“ (MHK)

Jede gute Messung beinhaltet eine Dokumentation. Dabei ist es wichtig, dass Tatsachen getrennt von Interpretationen aufgeschrieben werden. Die Arbeitsgruppe schlägt daher einige Punkte vor, die ihrer Meinung nach in ein Messprotokoll gehören.

Angaben zur Höhle

- kurze Beschreibung des Karstgebietes
- Lage der Höhleneingänge
- Oberflächenskizze

Angaben zum Messpunkt

- Koordinaten (relativ zum Höhleneingang, wenn die Eingangskordinaten der Höhle nicht bekannt gemacht werden).
- Entfernung der Messstation zur Erdoberfläche in Lotrichtung und in der Horizontalen.
- Ganglänge zwischen Höhleneingang und Messpunkt (für alle Eingänge).
- Raumdimensionen (links, rechts, oben, unten in Bezug zur Messstation / bei Schächten ebenfalls vorne, hinten).

Angaben zum Witterungsverlauf

- allgemeine Wetterlage (Hoch, Tief)
- spezielle Wetterereignisse (Kälteeinbruch, Hitzewelle, starker Regen, grosse Schneemenge, Föhn)

Dokumentation im Höhlenplan

Für diese Angaben müssen noch geeignete Signaturen gefunden werden.

- Signatur für die Messstationen
- Signatur für Wind (Richtung, Datum, Aussenwitterung, Geschwindigkeit)
- Wasserläufe (Durchflussmenge)
- Eintrag des zeitlichem Verlaufs von Schnee und Eis
- Kondenswasser

Tips & Tricks zu den Temperatur-Messgeräten

Grundsätzliches:

Jede Messung, die ungewollt verfälscht oder mit unsachgemäß eingestellten Geräten ausgeführt wurde ist nichts wert (systematischer Fehler). In den folgenden Abschnitten werden daher einige Tips und Tricks im Umgang mit den Messgeräten aufgeführt.

Kalibrieren von Temperatur-Loggern

Die Kalibration ist die Justierung eines Gerätes mit Hilfe eines geeichten Gerätes oder eines anderen Hilfsmittels (bei Thermometern zum Beispiel Eiswasser). Dabei geht es um die Korrektur der Abweichung des Messwertes des jeweiligen Messgeräts von einem Referenzwert.

Bei gewissen Projekten reicht es jedoch, zu wissen, wieviel die Geräte voneinander abweichen. Dies sind alle Projekte, bei denen uns die zeitlichen Änderungen mehr interessieren, als die absoluten Werte der Messungen.

Kalibration auf 0°C

Wasser hat die Eigenschaft, dass es sowohl in fester als auch in flüssiger Form 0 °C annehmen kann. Diese Eigenschaft können wir zur Kalibration benutzen:

1. In einem Kessel wird ein Gemisch aus zerhacktem Eis und Wasser angemacht (viel Eis verwenden!). Das Eis-Wasser-Gemisch wird sich auf die Schmelztemperatur von Eis (0 °C) einstellen und konstant bleiben, bis alles Eis geschmolzen ist. (Wenn möglich destilliertes Wasser verwenden.)
2. Die Logger werden mit einem kurzen Messintervall (z.B. 30 Sekunden) programmiert.
3. Die Logger kommen für etwa 30 Minuten in den Kessel, wobei das Eiswasser mit einer Kelle (nicht von Hand) etwas gerührt wird. (Darauf achten, dass immer Eis vorhanden ist.)
4. Nachher werden die Messdaten ausgelesen. Diese sollten sich nach wenigen Minuten eingependelt haben und für den Rest der Messung konstant bleiben.

Der konstante Bereich dieser Messreihe sollte bei 0 °C liegen. Andernfalls müssen alle künftigen Messungen des Loggers mit dem Betrag der Abweichung korrigiert werden (dazuzählen oder abziehen).

Probleme beim Kalibrieren

Probleme können einerseits durch das Gerät selbst entstehen (Fehlproduktion, schlechte Auflösung etc.). In diesem Fall ist mit dem Hersteller Kontakt aufzunehmen.

Andererseits können Probleme mit dem Eiswasser auftauchen (z.B. Trend in der Messreihe). Es ist daher von Vorteil, für die oben beschriebene Kalibrierung einen kühlen und eher dunklen Standort zu wählen.

Zur Kontrolle der ersten Kalibrierung empfehlen wir das Gerät bei einer anderen Temperatur zu testen.

Die Messung in der Höhle

Bei der Messung selbst können grosse Fehler wegen unachtsamer Handhabung entstehen.

Erstens darf das Messgerät während der Messung nicht mit Personen in Berührung kommen.

Zweitens braucht es etwas Zeit, um sich den neuen Bedingungen anzupassen (z.B. nach dem Transport im Höhlenkombi).

Messgenauigkeit ↔ Auflösung

Die Begriffe Genauigkeit und Auflösung müssen auseinander gehalten werden. Es gibt (billige) Thermometer, die Zehntelgrad anzeigen (Auflösung), doch trotz Kalibration nur eine Genauigkeit von $\pm 2^\circ$ erreichen (Messgenauigkeit).

„Eine Messung ist keine Messung.“ Vor allem ist eine Messwiederholung eine Bestätigung der vorangegangenen Daten. Im weiteren kann durch Messwiederholungen die Genauigkeit mit statistischen Mitteln erhöht werden (z.B. erhöht sich die Genauigkeit beim Durchschnitt aus 100 unabhängigen, hintereinander gemessenen Temperaturen auf das Zehnfache). Theoretisch kann eine Messung durch Wiederholung immer genauer werden. Da die Messungen aber unabhängig voneinander sein müssen (nicht einfach x-mal ablesen), wird der Zeitaufwand so gross, dass die Temperaturschwankungen während der Messzeit grösser werden als die Messgenauigkeit. Ein sinnvoller Kompromiss muss gesucht werden, zum Beispiel 5 bis 10 Messungen in der Minute.

Gute Datalogger führen eine Temperaturmessung innerhalb weniger Sekunden mehrmals aus und speichern dann als Messwert den Durchschnitt der Werte. Bei den meisten von Höhlenforschern verwendeten Loggern (Hotdog, UTL-1) sind nur feste Intervalle wählbar. Bei einer Messung wird der Messfehler nicht durch viele Kurzzeitmessungen minimiert. Mit den vom Hersteller angegebenen Fehlern von ± 0.1 bis ± 0.2 °C müssen wir daher leben. Für den jetzigen Stand unserer Arbeit muss man sich auch fragen, ob eine grössere Genauigkeit notwendig ist.

Anhang: Variablen, Konstanten, Einheiten

Hier werden die wichtigsten Variablen und Konstanten des Skripts aufgelistet, sowie die wichtigsten Einheiten.

Variablen

- a = Wärmeleitfähigkeit des Gesteins [W/(m*K)]
- C_p = Wärmekapazität [J/(kg*K)]
- D = Gangdurchmesser [m]
- d = spezifische Luftfeuchtigkeit [kg/kg]
- E = Energie [J]
- f = Reibungskoeffizient
- G = Temperaturgradient [°C/m]
- H = Enthalpie [J]
- H_R = Widerstand der Höhle [m]
- I = Stromstärke (I_V = [m³/s]; I_M = [kg/s])
- k = Koeffizient für Prozessgeschwindigkeit
(langsamer Prozess = isotherm => k = 1; schneller Prozess = adiabatisch => k = 1.4)
- K = winkelabhängiger Reibungsfaktor
- L = Ganglänge [m]
- m = Masse [kg]
- n = Anzahl Teilchen [mol]
- P = Druck [Pa]
- P_M = bewegungswirksamer Druck [Pa]
- P_S = Sättigungsdampfdruck [Pa]
- P_V = Partialdruck des Wasserdampfes [Pa]
- Q = Fluss [m³/s]
- Q = Wärme [J]
- r = relative Luftfeuchtigkeit
- R = Widerstand im elektrischen Modell
- R_e = Reynold's Zahl
- S = Gangprofil [m²]
- t = Zeit [s]
- T = Temperatur [K]
- T_{°C} = Temperatur [°C]
- T_C = charakteristische Zeit [s]
- T_V = virtuelle Temperatur [K]
- U = innere Energie [J]
- v = Geschwindigkeit [m/s]
- V = Volumen [m³]
- W = Arbeit [J]
- x = Einheitslänge [m]
- z = Höhe [m]
- β = Viskosität [Ns/m²]
- μ = Molmasse [kg/mol]
- ρ = Dichte [kg/m³]

Einheiten

Grad Celsius °C: 0 °C = 273.15 K

Kelvin K: 0 K = -273.15 °C

mol: 1 mol entspricht $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen

$$\text{Newton} = N = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Pascal} = Pa = \frac{N}{\text{m}^2}$$

Hektopascal: 1 hPa = 1 100 Pa

$$\text{Joule} = J = N \cdot m = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\text{Watt} = W = \frac{J}{s} = \frac{N \cdot m}{s}$$

Konstanten

g = Fallbeschleunigung 9.81 m/s²

L_v = Kondensationswärme von Wasser 2.256*10⁶ J/kg

R = universelle Gaskonstante 8.31451 J/(mol*K)

μ_{Luft} = Molmasse der trockenen Luft 28.966 g/mol

μ_{Wasser} = Molmasse des Wassers 18 g/mol

Standards

Standardatmosphäre

- trockene Luft
- bei 0 m ü. M.: Luftdruck = 101325 Pa bei 15 °C
- Temperaturgradient = -6.5°C

Üblicherweise verwendete Temperaturgradienten

- * Standardatmosphäre -6.5 °C/km
- * trockene Luft -9.7 °C/km
- * feuchte Luft -5 bis -6 °C/km
- * Höhlenluft -3 bis -3.5 °C/km
- * Wasser -2.3 °C/km
- * geothermischer Tiefengradient -33 °C/km

Literaturverzeichnis

- Andrieux C., 1971, Contribution à l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques IV - Influence de la morphologie des galeries de la forme et de l'orientation des ouvertures sur le climat souterrain, Annales de Spéléologie 26/1.
- Badino G., 1995, Fisica del Clima Sotterraneo, Instituto Italiano di Speleologia, Bologna.
- Bakalowicz M., 1972, La rivière souterraine de Pinargözü, Annales de Spéléologie 27/1.
- Bögli A., 1978, Karsthydrographie und physische Speläologie, Springer Verlag, Berlin.
- Chopy J., 1986, Dynamique de l'air, Spéléo-Club de Paris, Paris.
- Conn H.W., 1966, Barometric wind in Wind and Jewel caves in South Dakota, Bull. N.S.S. 28/2.
- Formeln und Tafeln: Mathematik und Physik – 6. Auflage; Orell Füssli; 1995; Zürich.
- Giles R., 1975, Meccanica dei Fluidi ed Idraulica, Etas Libri, Milano, 1975.
- Imboden D., 1999, Differentialgleichungen und Systemanalyse – Teil Systemanalyse, Umweltphysik ETHZ, Dübendorf.
- Jeannin P.-Y., 1997, Some concepts about heat transfer in karstic systems, 12. Int. Congress of Speleology Volume 1 S. 195ff, La Chaux-de-Fonds .
- Lowrie W., 1997, Fundamentals of Geophysics, Cambridge University, Cambridge.
- Matveev L., 1967, Physics of the atmosphere, IPST, Jerusalem.
- Pechhold E., 1997, CO₂-Gehalt von Luft und Wasser im vadosen Karst und in der Bodenaufgabe, 12. Int. Congress of Speleology Volume 1 S. 211ff, La Chaux-de-Fonds.
- Press F. und Siever R., 1995, Allgemeine Geologie, Spektrum Akademischer Verlag, Berlin.
- Rotach M. und Blatter H., 1998, Einführung in die Klimatologie - Vorlesungsskript zu Klimatologie und Hydrologie I, Geographisches Institut ETHZ, Zürich.
- Sexel R., 1990, Das mechanische Universum - Eine Einführung in die Physik I, Sauerländer Verlag, Aarau.
- Slabe T., 1995, Cave Rocky Relief; Znanstvenoraziskovalni Center Sazu, Ljubljana.
- Stahel W. A., 1999, Statistische Datenanalyse - Eine Einführung für Naturwissenschaftler, Vieweg, Wiesbaden.
- Ohmura A., 1999, Grundzüge der Erdwissenschaften: Klima und Wasserkreislauf – Hilfsmittel zur Vorlesung, ETHZ, Zürich.