



EAWAG **ETH**

Hydrosphäre (WS 04 /05)

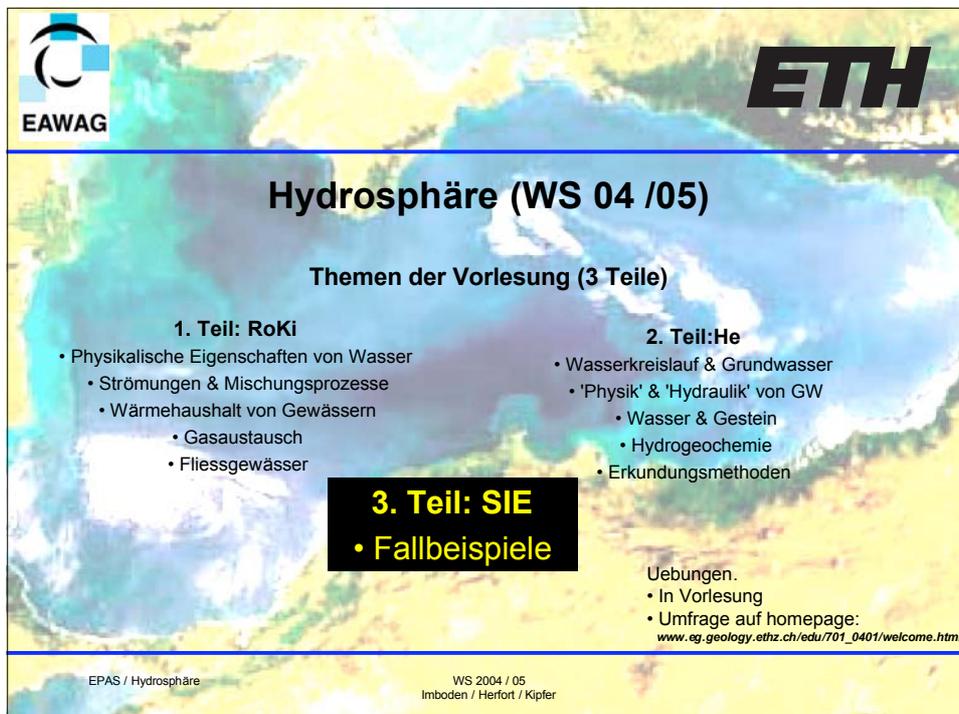
gelesen in UMNW /Erdwissenschaften durch
Martin Herfort (ETHZ, ErdW): herfort@erdw.ethz.ch, 044 633 6829
RoKi (EAWAG, UMNW): kipfer@eawag.ch, 044 823 5530
www.eg.geology.ethz.ch/edu/701_0401/welcome.html

- **Ziel: 0. - 1. Verständnis der (umweltphysikalischen) Prozesse in der aquatischen Umwelt (See, Flüsse & Grundwasser)**
... in 13. Wochen a 2 Stunden (Sisyphus lässt grüssen) ...

(Obligatorische) Literatur: als Reader & Ergänzung zur Vorlesung
Ch. Park: 'Environment', 2001 (2. ed). Routledge UK, ISBN0-415-21771-7
M. Price: 'Introducing groundwater', 1996, 2 edition. Chapman & Hall, London

Nur die Vielfalt garantiert ein stabiles Ökosystem. Das widerspricht irgendwie der Einfalt der Menschen ... *Wolfgang J. Reus*

EPAS / Hydrosphäre WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipfer



EAWAG **ETH**

Hydrosphäre (WS 04 /05)

Themen der Vorlesung (3 Teile)

1. Teil: RoKi <ul style="list-style-type: none">• Physikalische Eigenschaften von Wasser• Strömungen & Mischungsprozesse• Wärmehaushalt von Gewässern<ul style="list-style-type: none">• Gasaustausch• Fliessgewässer	2. Teil: He <ul style="list-style-type: none">• Wasserkreislauf & Grundwasser• 'Physik' & 'Hydraulik' von GW<ul style="list-style-type: none">• Wasser & Gestein• Hydrogeochemie• Erkundungsmethoden
---	--

3. Teil: SIE

- Fallbeispiele

Übungen.
• In Vorlesung
• Umfrage auf homepage:
www.eg.geology.ethz.ch/edu/701_0401/welcome.html

EPAS / Hydrosphäre WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipfer

Vor dem Beginn: Wo steckt das Wasser auf der Erde?



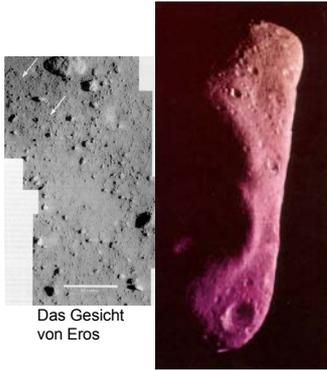
'The dark side of the Moon'
Wasser !!!



da...

Erde & Mond gesehen vom Mars
11.10.2004

**~ 3% der Erdmasse
ist Wasser...**



Das Gesicht
von Eros

EPAS, Hydrosphäre

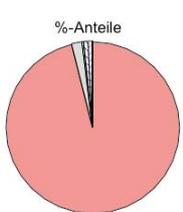
WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipler



... schon eher erwartet...

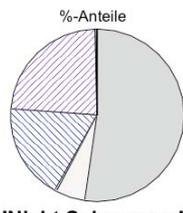


Total 'Wasser'
1.4 10⁹ km³



das Meer...

'Nicht Salzwasser'
0.052 10⁹ km³



**Wasserressourcen
auf der Erde**



je 50% des Rests...



EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipler



ETH

... oder in Wort (& Zeit)

Wasservorkommen der Welt

nach Gleick et al ("Water in Crisis, 1988) & Kandel ("Water from Heaven", 2003)

Wasser Reservoir	Volumen [10 ⁶ km ³]	rel. Anteil [%]	'Dicke' [A/V, m]	Erneuerungszeit [yr]	Kommentare:
Total	1422	100	2800	~ 4E+09	• Feste Erde enthält 10-50 x mehr Wasser als die Ozane
Salzwasser	1370	96.3	3750	3700	
'LGM'	40	2.8	120		• Niederschlag & Verdunstung
rezentes Eis	29	2	2000	30 - 600E3	
geschmolzen			80		[km/yr]
Permafrost	0.3	0.21	15	8000	Meer
Bodenfeuchte	0.066	0.005	0.8	1 Monat	Kontinente
Grundwasser	(23)	(1.6)			Verdunstung
'süßs'	10	0.7	65	50 - 5E6	5 E+05
'salzig'	13	0.9	85	extrem lange	6.8E+04
Süßwasser Seen	0.12	0.008	75	10 -1000	Niederschlag
Atmosphäre	0.013	91 ppm	26 mm	8 - 9 Tage	4.6E+05
Fließgewässer	0.002	1.4 ppm	13 mm	18 Tage	1.2E+05
Biosphäre	0.001	0.7 ppm	2 mm	Stunden	

→ 1 -1.4 m/yr !

EPAS, Hydrosphäre
WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipler

ETH

Und der Rest? Seen...
oder 'Why size matters...'

Seen & 'Seen' der Welt

nach Meybeck (1995)

• Anzahl Seen (global)

Fläche A ₀ [km ²]	0.01	0.1	1	10	100	1000	1E4	1E5
Anzahl	7.2E6	1.1E6	1.3E5	1.2E4	1400	120	18	1

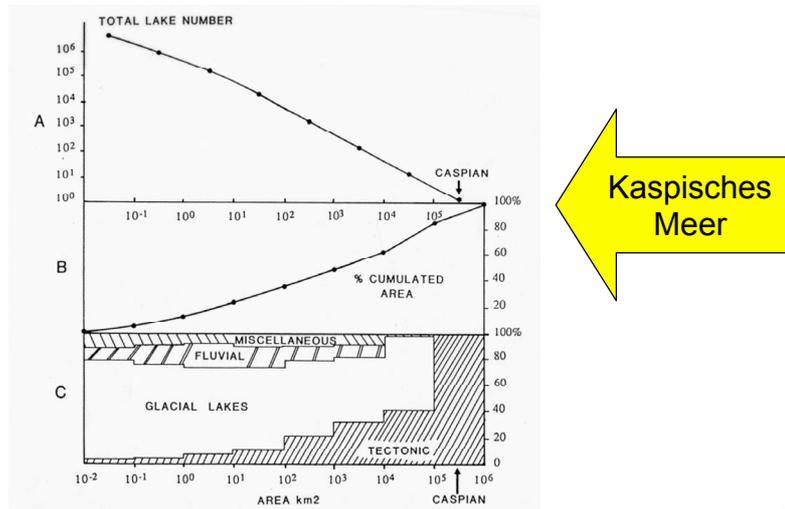
• Ursprung (%) der Seen mit A₀ > 1 km² (~ 140000) und A₀ > 100 km² (~ 1400)

	tektonisch	glazial	fluvial	vulkanisch, Krater,	Lagunen	diverse
	8.2	62.6	20.7	0.2	2.3	6.0
	19.2	59.0	10.5	0.4	5.4	5.5

EPAS, Hydrosphäre
WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipler

und der Rest? Seen...

als Figur



EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipfer

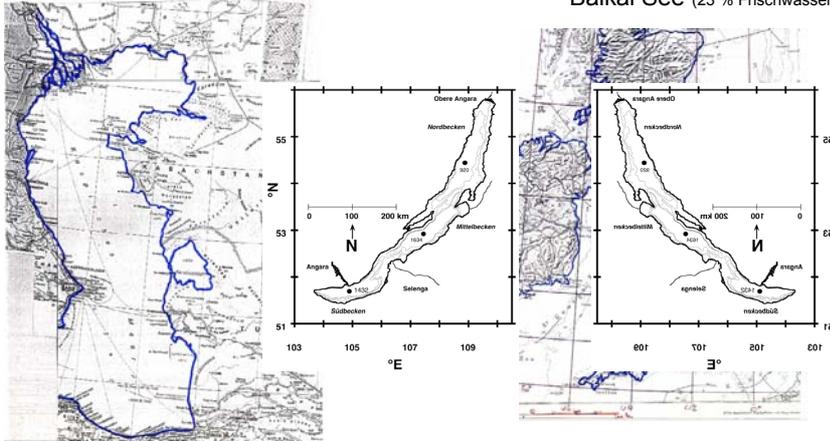


Seen..., ja und wie



Der See der Erde:
Kaspisches Meer

Der wirkliche See der Erde:
Baikal See (23 % Frischwasser)



EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipfer



Warum Wasser?



deshalb:

- **Häufigstes** Molekül in der Biosphäre
- **Extreme physikalische** Eigenschaften (!)
- **Wichtigste** Flüssigkeit in der Hydrosphäre

- **Lebensbedingungen**
 - Temperatur & Wärme
 - Licht
 - Chemie (Löslichkeit etc.)
 - Wasserverfügbarkeit
- **Dynamik und Transport in aquatischen Systemen**
 - Stofftransport (poröse Medien, kleine Skalen)
 - Strömungsscherung (Randbereiche, kleine Skalen)
 - Konvektion
 - Einschichtungen in Seen

EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipler



Extreme Eigenschaften (eE): Spezifische (c_p) & latente Wärme (L_f , L_v)

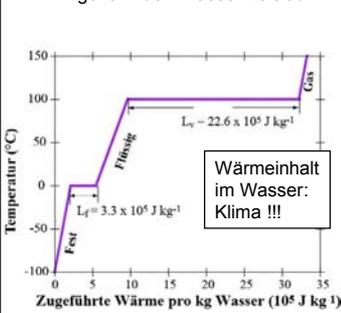


Spezifische Wärme.
~ 4.2 kJ kg⁻¹ K⁻¹.
Ozeanisches - Kontinentales Klima.

Latente Wärme (Phasenübergänge !).
riesig: ~ 2.4 MJ kg⁻¹.
~ 1/4 der einfallenden Solarstrahlung
'geht' in den Wasserkreislauf.

Eigenschaft	Wasser	Andere Substanzen
Spez. Wärme c_p , 25°C	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	4.18 10 ³ a)
	Eis, 0°C	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
Verdampfungswärme 25°C	[J kg ⁻¹]	2.44 10 ⁶
	Schmelzwärme 0°C	[J kg ⁻¹]
		Al: 0.90 10 ³ Fe: 0.44 10 ³ H ₂ -Gas: 14.3 10 ³ He: 5.18 10 ³ CO ₂ (0°C): 2.32 10 ⁵ NH ₃ (0°C): 1.26 10 ⁶

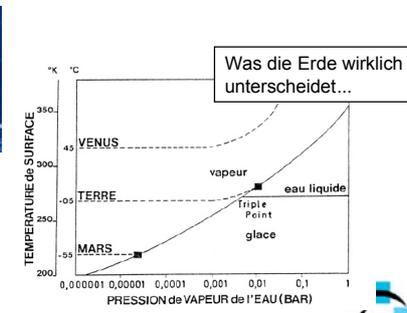
a) Zwischen 0°C und 100°C schwankt c_p von Wasser nur um ungefähr 1%.



Wärmeinhalt im Wasser: Klima !!!



Hurricane Andrew, 1992



Was die Erde wirklich unterscheidet...

EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipler



EE 2: Oberflächenspannung (γ) & Wärmeleitfähigkeit



Oberflächenspannung.
 Nur jene von Hg ist grösser.
Adhäsion & Kohäsion.
 Wichtig für die Physiologie der Zelle.
 Ökologische Nischen.
Tropfenbildung & Wasser in Böden.

Wärmeleitfähigkeit.
 Am grössten von allen FK.
 Relevant über kleine Skalen (Zelle / Heizung,
 grosskalig: Adektion!).

Nischen.

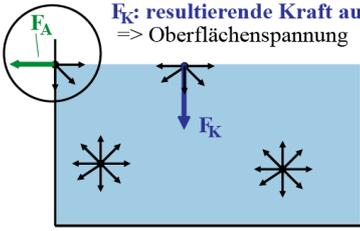


Tropfen.



F_A : Adhäsionskraft

F_K : resultierende Kraft aus Kohäsion
 => Oberflächenspannung



EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05
 Imboden / Herfort / Kipler



EE 3: mole. Viskosität, Transparenz, Lösungsvermögen, Eis / Wasser / Dichte



Molekulare Viskosität.
 Rel. klein.
 Fliesst bei gegebenem Druckgradient gut.
 Transport im Grundwasser.

Lösungsvermögen.
 Extrem klein: PAC (< ng/l).
 Extrem gross: Salze (> kg/l).

Transparenz.
 Sichtbares Licht: ~ klein.
 IR & UV: hoch.
 Photosynthese im tiefen Wasser.

Volumen & Dichte als Funktion der Temperatur.
 "Verrückt".
 $\rho_{\text{fest}} < \rho_{\text{flüssig}}$
 $\rho_{\text{max}} \sim 4^\circ\text{C} > \rho_{\text{m}}$



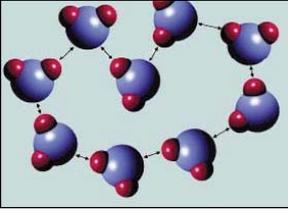
Baikalsee

Baikalsee



Weshalb?

Wasserstoff-Brücken



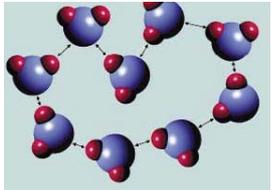
EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05
 Imboden / Herfort / Kipler

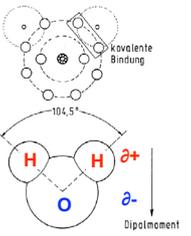


Wasserstoffbrücken & Wasser

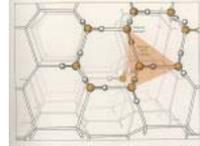




Wasserstoffbrücken
Schwache (intermittierende) Bindung zwischen elektrischen Dipolen



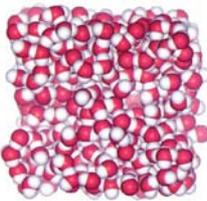
kovalente Bindung
104,5°
Dipolmoment



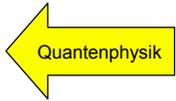
Eis
Fest.
Genau: 4 WB pro H₂O.



Wasser: Permanenter Dipol



Wasser
Dynamisch.
f (T): 1 - 5 WB pro H₂O.
→ $\rho_{\text{fest}} < \rho_{\text{flüssig}}$
→ $\rho_{\text{max}} \sim 4^{\circ}\text{C}$



Quantenphysik

EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipler



Dichte von Wasser



Von welchen Größen hängt die Dichte von Wasser ab?
 $\rho = \rho (T, C \text{ ('Salz')}, p, \dots)$

Änderung der Dichte = totales Differential der Zustandsgrößen

$$\Delta\rho = \frac{\partial\rho}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial\rho}{\partial C} \Delta C + \frac{\partial\rho}{\partial p} \Delta p$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial T} \Delta T + \frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial C} \Delta C + \frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial p} \Delta p$$

$$= -a \cdot \Delta T + b \cdot \Delta C + K \cdot \Delta p$$

$\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial T}$: **Thermischer Ausdehnungskoeffizient**

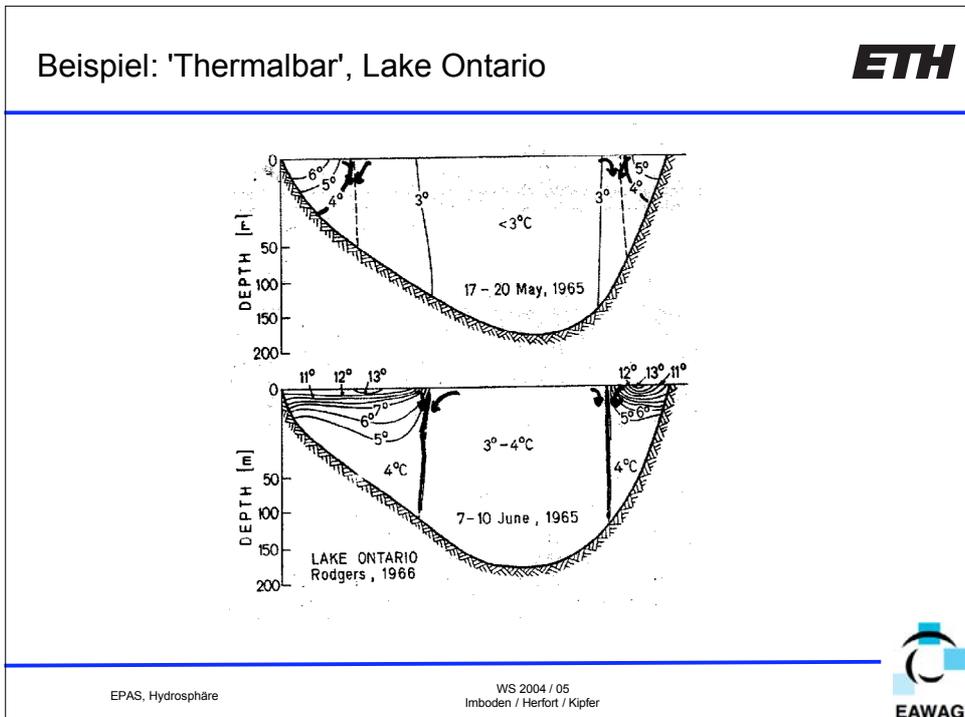
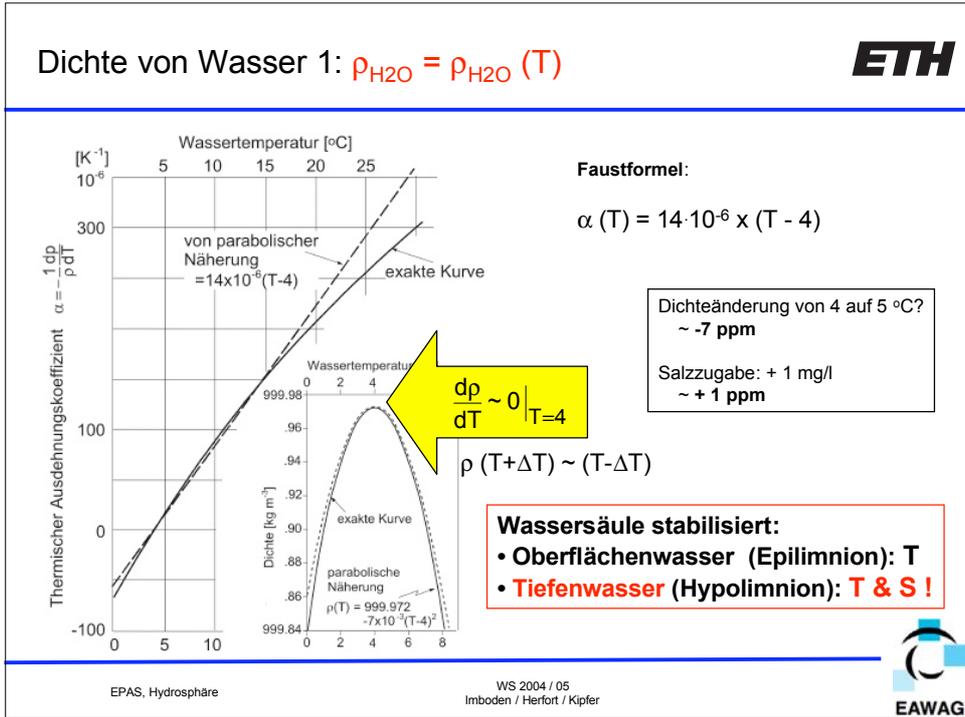
$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial C}$: **Spezifischer Ausdehnungskoeffizient bezüglich der Konzentration C ('Salz')**

$K = \frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial p}$: **Kompressibilität**

EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipler



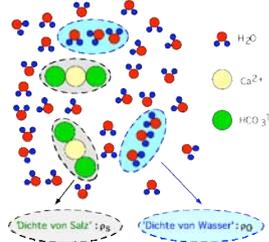


Dichte von Wasser 1: $\rho_{H_2O} = \rho_{H_2O} (C \text{ oder Salz})$



Einfluss des 'Salzes' oder genauer ALLER gelösten Stoffe auf die Dichte?

Dichte von 'verunreinigtem' Wasser



Idee (naiv):
Wie setzen sich die totale Masse, das totale Volumen und damit die Dichte der Lösung zusammen?

Masse der Lösung.

$$m_L = m_0 + m_S = m_0 \left(1 + \frac{m_S}{m_0} \right) = m_0 (1 + C)$$

m_0, m_S : Masse des 'reinen' Wassers, Masse Salz [kg]

$C = m_S/m_0$: Konzentration [kg Salz / kg H₂O]

Volumen der Lösung.

$$V_L = V_0 + V_S = \frac{m_0}{\rho_0} + \frac{m_S}{\rho_S} = \frac{m_0}{\rho_0} \left(1 + C \cdot \frac{\rho_0}{\rho_S} \right)$$

Dichte der Lösung.

$$\begin{aligned} \rho_L &= \frac{m_L}{V_L} = \frac{m_0(1+C)}{\frac{m_0}{\rho_0} \left(1 + C \cdot \frac{\rho_0}{\rho_S} \right)} \stackrel{!!!}{=} \rho_0 (1+C) \left(1 - C \frac{\rho_0}{\rho_S} \right) \\ &= \rho_0 \left[1 + C \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_S} \right) + O(C^2 \& \dots) \right] \\ &= \rho_0 \left[1 + C \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_S} \right) \right] \end{aligned}$$

ρ_0, ρ_S, ρ_L : Dichte des 'reinen' Wassers, Salz, Lösung [kg/m³]

$C = m_S/m_0$: Konzentration [kg Salz / kg H₂O]



Dichte von Wasser 2: $\rho_{H_2O} = \rho_{H_2O} (C \text{ oder Salz})$



'Chemie': Molares Volumen des Salzes.

aus Tabellen: $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$: 31.3 ml/Mol

Ionendichte: ρ_S

$$\rho_S = \frac{1 \text{ Mol}}{31.3 \text{ ml}} = \frac{162 \text{ g}}{31.3 \text{ ml}} = 5170 \text{ kg/m}^3 = 5.17 \text{ g/cm}^3$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \rho_L}{\partial C} = \rho_0 \left[1 - \frac{\rho_0}{\rho_S} \right] = 0.81 \text{ g/cm}^3$$

$C = m_S/m_0$: Konzentration [kg Salz / kg H₂O]

Übergang zu 'handhabbaren' – limnologisch relevanten Einheiten.

Für C in [mg/l] ergibt sich für verdünnte Lösungen:

$$\rightarrow 1 \text{ mg/l Ca}(\text{HCO}_3)_2 \equiv 0.81 \cdot 10^{-6} \text{ g/cm}^3$$

Parametrisierung der Konzentration C durch ihre entsprechende elektrische Leitfähigkeit bei 20°C (k_{20}).

für $\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$: 1mS/cm \equiv 0.87 mg/l \equiv 0.705 \cdot 10⁻⁶ g/cm³ = 0.705 \cdot 10⁻³ kg/m³

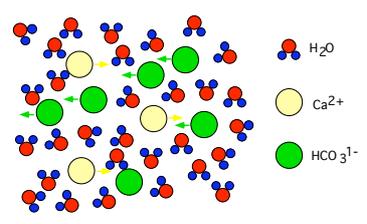
für $\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$: 1mS/cm \equiv 0.87 mg/l \equiv 0.705 \cdot 10⁻⁶ g/cm³ = 0.705 \cdot 10⁻³ kg/m³

$$\frac{\partial \rho}{\partial k_{20}} \approx 0.705 \cdot 10^{-3} \text{ [kg/m}^3 \text{] } [\mu\text{S/cm}]^{-1}$$



Dichte von Wasser 2: $\rho_{H_2O} = \rho_{H_2O} (C \text{ oder Salz})$

Elektrische Leitfähigkeit von 'verunreinigtem Wasser':
→ Ele. Leitfähigkeit kommt nur durch IONEN zustande
→ Schweizer Seen:



\vec{E} : elektrisches Feld

$\kappa = L \times C$
 κ : elektrische Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{m}$]
 C : Konzentration [Mol/l]
 Λ : Äquivalenzleitfähigkeit [mS/m]/[Mol/l]

→ Effekt von C kann + (Salz) oder - (Gase) sein

Äquivalenzleitfähigkeit.
aus Tabellen

$\Lambda(\text{HCO}_3^-; 25^\circ\text{C}) = 44.5 \cdot 10^3 \text{ } [\mu\text{S}/\text{cm}]/[\text{Mol}/\text{l}]$
 $\Lambda(\text{Ca}^{2+}; 25^\circ\text{C}) = 119 \cdot 10^3 \text{ } [\mu\text{S}/\text{cm}]/[\text{Mol}/\text{l}]$
 $1 \text{ mMol}/\text{l} \equiv (119 + 2 \cdot 44) = 208 \text{ } [\mu\text{S}/\text{cm}]$

Jedoch: Referenztemperatur in Limnologie: 20°C !!!
 ⇒ Zusammenhang zwischen $\Lambda(T)$ und $\Lambda(20^\circ\text{C})$
 $\Lambda(20^\circ\text{C}) = \Lambda(T) \cdot [-1.223 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1.148 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 5.417 \cdot T + 1.721]$
 $[T] = [^\circ\text{C}]$

Es ergibt sich bei 20°C:
→ 1 mMol/l \equiv 186 $\mu\text{S}/\text{cm}$ oder
→ 1 $\mu\text{S}/\text{cm} \equiv$ 0.87 mg/l $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$

EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipler



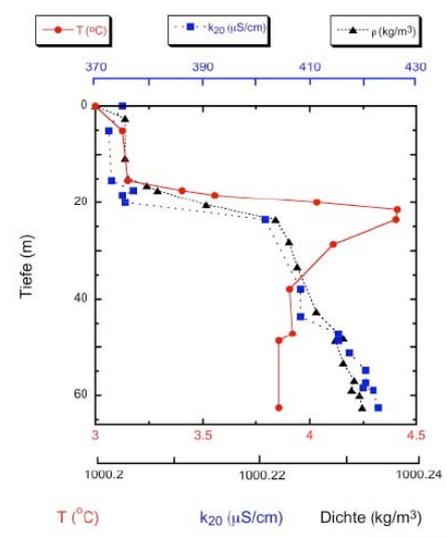
Dichte von Wasser 2: $\rho_{H_2O} = \rho_{H_2O} (C \text{ oder Salz})$

Baldegger See 3.1.1977

Totes Meer



Einziges Gewässer, wo von der $C(\text{H}_2\text{O})$ gesprochen werden kann.



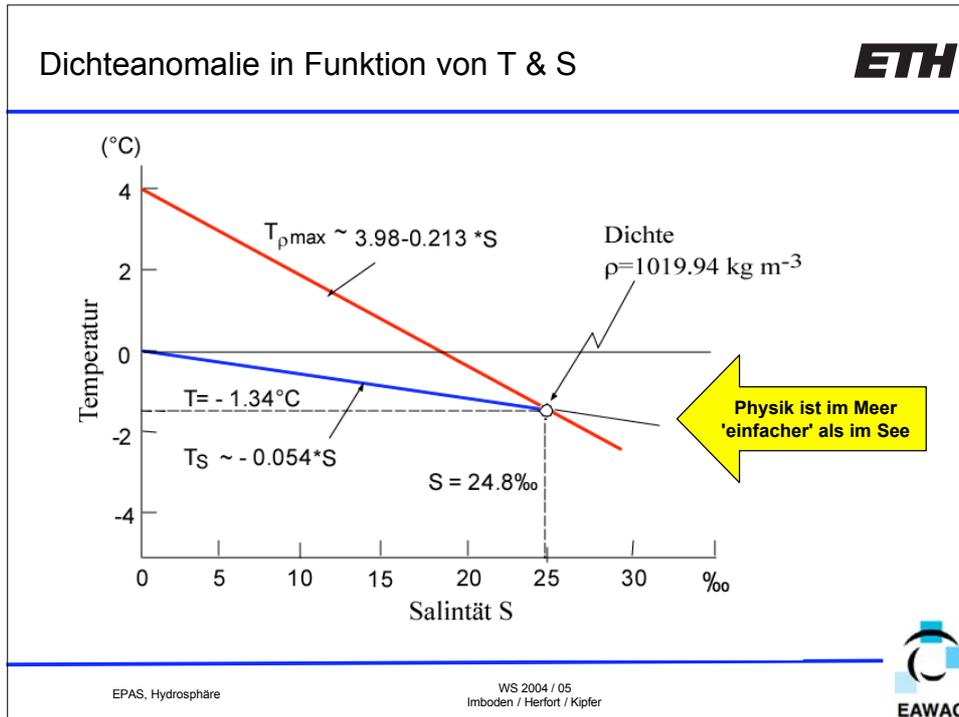
● T (°C)
 ■ k₂₀ (μS/cm)
 ▲ ρ (kg/m³)



EPAS, Hydrosphäre

WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipler





Dichte von Wasser 3: $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_{\text{H}_2\text{O}}(p)$

ETH

Intuition?

→ Falsch: für die vertikale Stabilität spielt die insitu Zunahme der Dichte als Funktion der Kompressibilität (praktisch) keine Rolle

aber:

Druckzunahme ändert die Temperatur der maximalen Dichte !!!

$$T_{\rho \max}(p) = 3.98[^\circ\text{C}] - 1.99 \cdot 10^{-2} \cdot p[\text{bar}]$$

Adiabatische Erwärmung: $T_{\text{insitu}} \leftrightarrow \Theta$

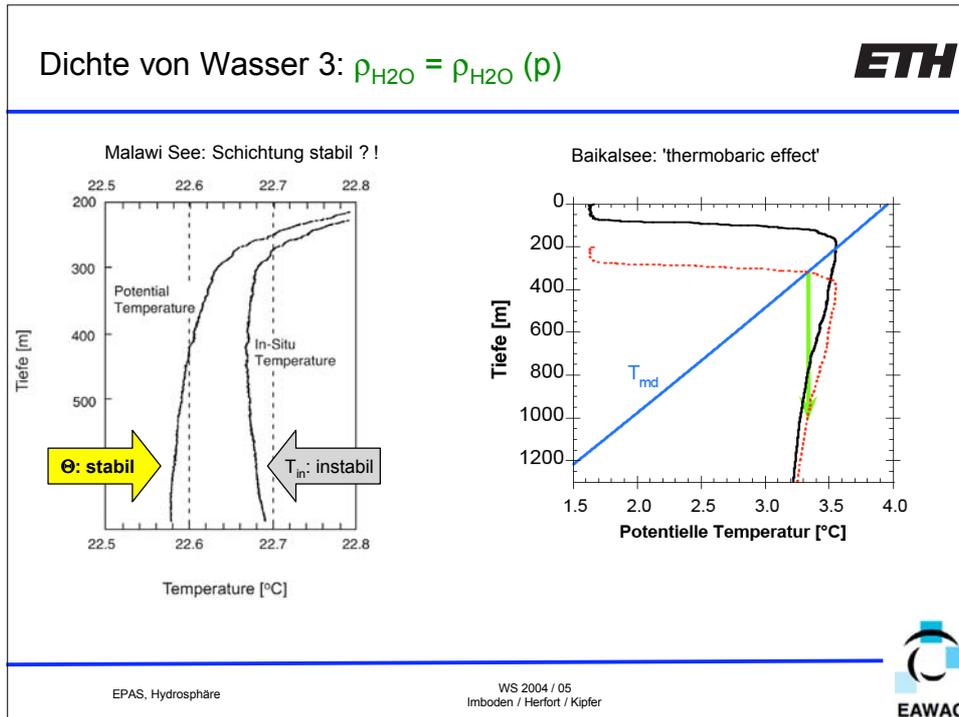
$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{\text{ad}} = -\frac{g \cdot \alpha}{c_p} (T + 27316)$$

I

$p_{II} > p_I$

$T_{II} > T_I$

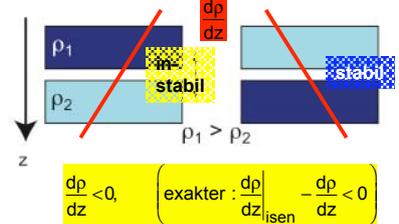
EPAS, Hydrosphäre WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipler EAWAG



Zusammenfassung 'Dichte': Stabilität

Wann ist eine Wassersäule stabil geschichtet?

1. Immer! Warum?
2. Wenn Dichte mit Tiefe zunimmt.



$\frac{dp}{dz} < 0$, (exakter: $\frac{dp}{dz}|_{isen} - \frac{dp}{dz} < 0$)

In stabiler Wassersäule erfährt Wasserpaket bei Auslenkung ζ eine rücktreibende Kraft K:

$$K = -g \cdot m = -g \cdot V \cdot \left(\frac{dp}{dz}|_{isen} - \frac{dp}{dz} \right) \cdot \zeta$$

g: Erdbeschleunigung
V: Volumen, m: Masse, ρ : Dichte

K verursacht eine Beschleunigung:

$$\frac{d^2\zeta}{dt^2} = \frac{K}{m} = -\frac{g}{\rho} \left(\frac{dp}{dz}|_{isen} - \frac{dp}{dz} \right) \cdot \zeta = -N^2 \cdot \zeta$$

Harmonischer Oszillator: $[N^2] = t^{-1} = [\text{Frequenz}]$

→ Stabilitäts- oder Brunt-Väisälä Frequenz ←

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \left(\frac{dp}{dz}|_{isen} - \frac{dp}{dz} \right) = -g \cdot \left[\alpha \left(\frac{dT}{dz} + \Gamma \right) - \beta \frac{dS}{dz} \right]$$

Kann die *laps rate* Γ (oft der Fall, warum?) vernachlässigt werden:

$$N^2 = \frac{g}{\rho} \cdot \frac{dp}{dz} = -g \cdot \left[\alpha \left(\frac{dT}{dz} \right) - \beta \frac{dS}{dz} \right]$$

Stabilität einer Wassersäule:

$N^2 = \begin{cases} > 0 & \text{stabil} \\ = 0 & \text{labil} \\ < 0 & \text{instabil} \end{cases}$

EPAS, Hydrosphäre WS 2004 / 05
Imboden / Herfort / Kipler

Aufgabe: Es war einmal ein Hurrikan...



Tropische Wirbelstürme (Hurrikane) beziehen ihre gewaltigen Energien aus der Kondensation von Wasserdampf in der Atmosphäre. Um die Stürme am Leben zu halten, muss somit ausserhalb des Zentrums des Sturmes ständig Wasser verdampfen. So erhält der Sturm ständig neue Nahrung. In einem Zeitungsartikel über Hurrikane wurde kürzlich behauptet, während der Lebensdauer eines solchen Sturmes würden insgesamt **mehrere Hundert Milliarden Kilowattstunden** an Energie umgesetzt.

- (a) Als kritische ZeitungsleserIn möchten Sie überprüfen, ob diese Zahl von der Grössenordnung her stimmen könnte. Sie nehmen daher eine totale Energiemenge von **600 Milliarden kWh** und eine totale Lebensdauer des Sturmes von 10 Tagen an. Wie gross wäre damit die durchschnittliche umgesetzte Leistung?
- (b) Wieviel Wasser müsste pro Tag kondensieren, um diese Energie freizusetzen?
- (c) Wie vergleicht sich das mit Schweizerischen Kernkraftwerken?

