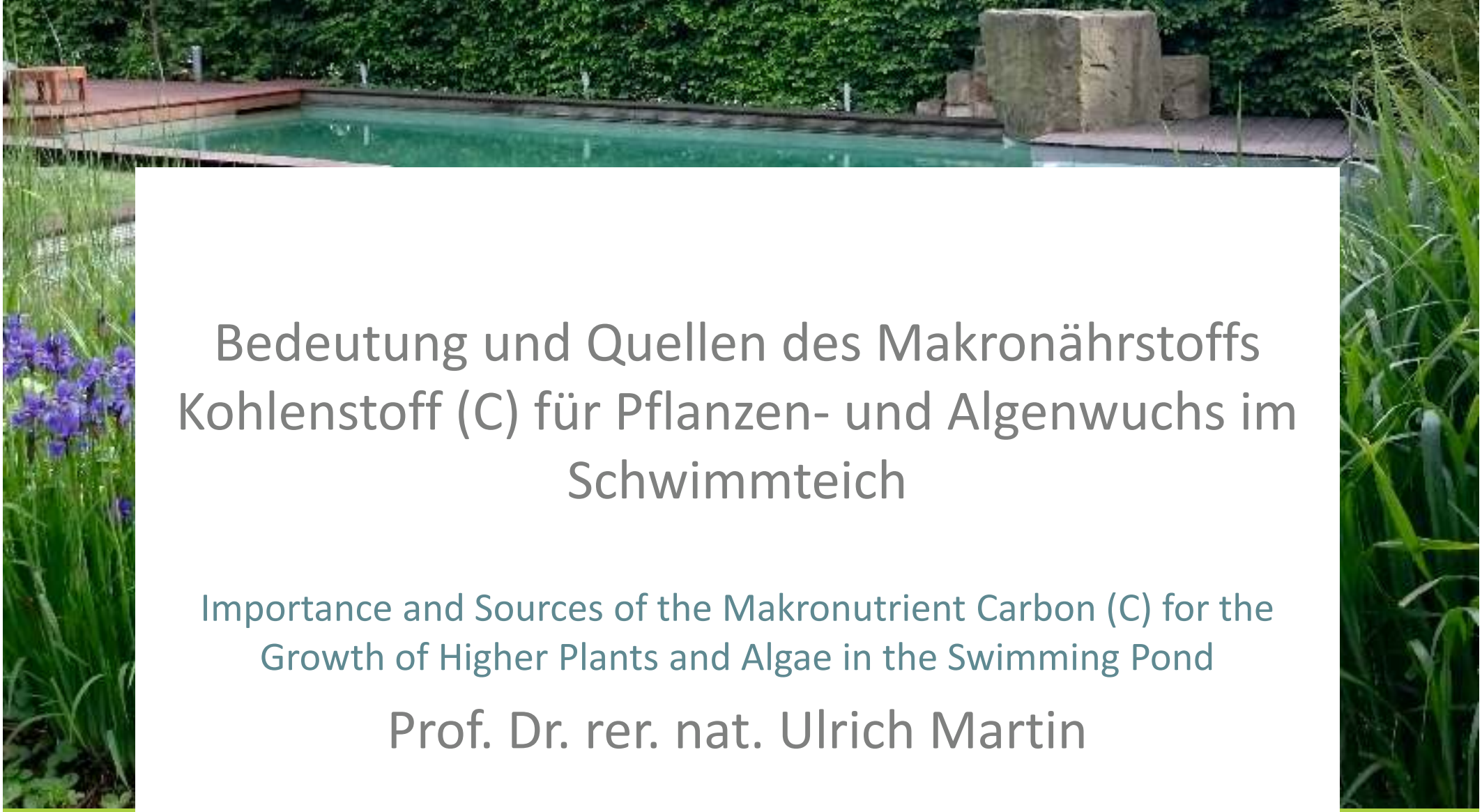


Bedeutung und Quellen des Makronährstoffs Kohlenstoff (C) für Pflanzen- und Algenwuchs im Schwimmteich

Importance and Sources of the Makronutrient Carbon (C) for the Growth of Higher Plants and Algae in the Swimming Pond

Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Martin

Warum wachsen Unterwasserpflanzen viel schlechter als die emersen Pflanzen?

Why submerged plants are not growing similar to the emerse plants?

Makronutrients / Makronährstoffe

- **Carbon**
- Nitrogen
- Potassium
- Calcium
- Magnesium
- Phosphorus
- Sulfur

- **Kohlenstoff**
- Stickstoff
- Kalium
- Calcium
- Magnesium
- Phosphor
- Schwefel

Ratio of chemical elements in dry mass of a leaf compared to Mo (= 1)
Verhältnis chemischer Elemente in einem Pflanzenblatt im Verhältnis zu Molybdän (= 1).

Molybdän	Mo	1
Kupfer	Cu	100
Zink	Zn	300
Mangan	Mn	1000
Eisen	Fe	2000
Bor	B	2000
Chlor	Cl	3000
Schwefel	S	30000
Phosphor	P	60000
Magnesium	Mg	80000
Kalzium	Ca	125000
Kalium	K	250000
Stickstoff	N	1000000
Sauerstoff	O	30000000
Kohlenstoff	C	35000000
Wasserstoff	H	60000000

C:N:P in leaves of higher plants
C:N:P in Blättern höherer Pflanzen:
Average (Durchschnitt): **~583C :17N : 1P**

C:N content in leaves of higher plants:
C:N Gehalt von Blättern höherer Pflanzen:
Young gras (junges Gras): 10 - 15 C/N
Maize (Mais): 55 C/N
Grain (Getreide) 60 - 100 C/N
Average (Durchschnitt): ~C/N 35

→ Beside Hydrogen and Oxygen (both surplus in water), **Carbon is the most frequent and essential Element** in plant biomass !

→ **Kohlenstoff** ist neben Wasserstoff und Sauerstoff (im Überschuss als Wasser vorhanden) **das mit Abstand häufigste und absolut notwendige Element** in der Pflanzenbiomasse !

In Schwimmteichen und Biopools ist Kohlenstoff ein, wenn nicht der entscheidende limitierenden Nährstoff für das Wachstum und die Funktion von Unterwasserpflanzen und Mikroorganismen in Biofiltern, warum?

In swimming ponds and biopools carbon is one, if not the limiting nutrient for growth and function of submerse plants and microorganisms in biofilters, why?

Uptake of CO_2 by terrestric plants and (emerse) aquatic plants

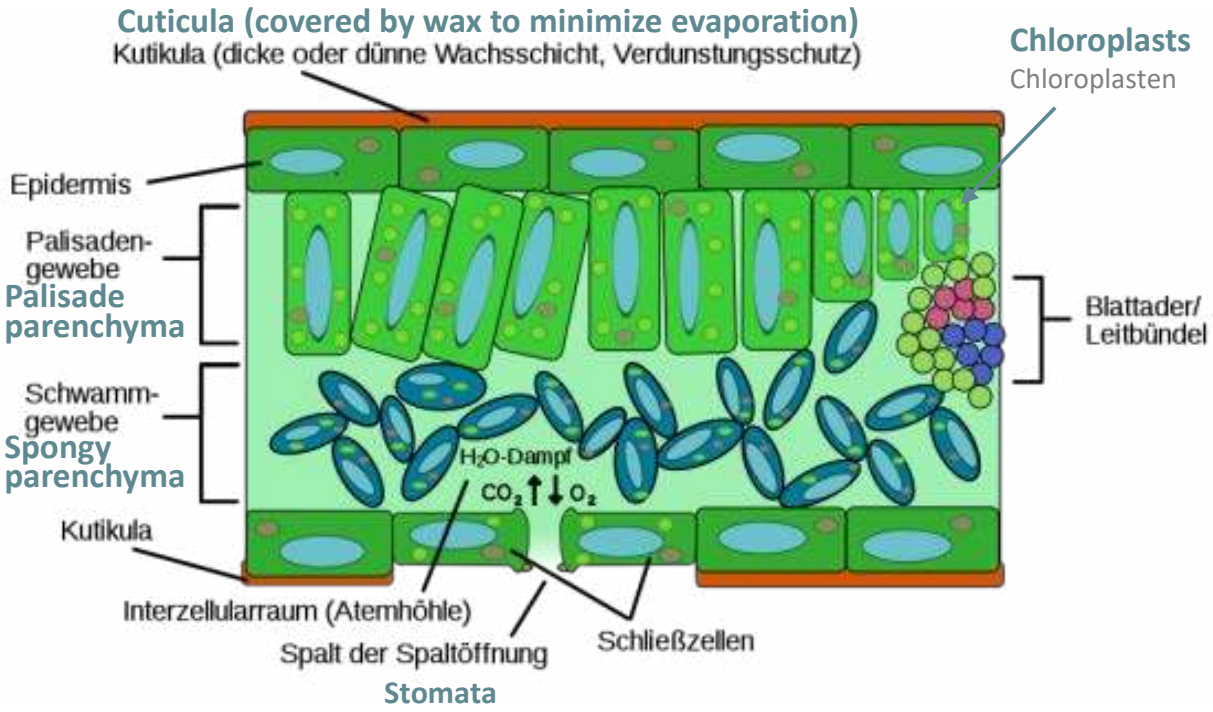
CO_2-Aufnahme bei Landpflanzen und (emersen) Wasserpflanzen

The CO_2 content of air at normal conditions is very low with ca. 0,031%.

Der CO_2-Gehalt in der Luft bei Normalbedingungen liegt bei ca. 0,031%, ist also sehr niedrig.

Since the diffusion velocity is very high in the air, terrestric plants can be provided via their stomata with sufficient CO_2 without problems.

Da die Diffusionsgeschwindigkeit in der Luft jedoch sehr hoch ist, können Landpflanzen über Spaltöffnungen der Blätter jedoch trotzdem problemlos mit ausreichend CO_2 versorgt werden.



For terrestric plants, Carbon is usually not the limiting factor!

(despite conditions which require closing of the stomata)

Bei Landpflanzen ist Kohlenstoff in der Regeln nicht der limitierende Faktor!

(abgesehen von Situationen in denen Spaltöffnungen geschlossen werden müssen)

Concentration of Carbon Dioxide in Water

Konzentration von Kohlendioxid im Wasser

Table. Concentration of atmospheric gases in pure water at standard conditions and an atmospheric CO_2 yield of **0,031%** [mg/l]

Tabelle Konzentration atmosphärischer Gase in reinem Wasser unter Normalbedingungen bei einem CO_2-Gehalt der Atmosphäre von **0,031%** [mg/l]

	Atmosphärischer Partialdruck %	0°C	10°C	20°C	30°C
O_2	20,99	14,5	11,1	8,9	7,2
N_2	78,0	22,4	22,4	14,2	11,9
CO_2	0,031	**1,005**	0,70	**0,51**	0,38

Despite very good solubility, water in swimmingponds contains relatively low levels of CO_2, because of the very low partial pressure in the atmosphere (especially at high temperatures during summertime)!

Trotz sehr guter Löslichkeit enthält das Wasser im Schwimmteich wegen des niedrigen Partialdruckes in der Atmosphäre wenig CO_2 (Insbesondere bei sommerlichen Wassertemperaturen) !

Uptake of CO_2 by submerged aquatic plants

CO_2-Aufnahme bei submersen Wasserpflanzen

There is an unstirred water layer on the leaves of submerged plants.

Auf den Blättern von Unterwasserpflanzen existiert eine unbewegte Flüssigkeitsschicht.

In this layer, dissolved gases diffuse ~10.000x slower than in the air.

In Wasser gelöste Gase diffundieren hier ca. 10.000-mal langsamer als in der Luft.

For this physical reason the **uptake of CO_2** (and Oxygen) **from water is strongly decelerated in particular in standing water bodies.**

Aus diesem physikalischen Grund **ist die Aufnahme von CO_2** (und auch von Sauerstoff) **aus dem Wasser** insbesondere in stehenden Gewässern **stark gebremst**.

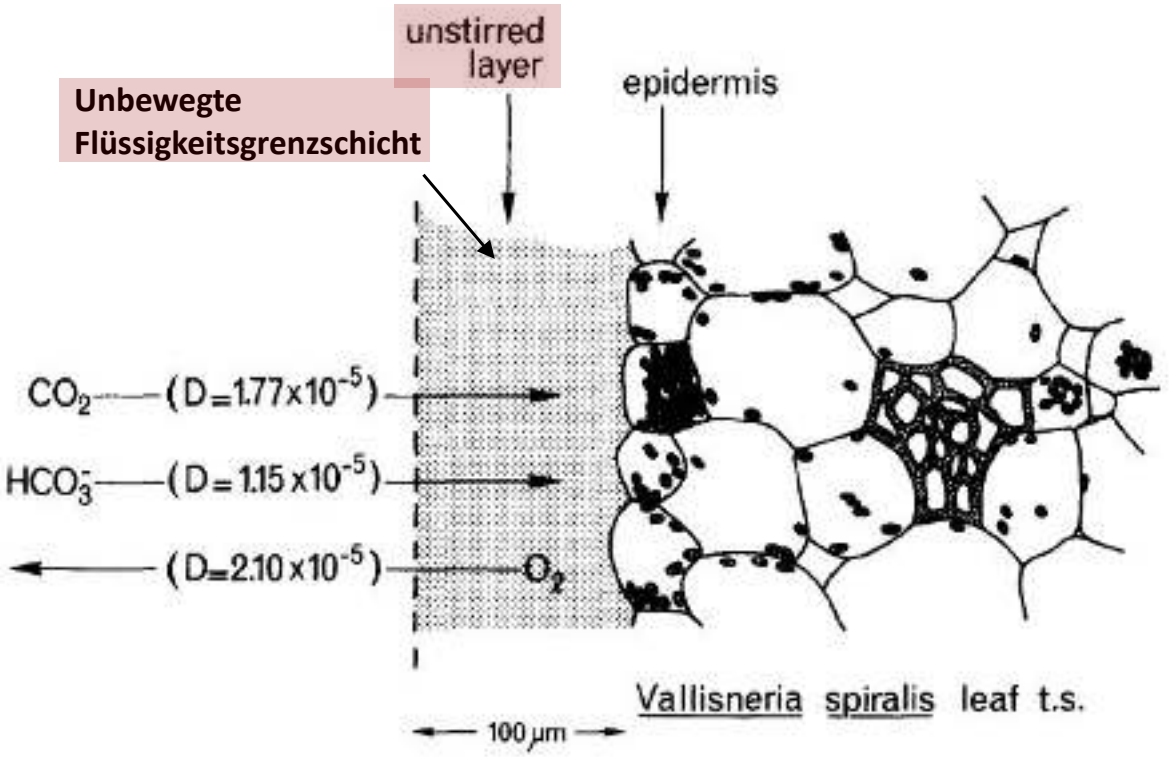


Fig. 1. Dimensions of the unstirred layer. A transverse section of a part of a *Vallisneria spiralis* L. leaf is shown together with an unstirred layer of 100 µm and the diffusion constants ($cm^2\ s^{-1}$) of the fluxes involved in photosynthesis.

Uptake of CO_2 by algae, emerse and submerged aquatic plants

CO_2-Aufnahme bei Algen, emersen und submersen Wasserpflanze

Carbon supply is usually not growth inhibiting for algae for two reasons:

Die Kohlenstoffversorgung ist normalerweise aus zwei Gründen für Algen nicht wachstumslimitierend

1) **Algae** have developed in an aquatic habitat and possess efficient active mechanisms for uptake to CO_2 and bicarbonate.

Algen haben sich im aquatischen Lebensraum entwickelt und besitzen effiziente aktive Aufnahmemechanismen für CO_2 bzw. Hydrogenkarbonat.

2) Especially for **single cell and thin filamentous algae there is almost no diffusion barrier**.

Insbesondere **für einzellige Algen und dünne Fadenalgen besteht kaum eine Diffusionsbarriere**.

Higher aquatic (emerse and submerged) plants have developed back from terrestric plants and do not possess active transport mechanisms.

Höhere (emerse und submerse) Wasserpflanzen haben sich aus Landpflanzen zurückentwickelt und besitzen keine aktiven Transportmechanismen.

Uptake of CO_2 by algae, emerse and submerged aquatic plants

CO_2-Aufnahme bei Algen, emersen und submersen Wasserpflanze

Marsh plants and plants with floating or emerse leaves have access to CO_2 supply via the air, **in this case supply with Carbon is no growth limitation!**

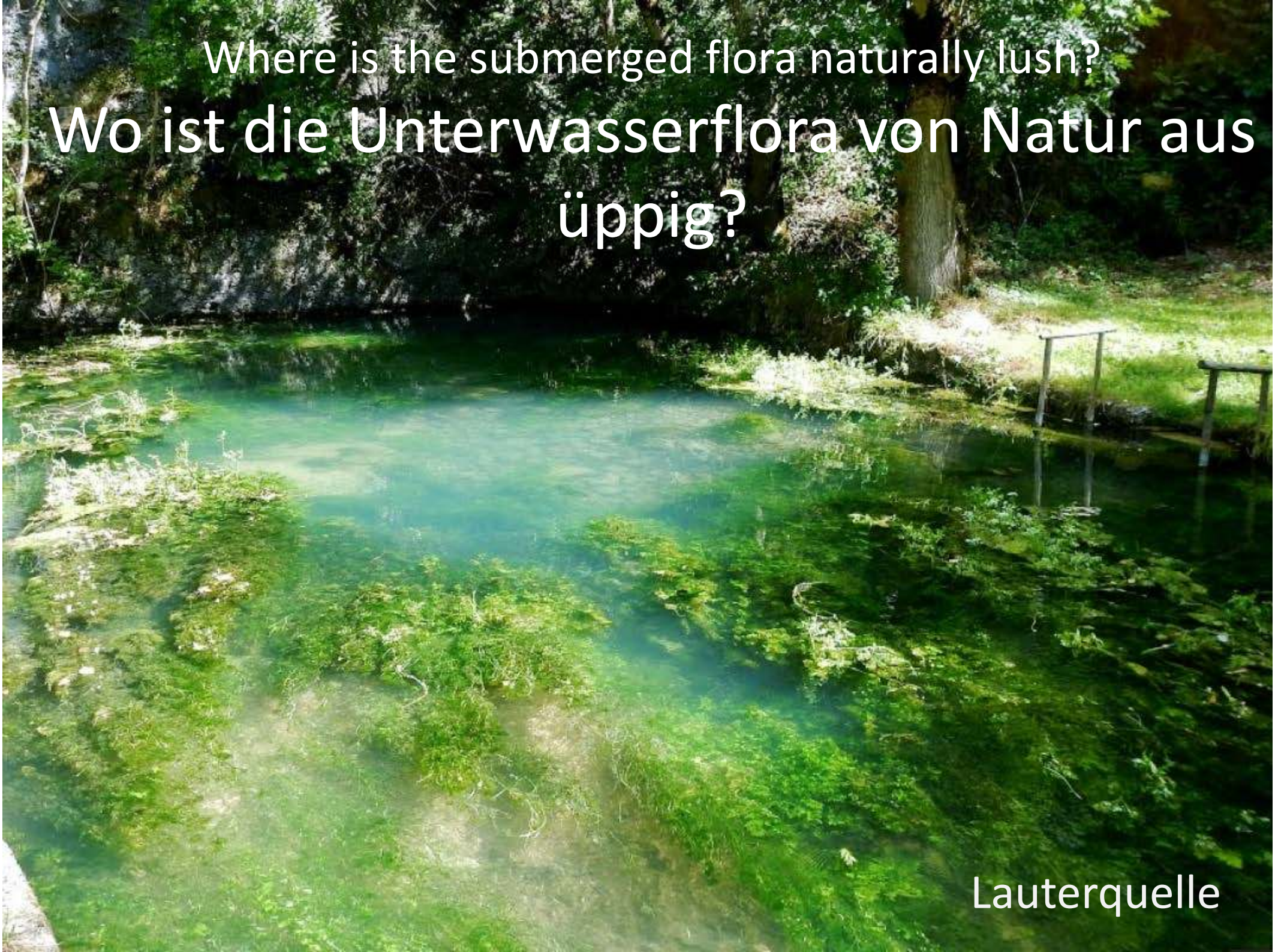
Sumpfpflanzen und Pflanzen mit Schwimmblättern bzw. Überwasserblättern können Ihren Kohlenstoffbedarf genauso wie Landpflanzen aus der Luft decken, **hier ist Kohlenstoff in der Regel nicht limitierend!**

Such plants typically have Carbon stores for the beginning of the growth period allowing to push first leaves above water surface.
Solche Pflanzen haben meist für den Vegetationsbeginn Kohlenstoffreserven, die es erlauben erste Blätter über die Wasseroberfläche zu schieben.

In contrast, **submerged plants** suffer from a growth limiting **lack in CO_2**.

Submerse Wasserpflanzen haben im Gegensatz dazu wegen der geringen Diffusionsgeschwindigkeit in der Regel mit einem **Mangel an CO_2** zu kämpfen, der limitierend auf das Wachstum wirkt.

Terrestric plants are not adapted to these conditions at all and are not able to survive for a longer time under submerged conditions.
Landpflanzen sind an diese Bedingungen nicht adaptiert und können unter Wasser nicht auf Dauer existieren.


Where is the submerged flora naturally lush?
Wo ist die Unterwasserflora von Natur aus üppig?
Lauterquelle

CO_2-Versorgung von submersen Wasserpflanzen

Blautopf in Blaubeuren

Growth of submerged macrophytes is most lush in environments with high CO_2 concentration, e.g. in groundwater springs.

Die Unterwasserpflanzen-Flora ist in der Natur dort besonders üppig, wo die Kohlendioxid-Konzentration hoch ist, etwa an Grundwasseraustritten in Seen oder in Quelltöpfen.

CO_2 sources in water bodies with lush growth of submerged plants

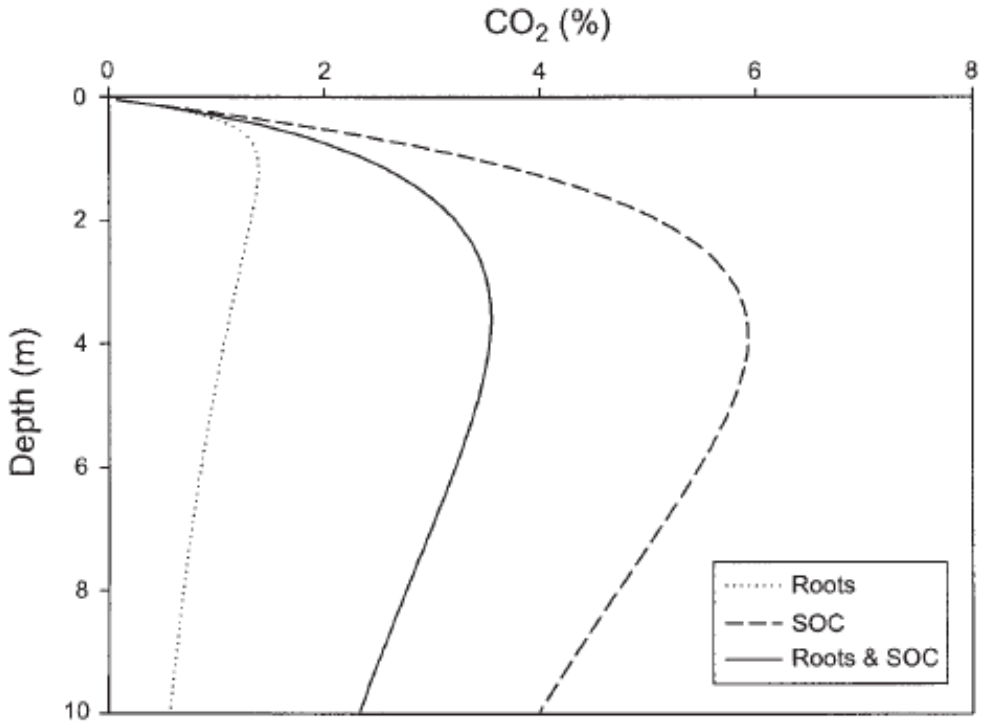
CO_2-Quellen in Gewässern mit üppigem Unterwasserpflanzenwachstum

1) Inflow of **CO_2-rich groundwater** leads to substantially higher CO_2 concentrations than in the air.

1) Quelle: Zufluß **CO_2-reichen Grundwassers** führt zu deutlich höheren CO_2-Konzentrationen als in der Luft.

Deeper Soil layers contain substantially higher CO_2 concentrations than air.

Tiefere Bodenschichten und Grundwasser enthalten deutlich höhere CO_2-Konzentrationen als die Luft.



Oh, ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE, 2005

2) In many natural water bodies **voluminous organic sediments** release sufficient CO_2 for carbon supply of macrophytes.

2) In vielen natürlichen Gewässern setzen vorhandene **massive organische Sediment-schichten** ausreichend CO_2 für die Kohlenstoffversorgung von Unterwasserpflanzen frei.

In the swimmingpond there is no ground water inflow nor thick layers of organic sediments (the latter in contrast to Koi ponds or other garden ponds) !

Im Schwimmteich fehlen sowohl Grundwasserzufluss als auch dicke organische Sedimentschichten (letzteres im Gegensatz zu Koiteichen oder Gartenteichen) !

Strategien submersen Wasserpflanzen zur Kohlenstoffversorgung unter Mangelbedingungen

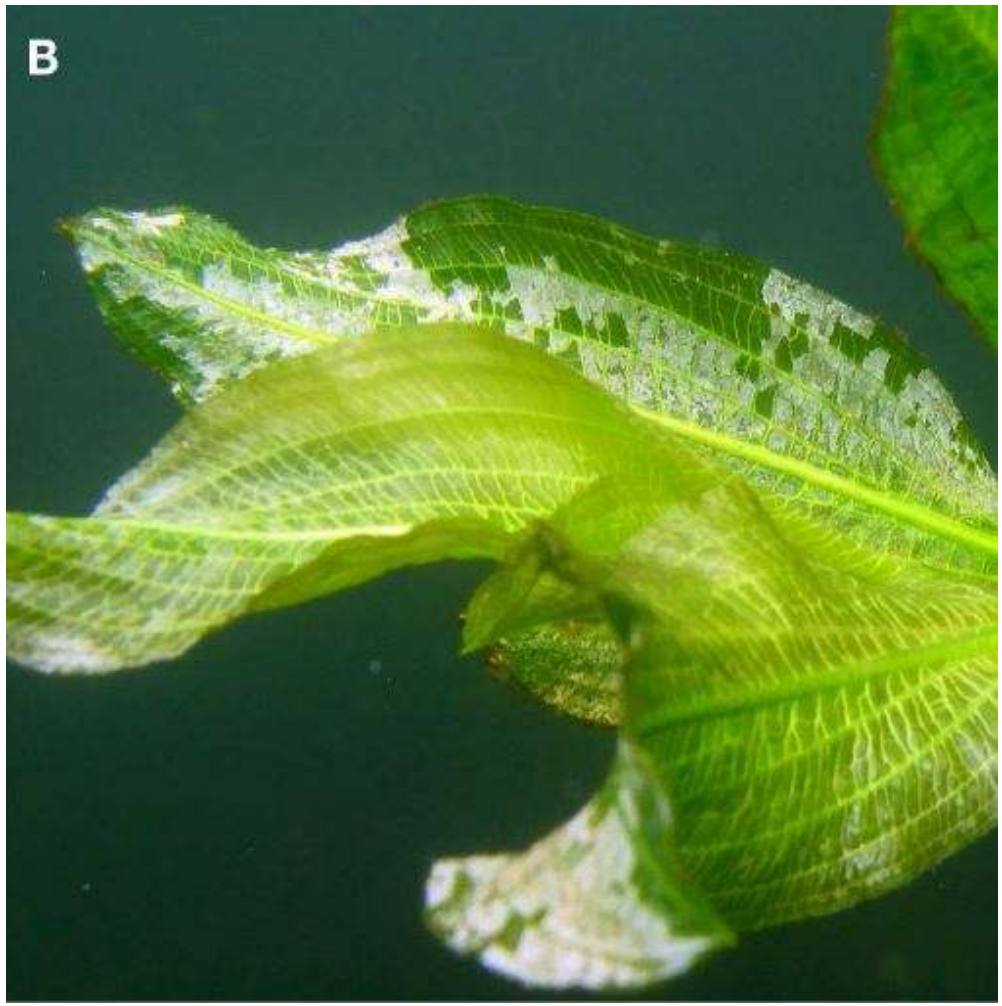
Utilization of hydrogencarbonate as Carbon source:

Nutzung von Hydrogenkarbonat als Kohlenstoffquelle:

Biogenic decalcification:

Biogene Entkalkung:

$$Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaCO_3\downarrow + H_2O + CO_2$$



Deposition of Calcium carbonate on the top side of leaves (Potamogeton)

Ablagerung von Kalziumkarbonat auf der Blattoberseite (Potamogeton)

Strategien submersen Wasserpflanzen zur Kohlenstoffversorgung unter Mangelbedingungen

Strategies of submerged aquatic plants for carbon assimilation at C-limitation

Plants that primarily uptake HCO_3^- : Pflanzen, die überwiegend HCO_3^- aufnehmen:	Green algae (Scenedesmus) Grünalge (Scenedesmus)
Plants that are able to take up HCO_3^- : Pflanzen, die in der Lage sind, HCO_3^- aufnehmen:	Elodea Egeria Hydrilla Myriophyllum Potamogeton spec.
Plants that are able to utilize CO2, only: Pflanzen, die nur CO_2 aufnehmen können:	Sparganium spec. Fontinalis (Fountain moss) (Quellmoos)

Strategien submersen Wasserpflanzen zur Kohlenstoffversorgung unter Mangelbedingungen

Strategies of submerged aquatic plants for carbon assimilation at C-limitation

Formation of floating leaves with stomata at the top side

Ausbildung von Schwimmblättern mit Spaltöffnungen auf der Blattoberseite

Nymphea

Nuphar

Hydrocharis

CO_2-Aufnahme bei submersen Wasserpflanzen

Lack in CO_2 is the most frequent reason for sparce growths of submerged plants in swimming ponds!

CO_2 -Mangel ist die häufigste Ursache für schlechten Unterwasserpflanzenwuchs in Schwimmteichen!

How to address this problem?

Wie kann dieses Problem gelöst werden?

Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

Carbonic Acid
Kohlensäure

Carbonate
Karbonat

Carbonate-Carbonhydrogen-Equilibrium

Carbondioxide
Kohlendioxid

Hydrogencarbonate
Hydrogenkarbonat

$$CO_2 + H_2O \rightleftarrows H_2CO_3 \rightleftarrows H^+ + HCO_3^- \rightleftarrows 2H^+ + CO_3^{2-}$$

192 Grundlagen des „Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts"

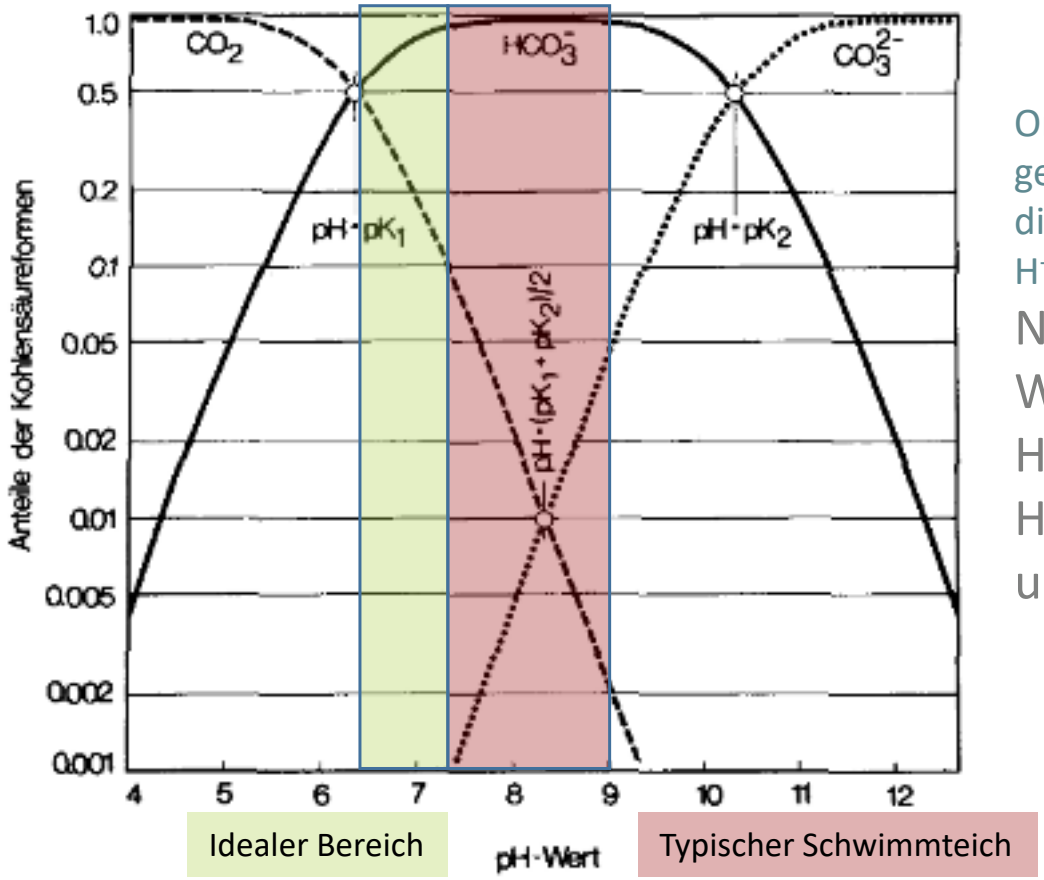


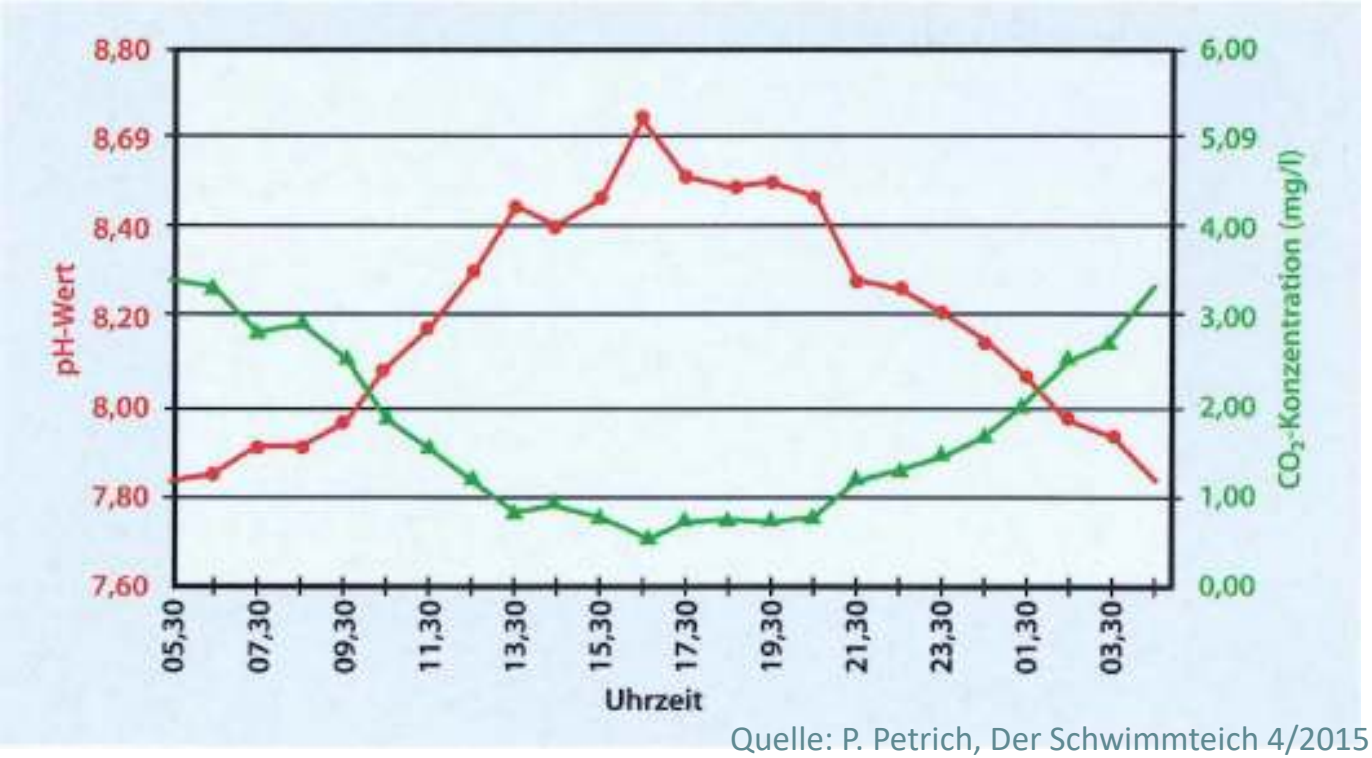
Bild 3: Anteile der „Kohlensäureformen" CO_2, HCO_3^- und CO_3^{2-} an der Konzentrationssumme $c(CO_2) + c(HCO_3^-) + c(CO_3^{2-})$
(Berechnet für Ionenstärke I = 0 mmol/l und 25°C)

Only ~ 0.7% of the dissolved CO_2 reacts with water generating Carbonic Acid H_2CO_3, which at a 1st step dissociates into H^+ und HCO_3^-Ions, and at a 2nd step into H^+ und CO_3^{2-} -Ions.

Nur etwa 0,7 % des gelösten CO_2 reagiert mit Wasser unter Bildung von Kohlensäure, H_2CO_3, die in der ersten Stufe in H^+ und HCO_3^--Ionen und in der zweiten Stufe in H^+ und CO_3^{2-} -Ionen dissoziiert.

Change of pH value during daytime

Veränderung des pH-Wertes in Abhängigkeit von der CO_2-Konz. im Tagesverlauf



Quelle: P. Petrich, Der Schwimmteich 4/2015

The CO_2 content in a typical swimming pond is in the range of 0.5-4 mg/ml.

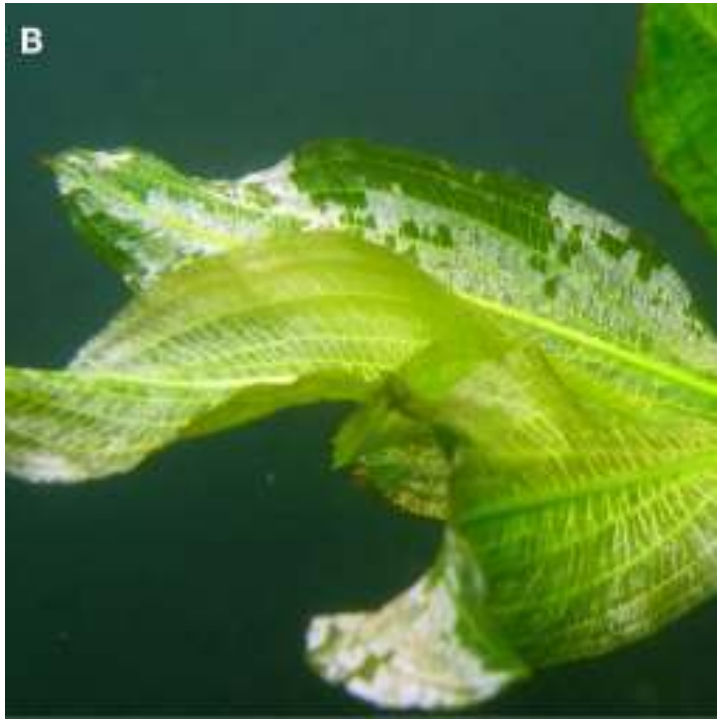
Der CO_2-Gehalt in einem typischen Schwimmteich liegt zwischen 0,5-4 mg/l

The **optimal CO_2 concentration** for lush submerged plant growth is **15-25 mg/l**. The **lower survival limit** is for most submerged plants (depending on the temperature) in the range of **5-10 mg/ml**!

Die **optimale CO_2-Konz.** für üppiges Wachstum liegt bei **15-30 mg/l**. Das **untere zum Überleben notwendige Limit** liegt für die meisten Unterwasserpflanzenarten bei ca. **5-10 mg/l** !

Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

Carbonate-Carbonhydrogen-Equilibrium



Utilization of hydrogencarbonate as Carbon source:

Nutzung von Hydrogenkarbonat als Kohlenstoffquelle:

Biogenic decalcification:

Biogene Entkalkung:

$Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaCO_3\downarrow + H_2O + CO_2$

Increasing Carbonate hardness ($\uparrow HCO_3^-$): a good strategy to achieve lush submerged plant growth?

Erhöhung der Karbonathärte ($\uparrow HCO_3^-$): eine gute Strategie für üppiges Unterwasserpflanzenwachstum?

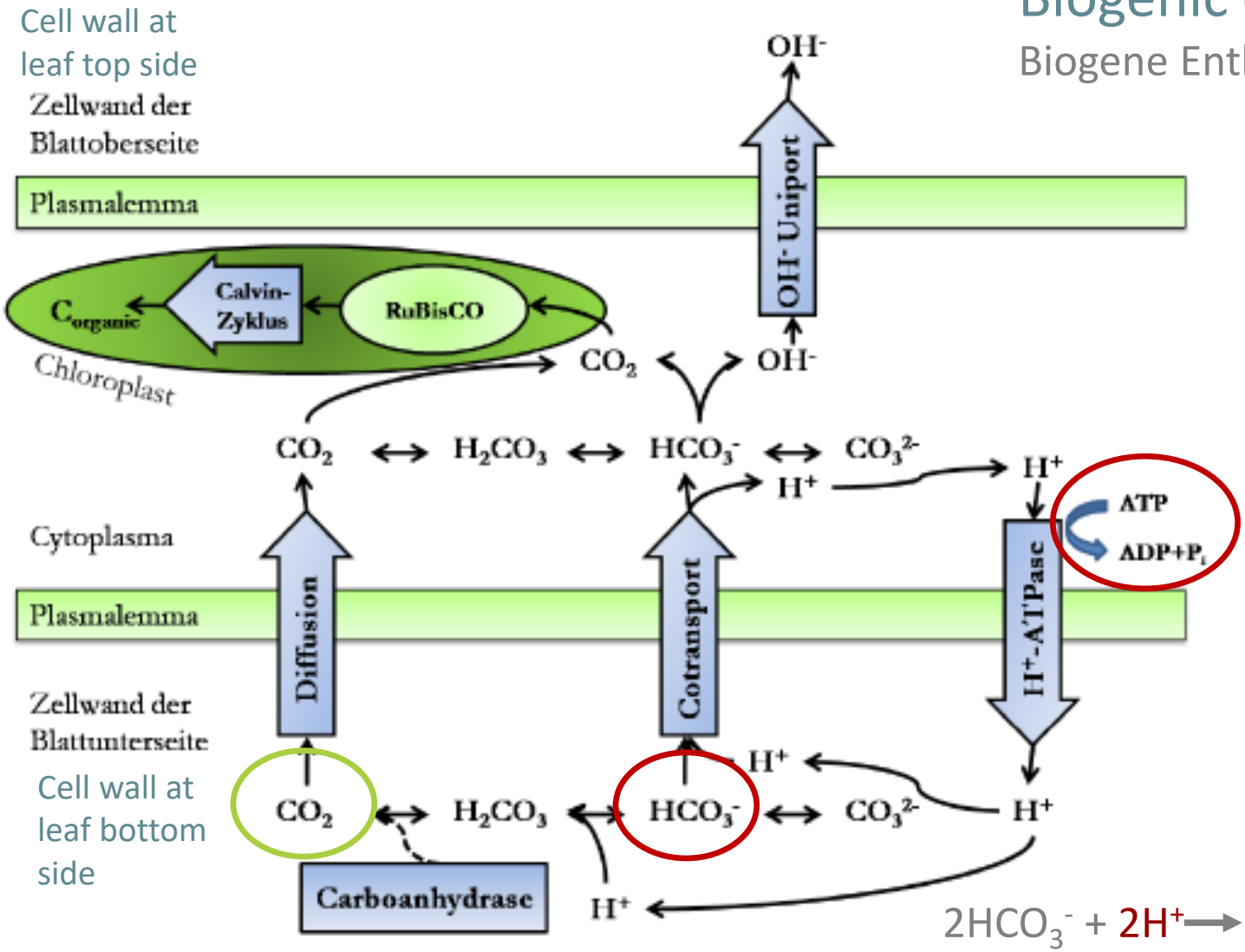
Not really……!

Nicht wirklich……!

Nutzung von Hydrogenkarbonat als Kohlenstoffquelle

Biogenic decalcification:

Biogene Entkalkung:



Uptake of HCO_3^- only via 5x higher energy consumption !

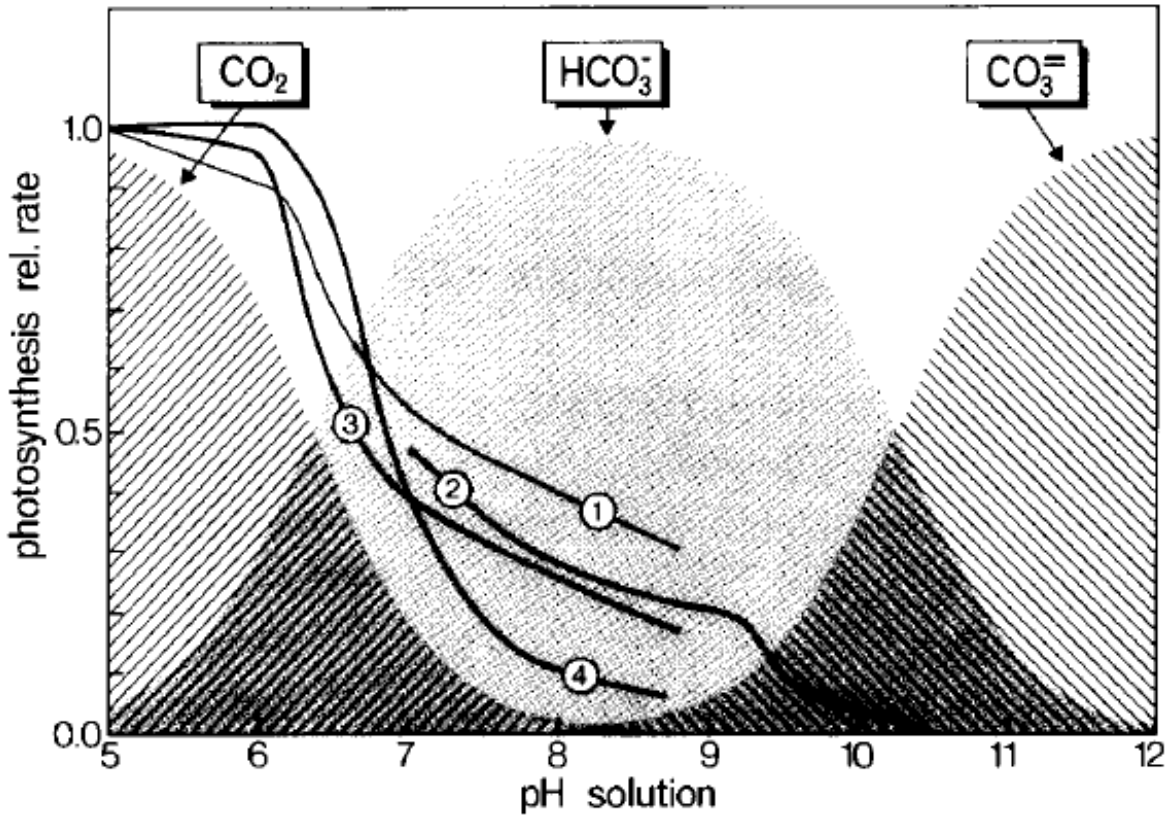
Aufnahme von HCO_3^- nur unter 5x erhöhtem Energieverbrauch !

$$2HCO_3^- + 2H^+ \rightarrow 2H_2CO_3 \rightarrow 2H_2O + 2CO_2$$

Abbildung 10: Schematische Darstellung der Aufnahme anorganischen Kohlenstoffs bei Wasserpflanzen mit polaren Blättern nach FALKOWSKI & RAVEN 2007; LUCAS 1982 und LUCAS 1983.

Utilization of hydrogencarbonate as Carbon source

Nutzung von Hydrogenkarbonat als Kohlenstoffquelle



The use of HCO_3^- always results in substantially lower photosynthetic rates than CO_2 utilization at the same concentrations !

Fig. 2. Photosynthetic rates at different pH values and constant [ΣCO_2] for several *Potamogeton* species. The shaded areas show the relative contribution of the different carbon species: (1) *P. crispus* L.; (2) *P. lucens* L.; (3) *P. oxyphyllus* Miq.; (4) *P. fryeri* A. Benn. Data for (1), (3) and (4) are from Kadono (1980), [ΣCO_2] = 2 mM. Data for (2) are from Lucas et al. (1978), [ΣCO_2] = 2.5 mM.

Die Nutzung von HCO_3^- als Kohlenstoffquelle resultiert immer in deutlich niedrigerer Photosynthese/Wachstumsrate als die Nutzung von CO_2 in gleicher Konzentration !

Prins, Aquatic Botany 1989

Carbonate-Carbonhydrogen-Equilibrium

Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

The CO_2 content (>10 mg/l for growth of submerged plants) can be determined with sufficient accuracy via pH value and Carbonate hardness

Über den pH-Wert und Karbonathärte läßt sich der CO_2 Gehalt recht genau bestimmen Pflanzenwachstum: mindestens 10 mg / l

Blue indicates low, Green ideal and Red is high.

	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH
kH	6	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9	7	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6
0.5	15	11.9	9.5	7.5	6.0	4.7	3.8	3.0	2.4	1.9	1.5	1.2	0.9	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0
1	30	23.8	18.9	15.0	11.9	9.5	7.5	6.0	4.8	3.8	3.0	2.4	1.9	1.5	1.2	0.9	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
1.5	45	35.7	28.4	22.6	17.9	14.2	11.3	9.0	7.1	5.7	4.5	3.6	2.8	2.3	1.8	1.4	1.1	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1
2	60	47.7	37.9	30.1	23.9	19.0	15.1	12.0	9.5	7.6	6.0	4.8	3.8	3.0	2.4	1.9	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2
2.5	75	59.6	47.3	37.6	29.9	23.7	18.8	15.0	11.9	9.4	7.5	6.0	4.7	3.8	3.0	2.4	1.9	1.5	1.2	0.9	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2
3	90	71.5	56.8	45.1	35.8	28.5	22.6	18.0	14.3	11.3	9.0	7.1	5.7	4.5	3.6	2.8	2.3	1.8	1.4	1.1	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
3.5	105	83.4	66.3	52.6	41.8	33.2	26.4	21.0	16.6	13.2	10.5	8.3	6.6	5.3	4.2	3.3	2.6	2.1	1.7	1.3	1.1	0.8	0.7	0.5	0.4	0.3	0.3
4	120	95.3	75.7	60.1	47.8	37.9	30.1	23.9	19.0	15.1	12.0	9.5	7.6	6.0	4.8	3.8	3.0	2.4	1.9	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3
4.5	135	107.2	85.2	67.7	53.7	42.7	33.9	26.9	21.4	17.0	13.5	10.7	8.5	6.8	5.4	4.3	3.4	2.7	2.1	1.7	1.4	1.1	0.9	0.7	0.5	0.4	0.3
5	150	119.1	94.6	75.2	59.7	47.4	37.7	29.9	23.8	18.9	15.0	11.9	9.5	7.5	6.0	4.7	3.8	3.0	2.4	1.9	1.5	1.2	0.9	0.8	0.6	0.5	0.4
5.5	165	131.1	104.1	82.7	65.7	52.2	41.4	32.9	26.2	20.8	16.5	13.1	10.4	8.3	6.6	5.2	4.1	3.3	2.6	2.1	1.7	1.3	1.0	0.8	0.7	0.5	0.4
6	180	143.0	113.6	90.2	71.7	56.9	45.2	35.9	28.5	22.7	18.0	14.3	11.4	9.0	7.2	5.7	4.5	3.6	2.9	2.3	1.8	1.4	1.1	0.9	0.7	0.6	0.5
6.5	195	154.9	123.0	97.7	77.6	61.7	49.0	38.9	30.9	24.5	19.5	15.5	12.3	9.8	7.8	6.2	4.9	3.9	3.1	2.5	2.0	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5
7	210	166.8	132.5	105.2	83.6	66.4	52.7	41.9	33.3	26.4	21.0	16.7	13.3	10.5	8.4	6.6	5.3	4.2	3.3	2.6	2.1	1.7	1.3	1.1	0.8	0.7	0.5
7.5	225	178.7	142.0	112.8	89.6	71.2	56.5	44.9	35.7	28.3	22.5	17.9	14.2	11.3	9.0	7.1	5.7	4.5	3.6	2.8	2.3	1.8	1.4	1.1	0.9	0.7	0.6
8	240	190.6	151.4	120.3	95.5	75.9	60.3	47.9	38.0	30.2	24.0	19.1	15.1	12.0	9.6	7.6	6.0	4.8	3.8	3.0	2.4	1.9	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6
8.5	255	202.6	160.9	127.8	101.5	80.6	64.1	50.9	40.4	32.1	25.5	20.3	16.1	12.8	10.2	8.1	6.4	5.1	4.0	3.2	2.6	2.0	1.6	1.3	1.0	0.8	0.6
9	270	214.5	170.4	135.3	107.5	85.4	67.8	53.9	42.8	34.0	27.0	21.4	17.0	13.5	10.7	8.5	6.8	5.4	4.3	3.4	2.7	2.1	1.7	1.4	1.1	0.9	0.7
9.5	285	226.4	179.8	142.8	113.5	90.1	71.6	56.9	45.2	35.9	28.5	22.6	18.0	14.3	11.3	9.0	7.2	5.7	4.5	3.6	2.9	2.3	1.8	1.4	1.1	0.9	0.7
10	300	238.3	189.3	150.4	119.4	94.9	75.4	59.9	47.5	37.8	30.0	23.8	18.9	15.0	11.9	9.5	7.5	6.0	4.8	3.8	3.0	2.4	1.9	1.5	1.2	0.9	0.8
10.5	315	250.2	198.8	157.9	125.4	99.6	79.1	62.9	49.9	39.7	31.5	25.0	19.9	15.8	12.5	10.0	7.9	6.3	5.0	4.0	3.2	2.5	2.0	1.6	1.3	1.0	0.8
11	330	262.1	208.2	165.4	131.4	104.4	82.9	65.8	52.3	41.5	33.0	26.2	20.8	16.5	13.1	10.4	8.3	6.6	5.2	4.2	3.3	2.6	2.1	1.7	1.3	1.0	0.8
11.5	345	274.0	217.7	172.9	137.3	109.1	86.7	68.8	54.7	43.4	34.5	27.4	21.8	17.3	13.7	10.9	8.7	6.9	5.5	4.3	3.5	2.7	2.2	1.7	1.4	1.1	0.9
12	360	286.0	227.1	180.4	143.3	113.8	90.4	71.8	57.1	45.3	36.0	28.6	22.7	18.0	14.3	11.4	9.0	7.2	5.7	4.5	3.6	2.9	2.3	1.8	1.4	1.1	0.9
12.5	375	297.9	236.6	187.9	149.3	118.6	94.2	74.8	59.4	47.2	37.5	29.8	23.7	18.8	14.9	11.9	9.4	7.5	5.9	4.7	3.8	3.0	2.4	1.9	1.5	1.2	0.9
13	390	309.8	246.1	195.5	155.3	123.3	98.0	77.8	61.8	49.1	39.0	31.0	24.6	19.5	15.5	12.3	9.8	7.8	6.2	4.9	3.9	3.1	2.5	2.0	1.6	1.2	1.0
13.5	405	321.7	255.5	203.0	161.2	128.1	101.7	80.8	64.2	51.0	40.5	32.2	25.6	20.3	16.1	12.8	10.2	8.1	6.4	5.1	4.1	3.2	2.6	2.0	1.6	1.3	1.0
14	420	333.6	265.0	210.5	167.2	132.8	105.5	83.8	66.6	52.9	42.0	33.4	26.5	21.0	16.7	13.3	10.5	8.4	6.7	5.3	4.2	3.3	2.7	2.1	1.7	1.3	1.1
14.5	435	345.5	274.5	218.0	173.2	137.6	109.3	86.8	68.9	54.8	43.5	34.6	27.4	21.8	17.3	13.8	10.9	8.7	6.9	5.5	4.4	3.5	2.7	2.2	1.7	1.4	1.1
15	450	357.4	283.9	225.5	179.1	142.3	113.0	89.8	71.3	56.7	45.0	35.7	28.4	22.6	17.9	14.2	11.3	9.0	7.1	5.7	4.5	3.6	2.8	2.3	1.8	1.4	1.1
15.5	465	369.4	293.4	233.1	185.1	147.0	116.8	92.8	73.7	58.5	46.5	36.9	29.3	23.3	18.5	14.7	11.7	9.3	7.4	5.9	4.7	3.7	2.9	2.3	1.9	1.5	1.2
16	480	381.3	302.9	240.6	191.1	151.8	120.6	95.8	76.1	60.4	48.0	38.1	30.3	24.1	19.1	15.2	12.1	9.6	7.6	6.0	4.8	3.8	3.0	2.4	1.9	1.5	1.2
16.5	495	393.2	312.3	248.1	197.1	156.5	124.3	98.8	78.5	62.3	49.5	39.3	31.2	24.8	19.7	15.7	12.4	9.9	7.8	6.2	5.0	3.9	3.1	2.5	2.0	1.6	1.2
17	510	405.1	321.8	255.6	203.0	161.3	128.1	101.8	80.8	64.2	51.0	40.5	32.2	25.6	20.3	16.1	12.8	10.2	8.1	6.4	5.1	4.1	3.2	2.6	2.0	1.6	1.3
17.5	525	417.0	331.3	263.1	209.0	166.0	131.9	104.8	83.2	66.1	52.5	41.7	33.1	26.3	20.9	16.6	13.2	10.5	8.3	6.6	5.3	4.2	3.3	2.6	2.1	1.7	1.3
18	540	428.9	340.7	270.6	215.0	170.8	135.6	107.7	85.6	68.0	54.0	42.9	34.1	27.1	21.5	17.1	13.6	10.8	8.6	6.8	5.4	4.3	3.4	2.7	2.1	1.7	1.4
18.5	555	440.9	350.2	278.2	220.9	175.5	139.4	110.7	88.0	69.9	55.5	44.1	35.0	27.8	22.1	17.6	13.9	11.1	8.8	7.0	5.6	4.4	3.5	2.8	2.2	1.8	1.4
19	570	452.8	359.6	285.7	226.9	180.2	143.2	113.7	90.3	71.8	57.0	45.3	36.0	28.6	22.7	18.0	14.3	11.4	9.0	7.2	5.7	4.5	3.6	2.9	2.3	1.8	1.4
19.5	585	464.7	369.1	293.2	232.9	185.0	146.9	116.7	92.7	73.6	58.5	46.5	36.9	29.3	23.3	18.5	14.7	11.7	9.3	7.4	5.9	4.6	3.7	2.9	2.3	1.8	1.5
20	600	476.6	378.6	300.7	238.9	189.7	150.7	119.7	95.1	75.5	60.0	47.7	37.9	30.1	23.9	19.0	15.1	12.0	9.5	7.6	6.0	4.8	3.8	3.0	2.4	1.9	1.5

Carbonate-Carbonhydrogen-Equilibrium

Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

A sufficient CO_2 content is essential for lush growth of submerged plants!

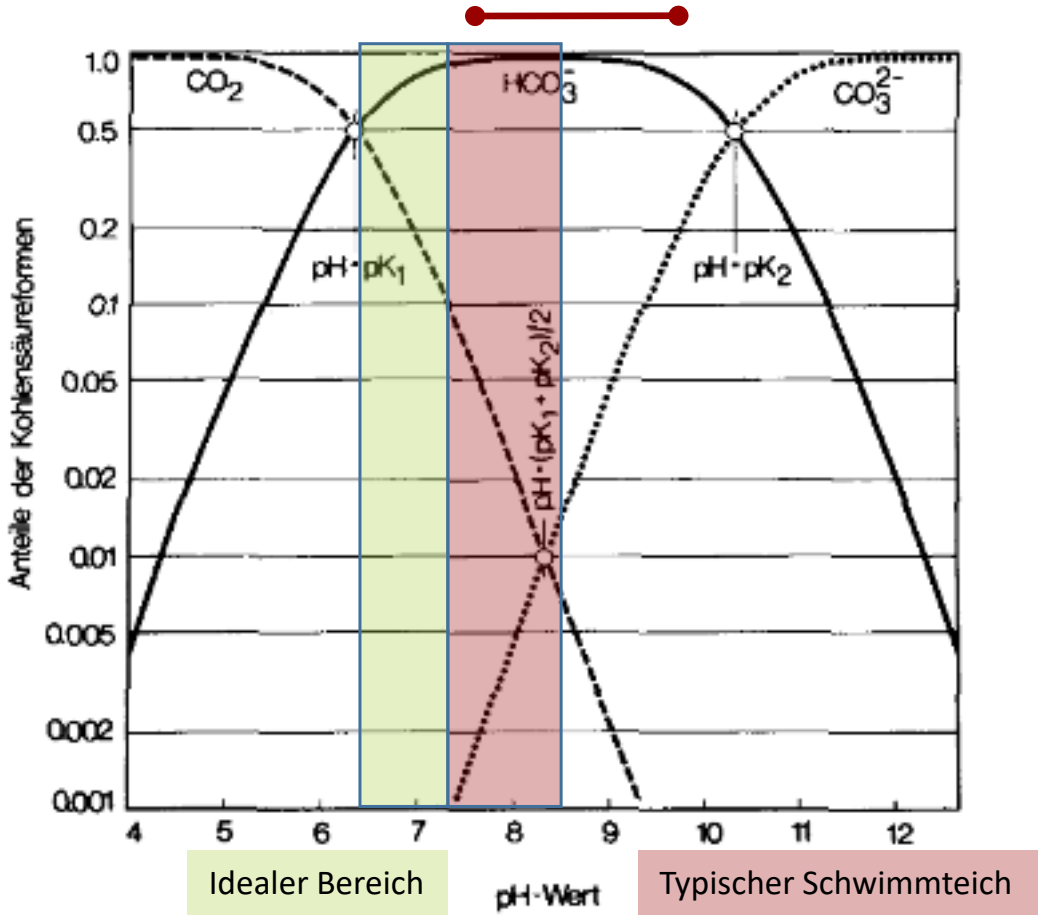
Entscheidend für gutes Wachstum submerser Pflanzen ist ein ausreichender Gehalt an gelöstem CO_2!

An intermediate Carbonate hardness can support growth of certain submerged plant species.

Eine mittlere Karbonathärte kann hier für manche Pflanzenarten unterstützen.

East-African lakes without submerged plants

Ostafrikanische Seen ohne Unterwasserpflanzen



Optimal for growths of submerged plants:

Für submersen Pflanzenwuchs optimal:

Relatively low Carbonate hardness

Relativ niedrige Karbonathärte

KH: 4-10° dH

pH: 6,7°-7,4°

(≙ CO_2 concentration of 15-30 mg/l)

High Carbonate hardness

Hohe Karbonathärte

KH: 10-20° dH

pH: 7,2°-7,6°

(≙ CO_2 concentration of 15-30 mg/l)

Alternative carbon sources applicable as fertilizer?

Alternative Kohlenstoffquellen als Dünger im Schwimmteich?

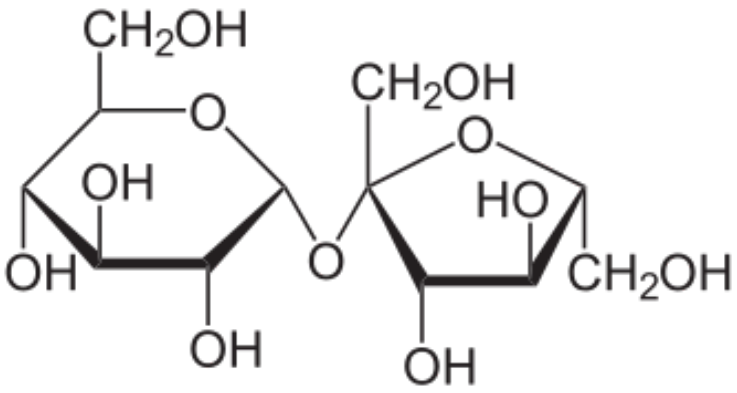
Cyanobacteria, algae and macrophytes are the only organisms that can utilize light as energy source and CO_2 / HCO_3^- for synthesis of biomass

Cyanobakterien, Algen und höher Pflanzen sind die einigen Organismen, die Licht als Energiequelle und CO_2 als Kohlenstoffquelle für den Aufbau von Biomasse nutzen können

Kohlendioxid / Kohlensäure

Karbonat

Hydrogenkarbonat

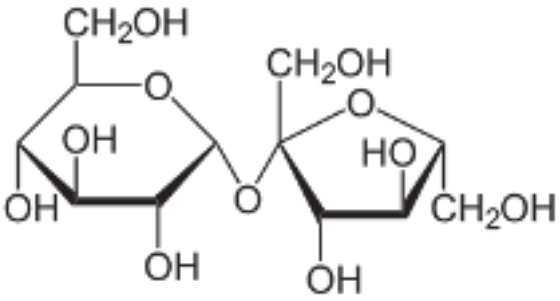


Saccharose as Carbon source for submerged plants?

Rohrzucker als Kohlenstoffquelle für Unterwasserpflanzen?

Alternative carbonsources applicable as fertilizer?

Alternative Kohlenstoffquellen als Dünger im Schwimmteich?



Saccharose (Rohrzucker)

Carbon supply of submerged plants via sugar as fertilizer ?

Kohlenstoffversorgung von Unterwasserpflanzen über Düngung mit Zucker?

Tissue culture: plants can uptake and utilize sugar as Carbon source, but:

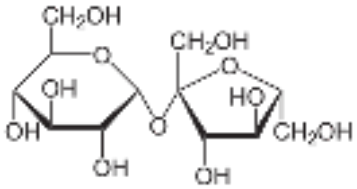
Gewebekultur: Pflanzen können Zucker aufnehmen und als Kohlestoffquelle nutzen, aber:

In contrast to the anorganic Carbon compounds Carbondioxide, Hydrogencarbonate and Carbonate, all organic compounds such as sugar or carbonacids can be utilized as Carbon but also as energy source.

Im Gegensatz zur den anorganischen Kohlenstoffverbindungen Kohlendioxid, Hydrogenkarbonat und Karbonat lassen sich alle organischen Kohlenstoffverbindungen wie Zucker oder Carbonsäuren nicht nur als C-Quelle sondern auch als Energiequelle nutzen!

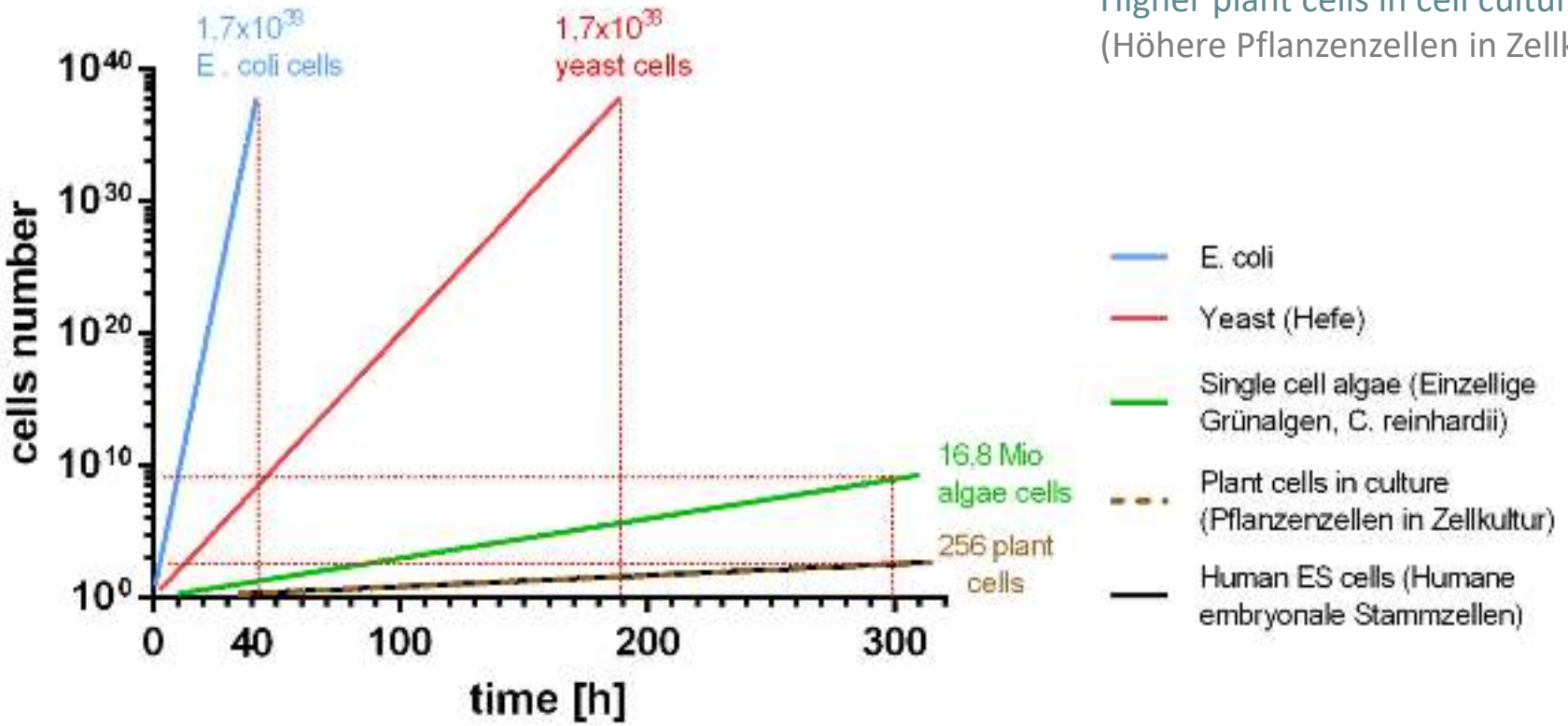
Carbon supply of submerged plants via sugar?

Kohlenstoffversorgung von Unterwasserpflanzen über Düngung mit Zucker?



Saccharose (Rohrzucker)

Generation time (Generationszeit):
E. coli 20 min
Hefen 90 min
Single cell green algae (Einzellige Grünalgen) 9,5h
Higher plant cells in cell culture: 35h
(Höhere Pflanzenzellen in Zellkultur)



Bacteria are much faster…….increased bacterial counts (incl. E. coli), increase formation of biofilms and (unattractive) deposition of organic sediments also in the swimming zone!

Bakterien sind viel schneller…….erhöhte Keimzahlen (incl. E. coli), stark erhöhtes Biofilmwachstum und erhöhte (unschöne) Sedimentdeposition auch im Schwimmbereich!

Alternative carbonsources applicable as fertilizer?

Alternative Kohlenstoffquellen als Dünger im Schwimmteich?

CO_2 / HCO_3^- is the only Carbon source for plants that cannot be utilized as Carbon and energy source by bacteria for acellerated formation of undesireable biofilms

CO_2 / HCO_3^- ist einzige Kohlenstoffquelle für Pflanzen, die nicht auch von Bakterien als Kohlenstoff- und Energiequelle für die beschleunigte Bildung von unerwünschten Biofilmen genutzt werden kann !

Chemical water specifications for different types of swimming Ponds / Biopools

Chemischen Wasserparametern für unterschiedliche Typen von Schwimmteichen /Biopools

Type of pond **Teichtyp**	**CO_2**	**pH**	**Carbonate Hardness** **Karbonathärte**	**Further requirements** **Weitere Anforderungen**
Biopool without plants but with microbiological substrate filter for N/P-removal	Not required	Not critical, ~ 7 - 8.5	Not critical, > 4	Sufficient macronutrients (Ca, K, Mg, S) and (microbiologically available) trace elements (Fe, Mn, B, Cu, Zn, Cl, etc.) for growth of bacterial biofilms in substrate filters
Biopool ohne Pflanzen aber mit mikrobiologischem Substratfilter für N/P-Abbau/Bindung	Nicht erforder-lich	Unkritisch ~ 7 – 8,5	Unkritisch, > 4	Ausreichend Makronährstoffe(Ca, K, Mg, S) und (mikrobiell verfügbare) Spurenelemente (Fe, Mn, B, Cu, Zn, Cl, etc.) für Wachstum von Biofilmen in Substratfiltern
Swimmingpond with marshzone and emerse plants for biological filtration; no submerged plants	Not required	Not critical, ~ 7 - 8.5	Not critical, > 4	Sufficient macronutrients (Ca, K, Mg, S) and (plant available) trace elements (Fe, Mn, B, Cu, Zn, Cl, etc.) for growth of emerse plants
Schwimmteich mit Sumpfzone und emersen Pflanzen für biologische Filterung; ohne Unterwasserpflanzen	Nicht erforder-lich	Unkritisch ~ 7 – 8,5	Unkritisch, > 4	Ausreichend Makronährstoffe(Ca, K, Mg, S) und (pflanzenverfügbare) Spurenelemente (Fe, Mn, B, Cu, Zn, Cl, etc.) für Wachstum von Pflanzen und Biofilmen in Substratfiltern
Swimmingpond with shallow water/marsh zone and submerged plants	10-25 mg / l	6,7 - 7,6 depending on carbonate hardness	Optimal: 6-12°dH	Sufficient macronutrients (Ca, K, Mg, S) and (plant available) trace elements (Fe, Mn, B, Cu, Zn, Cl, etc.) trace elements for growth of emerse and submerged plants
Schwimmteich mit Sumpfzone und emersen Pflanzen sowie Unterwasserpflanzen		6,7 - 7,6 abhängig von der Karbonathärte		Ausreichend Makronährstoffe(Ca, K, Mg, S) und (pflanzenverfügbare) Spurenelemente (Fe, Mn, B, Cu, Zn, Cl, etc.) für Wachstum von Pflanzen und Biofilmen in Substratfiltern

The customer would like to get a swimmingpond with and lush growth of emerse and submerged plants

How to achieve this?

Der Kunde möchte einen artenreichen Schwimmteich mit üppiger Unterwasserflora:

Was tun?

CO_2- Feeding in the Aquarium: approved for decades

CO_2-Düngung im Aquarium: Seit Jahrzehnten bewährt

CO_2-Feeding in the swimmingpond: technically and economically feasible?

CO_2-Düngung im Schwimmteich: Technisch und wirtschaftlich umsetzbar?

CO_2 - Supplementation for better growth of submerged plants

CO_2 – Düngung im Aquarium für besseres Wachstum von Unterwasserpflanzen

CO_2-production from sugar & yeast

CO_2-Produktion aus Zucker & Hefe

CO_2-Diffusor

Sprudelsteine

CO_2-Reactor

CO_2-Reaktor

Controlled feeding: CO_2 from refill cylinders

~ 50g/d for a 1.000l Aquarium

Gesteuerte Begasung: CO_2 aus Druckflaschen

Verbrauch: ca. 50g / Tag für 1000l Becken

CO_2-Feeding in the swimming pond:

Technically viable, but economically feasible?

Proof of Concept?

CO_2-Düngung im Schwimmteich:

Technisch umsetzbar, aber wirtschaftlich machbar?

Proof of Concept?

CO_2 – Düngung im Schwimmteich: CO_2 aus dem Erdreich?

Technical approaches for the swimming pond:

Technische Lösungsansätze im Schwimmteich:

Utilization of CO_2-enriched air from soil

Nutzung von CO_2-angereicherter Luft aus dem Erdreich

Air withdrawl via drainage pipes in the soil, pond feeding via compressor and dissolution in water via CO_2-diffusor, or with venturi-aerator,

Entnahme über im Bodenverlegtes Drainagerohr, Teichzuführung über Kompressor und Lösung im Wasser auch über CO_2-Sprudler, oder über Venturi-Belüfter,

Venturi Eco2

BIOTOP Carbonator

CO_2 – Supplementation in the swimming pond: CO_2 from Soil?

CO_2 – Düngung im Schwimmteich: CO_2 aus dem Erdreich?

Utilization of CO_2-enriched air from soil

Nutzung von CO_2-angereicherter Luft aus dem Erdreich

Does this really work?

Funktioniert das wirklich?

CO_2 – Supplementation in the swimming pond: CO_2 from Soil?

CO_2 – Düngung im Schwimmteich: CO_2 aus dem Erdreich?

Our swimming pond (Class 3/4)

Unser Schwimmteich (Klasse 3/4)

CO_2 – Supplementation in the swimming pond: CO_2 from Soil?

CO_2 – Düngung im Schwimmteich: CO_2 aus dem Erdreich?

Daily CO_2-requirement for a 100 m^3 swimming pond (Cat. 3-4)?

CO_2-Tagesbedarf für einen 100 m^3 Schwimmteich (Kat. 3)?

Test approach: Own measurements with CO_2-feeding from gas cylinders (Target concentration for good growth of submerged plants ~15 mg / l):

Testmethode: Eigene Messungen unter Zufuhr von komprimiertem Kohlendioxid aus Druckflaschen (Zielgehalt CO_2 für gutes Pflanzenwachstum: ~15 mg / l) :

Result: Average daily requirement: ~ 1000g Carbondioxide.

Ergebnis: Durchschnittlicher Tagesbedarf ca. 1000g Kohlendioxid.

Please note: an specifically designed carbon reactor was used, which (in contrast to commercial devices) allows to dissolve CO_2 with 100% efficiency

Zu beachten ist, dass dabei ein speziell konstruierter Kohlendioxidreaktor verwendet wurde, der im Gegensatz zu handelsüblichen Verfahren in der Lage ist, Kohlendioxid mit 100%iger Effizienz dem Durchströmwasser zuzuführen.

For comparison own measurements with conventional approach:

Zum Vergleich eigene Messungen bei konventioneller Methode:

Test Approach: Feeding with a maximal volume of air from soil via a Venturi Eco2 with permanent pumping at cold water conditions (April)

Testmethode: Zuführung von maximaler Menge Bodenluft bei permanenter Pumpleistung über Venturi Eco2 bei recht kaltem Wasser (April)

Result: maximal CO_2 concentration achieved: ~5 mg/l

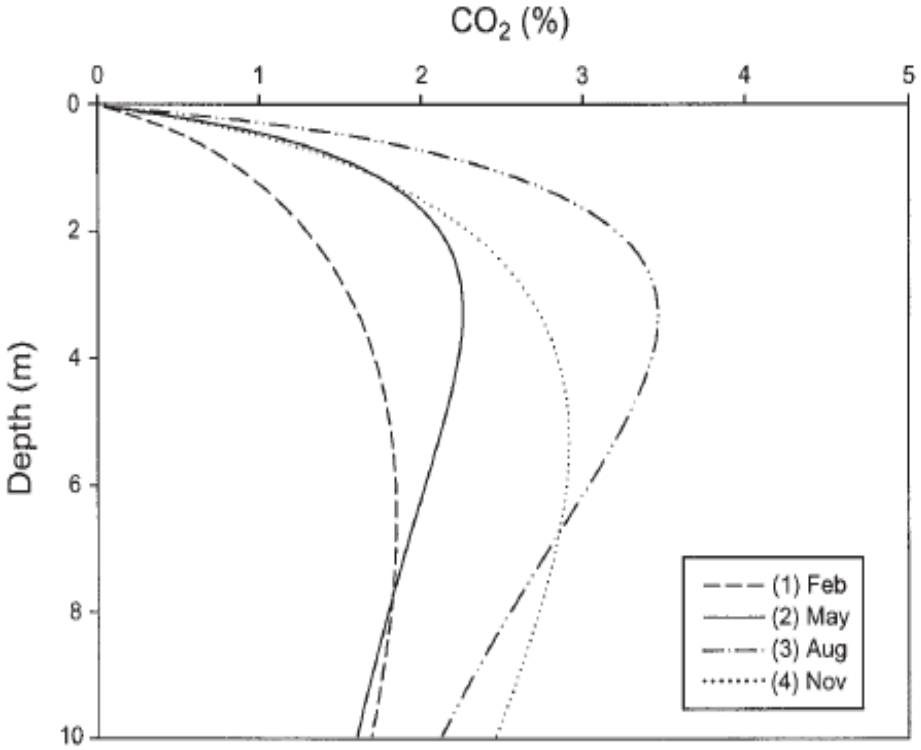
Ergebnis: maximal erreichte CO_2-Konzentration: ~5 mg/l

CO_2 – Supplementation in the swimming pond: CO_2 from Soil?

CO_2 – Düngung im Schwimmteich: CO_2 aus dem Erdreich?

Is it realistic to provide 1 kg CO_2 / day through CO_2-enriched air from soil?

Ist es realistisch möglich 1 kg CO_2 / Tag über Bodenluft zuzuführen?



Oh, Environ Engineer Sci., 2005

Ground air contains an increased proportion of CO_2, depending on depth, soil composition, season and covering vegetation.

Bodenluft enthält einen erhöhten Anteil an Kohlendioxid, abhängig von Bodentiefe, Bodenbeschaffen-heit, Jahreszeit und darüber liegen-der Bepflanzung.

CO_2 is produced in the soil through plant root respiration (~30%) and microbial transformation of organic substrates (~70%).

CO_2 im Boden wird durch Wurzelatmung (~30%) und Mikrobielle Umsetzung organischer Substrate (~70%) produziert.

According to literature, the CO_2-content in the soil can be 10-100x higher than in atmosphere (0,3-3%). At a depth of one meter, an average maximal content of 1-2% CO_2 can be expected.

Laut Literatur kann der Kohlendioxidgehalt im Boden ca. 10-100x höher als in der Atmosphäre sein, also 0,3-3%. In einer Tiefe von einem Meter kann von einem durchschnittlichen Gehalt von maximal 1-2% ausgegangen werden.

CO_2 – Düngung im Schwimmteich: CO_2 aus dem Erdreich?

Exemplified calculation of the Volume of CO_2-enriched ground air with is needed daily to fulifill the requirements of a conventional 100 m^3 schwimming pond:

Beispielhafte Berechnung des täglich benötigten Volumens an Kohlendioxid-reicher Bodenluft zur Deckung des Kohlendioxidbedarfes eines 100 m^3 Schwimmteiches konventioneller Bauart:

Avogadro's hypothesis: 1mol of an ideal Gas under norm conditions (1 Athmosphere) fills 22,4l; 1 mol CO_2 ≙ 44 g

Avogadrosches Gesetz: 1 mol eines idealen Gases nimmt unter Normbedingungen (Druck: 1 Atmosphäre) ein Volumen von 22,4 l ein; 1 mol CO_2 ≙ 44 g).

44g pure CO_2 ≙ 22,4 l; 1000g g pure CO_2 ≙ 509 l pure CO_2

44g reines CO_2 ≙ 22,4 l; 1000g g reines CO_2 ≙ 509 l reines CO_2

At an assumed CO_2 – concentration of 1,5%, the swimmingpond would require 34 m^3 ground air per day!

Bei einer angenommene CO_2 - Konzentration von 1,5% müssten dem Schwimmteich basierend auf dieser Berechnung täglich ca. 34 m^3 Bodenluft / Tag zugeführt werden!

CO_2 – Supplementation in the swimming pond: CO_2 from Soil?

CO_2 – Düngung im Schwimmteich: CO_2 aus dem Erdreich?

In reality, the required volumes are significantly higher, since during permanent withdrawal of ground air the CO_2 content will be substantially lower!

Tatsächlich liegen die notwendigen Volumen jedoch wahrscheinlich deutlich darüber, da bei permanenter Absaugung der Bodenluft der Anteil an Kohlendioxid deutlich niedriger sein dürfte!

Other calculations suggest that the situation is even less favourable:

Andere Berechnungen legen sogar nahe, daß die Ausgangslage noch ungünstiger ist:

The CO_2-exhalation of soil samples of high activity reaches about 2,4-7,2 g pro Tag und m² (GISI et al. 1997, S. 177).

Die CO_2-Exhalation von Bodenproben hoher Aktivität beträgt im Freiland etwa 2,4-7,2 g pro Tag und m² (GISI et al. 1997, S. 177).

This means, if 1000g CO_2 are required per day in a swimming pond, air from ~ 138-416 m^2 ground is required!

D.h. bei 1000g CO_2 (Tagesbedarf Schwimmteich) sind ~ 138-416 m^2 Bodenfläche notwendig!

CO_2 – Supplementation in the swimming pond: CO_2 from Soil?

CO_2 – Düngung im Schwimmteich: CO_2 aus dem Erdreich?

Utilization of CO_2-enriched air from soil

Nutzung von CO_2-angereicherter Luft aus dem Erdreich

The idea is not bad in general…..

But does not lead to measurable improved growth of submerged aquatic plants, since it is too inefficient!

Die Idee ist generell gut…..führt aber nicht merklich zu merklich verbessertem Pflanzenwachstum da viel zu ineffizient!

CO_2 supplementation in the swimming pond: from gas cylinders ?

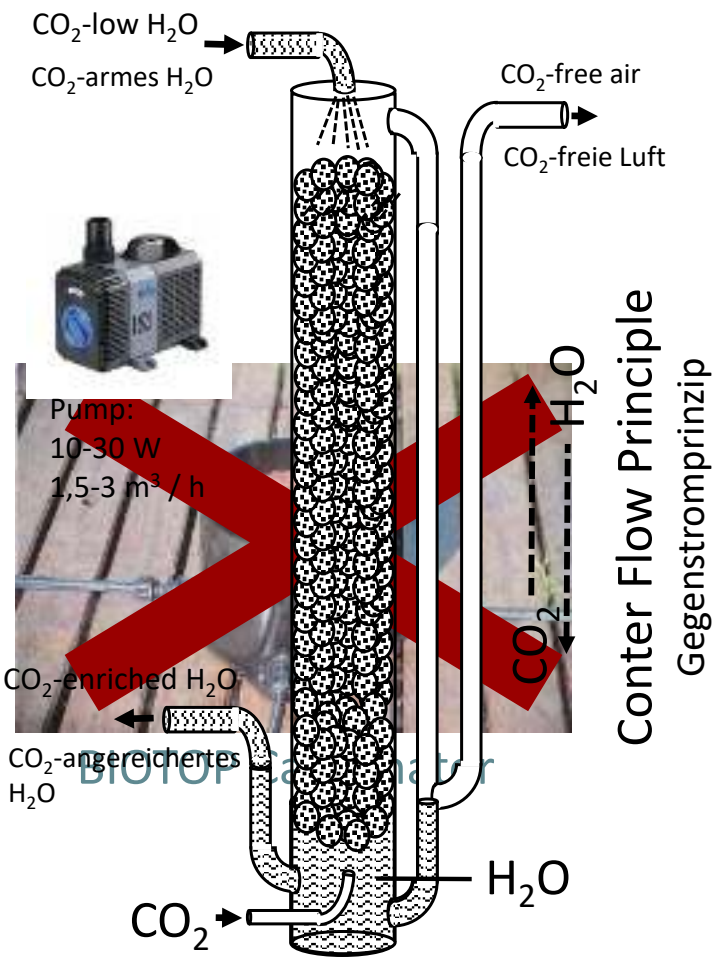
CO_2 – Düngung im Schwimmteich: Kohlendioxid aus Druckflaschen?

Principle: Controlled CO_2-Supplementation from gas cylinders like in the aquarium

Prinzip: gesteuerte Begasung mit CO_2 aus Druckflaschen wie im Aquarium

Magnet valve
Magnetventil

pH-Controller



Carboreactor
Kohlendioxidreaktor
(patent pending)

CO_2 supplementation in the swimming pond: from gas cylinders ?

CO_2 – Düngung im Schwimmteich: Kohlendioxid aus Druckflaschen?

Results of own experiments:

- Target concentration of ~15 mg / l can be reached
- ~15 mg / l are required at summer temperatures
- Lower concentrations ~10 mg / l are sufficient at lower temperatures in spring ad late summer
- Many aquatic plants grow pretty well under submerged conditions (e.g. Baldellia ranunculoides (lesser water-plantain), Callitriche palustris (vernal water-starwort), Chara spec. (charophyte green algae), Hippuris vulgaris (mare's-tail), Juncus bulbosus, Littorella uniflora, Myriophyllum spicatum (Eurasian watermilfoil), Myriophyllum alternifloris (alternateflower watermilfoil), Potamogeton perfollatus/lucens (pondweed)

Ergebnisse eigener Experimente:

- Die Zielkonzentration von ~15 mg / l kann problemlos erreicht werden
- ~15 mg / l werden bei sommerlichen Temperaturen benötigt
- Niedrigere Konzentrationen von ~10 mg / l sind im Frühling und Spätsommer ausreichend
- Viele Unterwasserpflanzen wachsen unter diesen Bedingungen sehr gut (e.g. Baldellia ranunculoides (Igelschlauch), Callitriche palustris (Wasserstern), Chara spec. (Armleuchteralgen), Hippuris vulgaris (Tannenwedel), Juncus bulbosus (Zwiebelbinse), Littorella uniflora (Strandling), Myriophyllum spicatum (Ähriges Tausenblatt), Myriophyllum alternifloris (Wechselblütiges Tausendblatt), Potamogeton perfollatus/lucens (Laichkraut)

CO_2 supplementation in the swimming pond: own results

CO_2 – Düngung im Schwimmteich: eigene Ergebnisse

Emerse and submerged plants grow well.

Sowohl emerse als auch submerse Pflanzen gedeihen gut.

CO_2 supplementation in the swimming pond: from gas cylinders ?

CO_2 – Düngung im Schwimmteich: Kohlendioxid aus Druckflaschen?

The Problem:

Daily CO_2 need for a conventional 100 m^3 swimming pond: ~1 kg CO_2 (≙~3€)

Das Problem:

Täglicher CO_2-Tagesbedarf für einen konventionellen 100 m^3 Schwimmteich : ~1 kg CO_2 (≙~3€)

It works, but is probably too expensive for most customers….

Es funktioniert, ist so aber wohl für die meisten Kunden zu teuer….

How to get it economically feasible?

Wie ist das wirtschaftlich möglich?

How to reduce the need for external CO_2?

Wie lässt sich der Verbrauch von extern zugeführtem CO_2 senken?

1. Targeted utilisation of natural Carbon resources in organic sediments of the marsh/shallow zone for the deep water zone planted with submerged plants
2. (Incomplete) spatial separation into functional compartments:

   i) Schwimming area (unplanted)
   ii) Marsh/shallow water zone (planted with emerse plants)
   iii) Deep water zone (planted with submerged plants)

3. Reduce the unstirred layer on plant leaves by generation of currents in the planted deep water zone
4. Complementation of natural sediments through external insoluble but biodegradable Carbon sources

1. Gezielte Nutzung der natürlichen Kohlenstoffresourcen in organischen Sedimenten in der Sumpf/Flachwaserzone für die mit submersen Pflanzen besetzte Tiefwasserzone
2. (Unvollständige) räumliche Trennung in Funktionsbereiche:

   i) Schwimmbereich (unbepflanzt)
   ii) Sumpf/Flachwasserzone (bepflanzt mit emersen Wasserpflanzen)
   iii) Tiefwasserzone (bepflanzt mit submersen Wasserpflanzen)

3. Reduktion der unbewegten Flüssigkeitsschicht auf Pflanzenblättern durch Erzeugung von Strömung in der bepflanzten Tiefwasserzone
4. Ergänzung der natürlichen Sedimente durch externe, wasserunlösliche aber mikrobiologisch abbaubare Kohlenstoffquellen

1. Gezielte Nutzung der Kohlenstoffresourcen in organischen Sedimenten in der Sumpf/Flachwasserzone

Permanent perfusion of the ground substrate loaded with natural organic sediments leads to CO_2 enrichment of the perfusion water.

Permanente langsame Durchströmung des mit natürlichen organischen Sedimenten beladenen Bodensubstrates mit führt zur CO_2-Anreicherung des Durchströmwassers.

Root respiration (~30%) and microbial transformation of organic substrates (~70%) contribute to enrichtment of perfusion water with CO_2.

Sowohl Wurzelatmung (~30%) als auch mikrobielle Umsetzung von organischen Sedimenten (~70%) führt zu CO_2-Anreicherung des Durchströmwassers.

1. Gezielte Nutzung der Kohlenstoffresourcen in organischen Sedimenten in der Sumpf/Flachwasserzone

Permanent (slow) instead of intervall perfusion with O_2-rich water is important to avoid anaerobic conditions?

Permanente langsame anstatt Intervall-Durchströmung mit Sauerstoff-angereichertem Wasser ist wichtig um anaerobe Verhältnisse zu vermeiden?

Under anaerobic conditions, root respiration cannot take place and only 50% of the Carbon transformed by microbes is released as CO_2, the remaining 50% as marsh gas (Methane, CH_4), which cannot be utilized by plants.

Unter anaeroben Verhältnissen wird die Wurzelatmung behindert und es wird nur ca. 50% des mikrobiell freigesetzten Kohlenstoffes als CO_2 freigesetzt, der Rest als nicht pflanzenverfügbares Methan (CH_4).

Transformation of organic substrates: balance

Umsetzung von organischen Substraten: Bilanz

Respiration, Atmung (aerob) :

$2\ C + 2\ O_2 = 2\ CO_2$

Anaerob

$2\ C + 2\ H_2O = CH_4 + CO_2$

Typical construction of swimming pond (Class 3/4) with interval perfusion of the ground substrate of the marsh/shallow water zone for biological filtering:

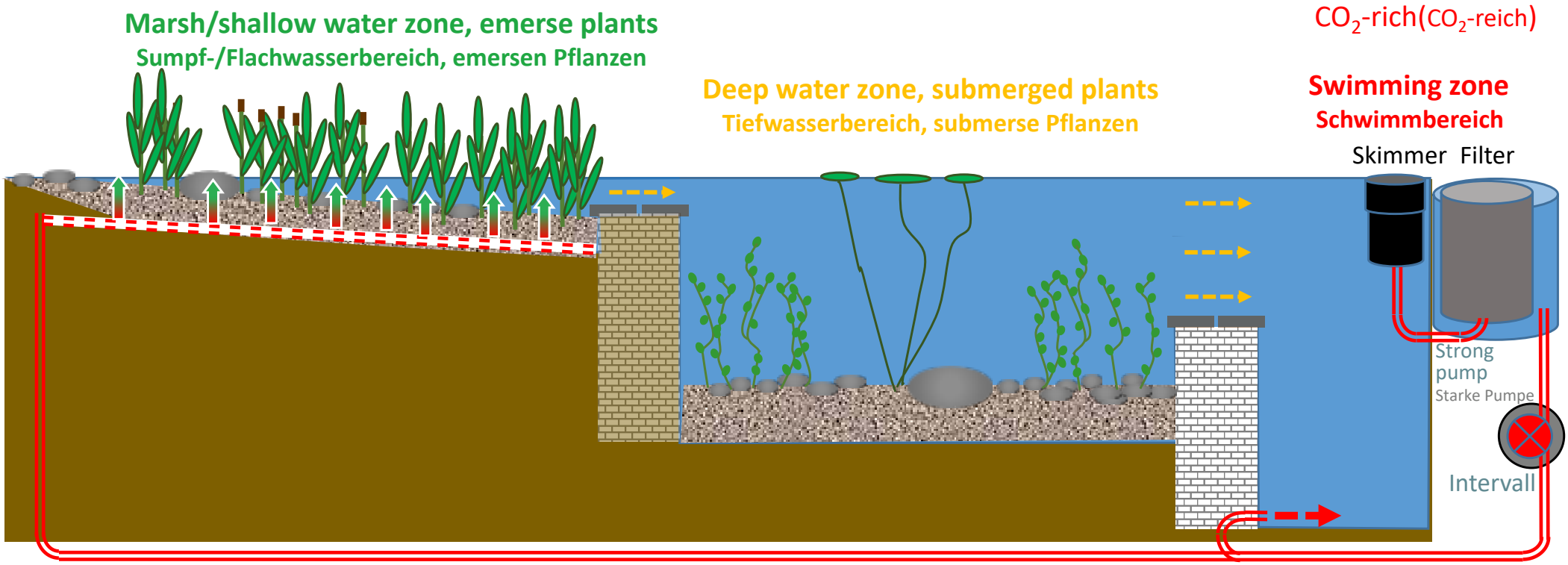
Mixing of CO_2-rich and CO_2-poor water in one circulation.

Loss of CO_2 from perfusion water in the marsh/shallow water zone!

Typische Konstruktion eines Schwimmteiches (Klasse 3/4) mit Intervall-Durchströmung des Bodensubstrates des Sumpf/Flachwasserbereiches für die biologische Filterung:

Mischung von CO_2-reichem und CO_2-armen Wasser in einem Kreislauf.

Verlust von CO_2 aus dem Perfusionswasser in der Sumpf-/Flachwasserzone !



Typical construction of swimming pond (Class 3/4) with interval perfusion of the ground substrate of the marsh/shallow water zone for biological filtering:

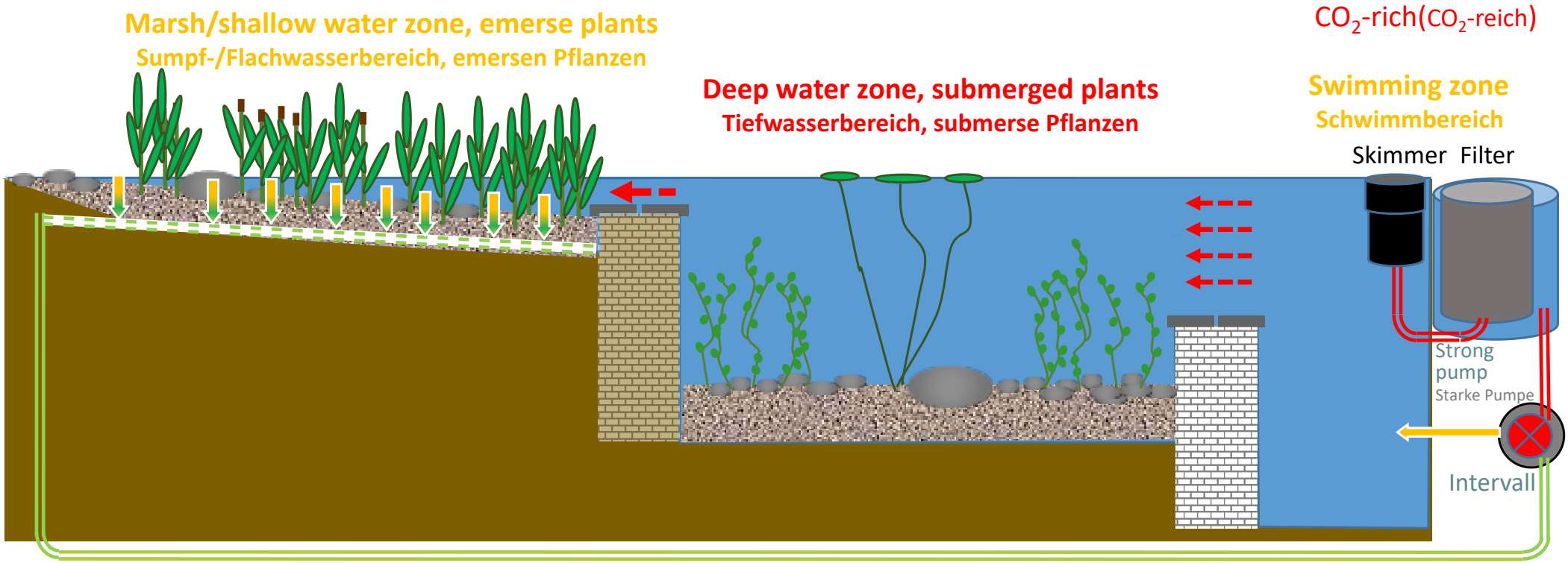
Mixing of CO_2-rich and CO_2-poor water in one circulation.

Loss of CO_2 from perfusion water in the swimming zone!

Typische Konstruktion eines Schwimmteiches (Klasse 3/4) mit Intervall-Durchströmung des Bodensubstrates des Sumpf/Flachwasserbereiches für die biologische Filterung:

Mischung von CO_2-reichem und CO_2-armen Wasser in einem Kreislauf.

Verlust von CO_2 aus dem Perfusionswasser in der Schwimmzone !

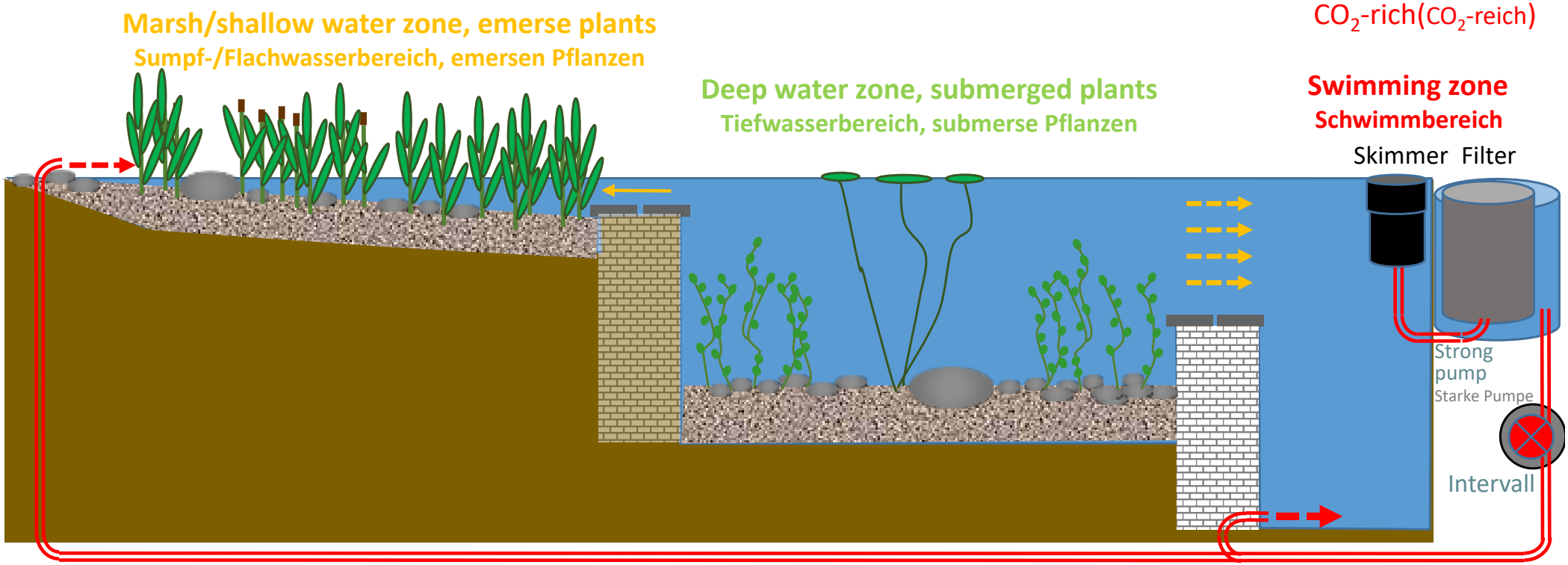


1. Targeted utilisation of natural Carbon resources of the marsh/shallow zone

1. Gezielte Nutzung der natürlichen Kohlenstoffresourcen der Sumpf/Flachwasserzone

- Ground substrate of marsh/shallow water zones should be perfused top-down by a 2nd permanent circulation:
  - ➡ collect the water CO_2-enriched by root respiration and microbial transformation of organic sediments
  - ➡ avoid mixing with CO_2-poor water from the swimming area.
- The CO_2-rich perfusion water should be pumped into the deep water zone planted with submerged plants

- Das Bodensubstrat der Sumpf/Flachwasserzone sollten in einem zweiten Kreislauf von oben nach unten durchströmt werden:
  - ➡ Nutzung von Wasser, welches durch Wurzelatmung und mikrobielle Umsetzung organischer Sedimente mit CO_2 angereichert ist
  - ➡ Vermeidung der Mischung mit CO_2-armen Wasser aus der Schwimmzone
- Das abgesaugte CO_2-angereicherte Wasser kann dann in den mit Unterwasser-pflanzen besetzten Tiefwasser-bereiches gepumpt werden.

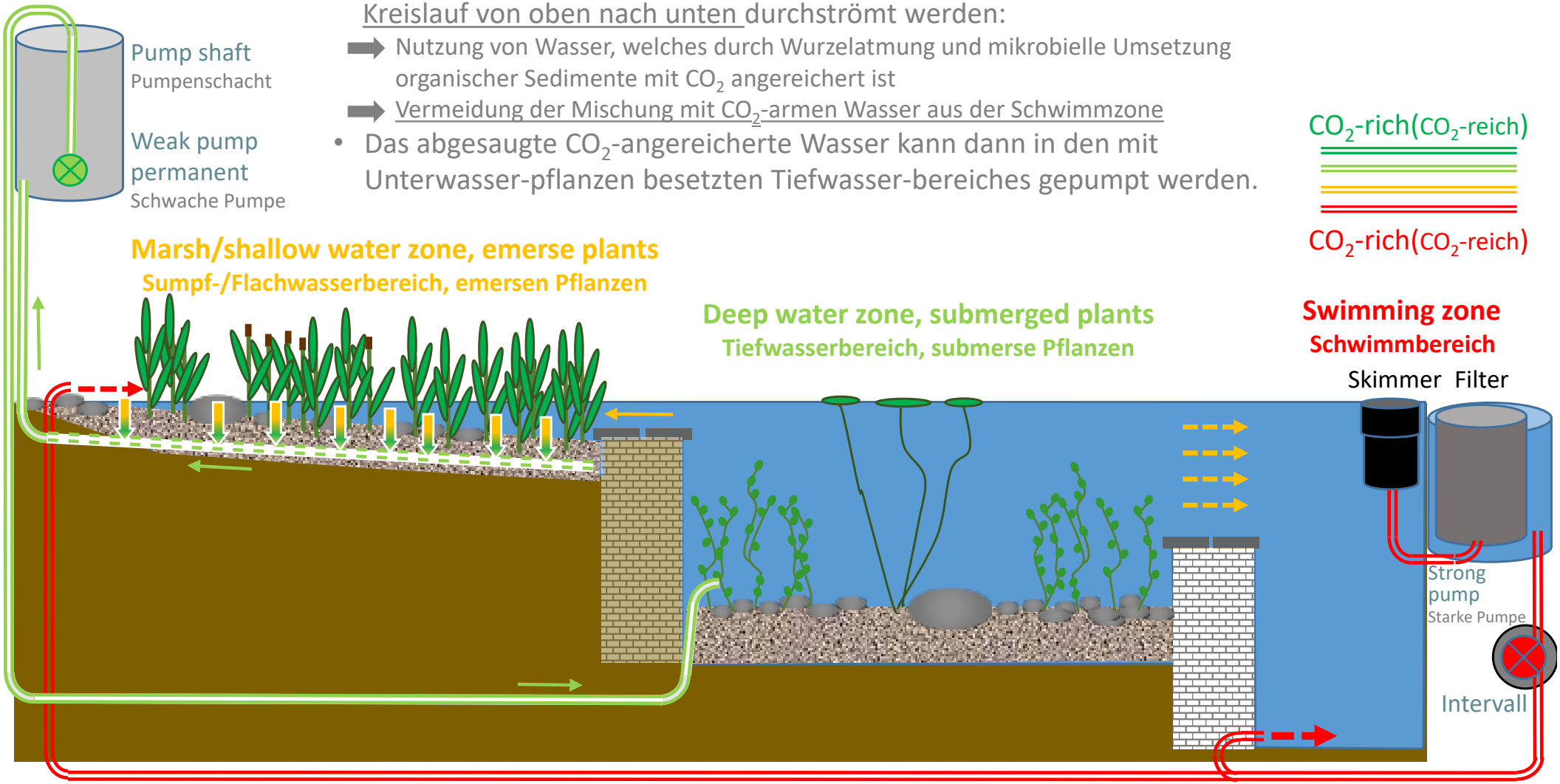


1. Targeted utilisation of natural Carbon resources of the marsh/shallow zone

1. Gezielte Nutzung der natürlichen Kohlenstoffresourcen der Sumpf/Flachwasserzone

- Ground substrate of marsh/shallow water zones should be perfused top-down by a 2nd permanent circulation:
  - ➡ collect the water CO_2-enriched by root respiration and microbial transformation of organic sediments
  - ➡ avoid mixing with CO_2-poor water from the swimming area.
- The CO_2-rich perfusion water should be pumped into the deep water zone planted with submerged plants

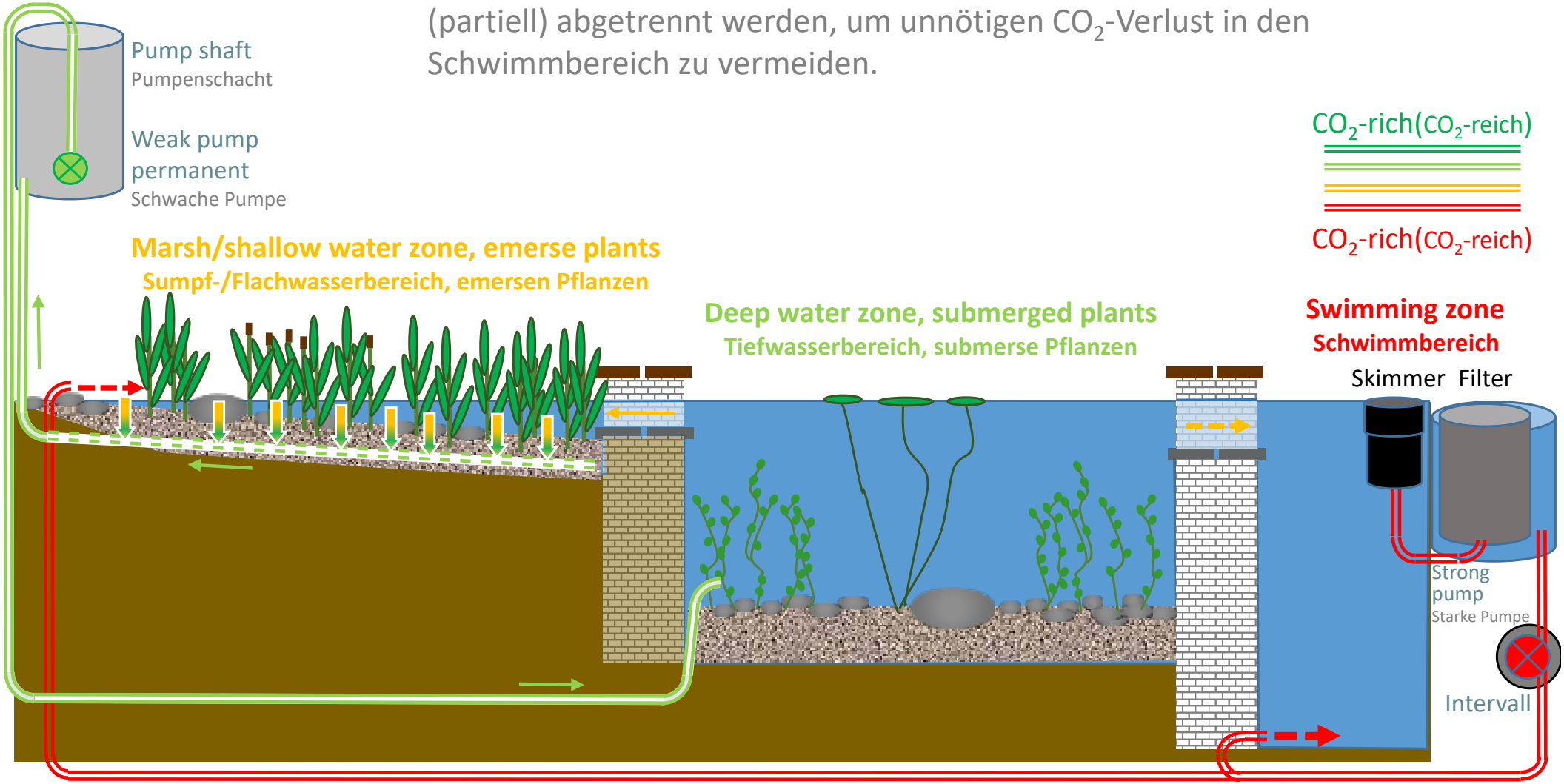
- Das Bodensubstrat der Sumpf/Flachwasserzone sollten in einem zweiten Kreislauf von oben nach unten durchströmt werden:
  - ➡ Nutzung von Wasser, welches durch Wurzelatmung und mikrobielle Umsetzung organischer Sedimente mit CO_2 angereichert ist
  - ➡ Vermeidung der Mischung mit CO_2-armen Wasser aus der Schwimmzone
- Das abgesaugte CO_2-angereicherte Wasser kann dann in den mit Unterwasser-pflanzen besetzten Tiefwasser-bereiches gepumpt werden.



2. (Partial) separtion into functional compartments with sequential perfusion

2. (partielle) räumliche Trennung in Funktionsbereiche mit sequentieller Durchströmung

- The deep water zone planted with submerged plants should be (partially) seperated to avoid unnecessary loss of CO_2 into the swimming zone
- Der mit Unterwasser-pflanzen besetzte Tiefwasserbereich sollte (partiell) abgetrennt werden, um unnötigen CO_2-Verlust in den Schwimmbereich zu vermeiden.

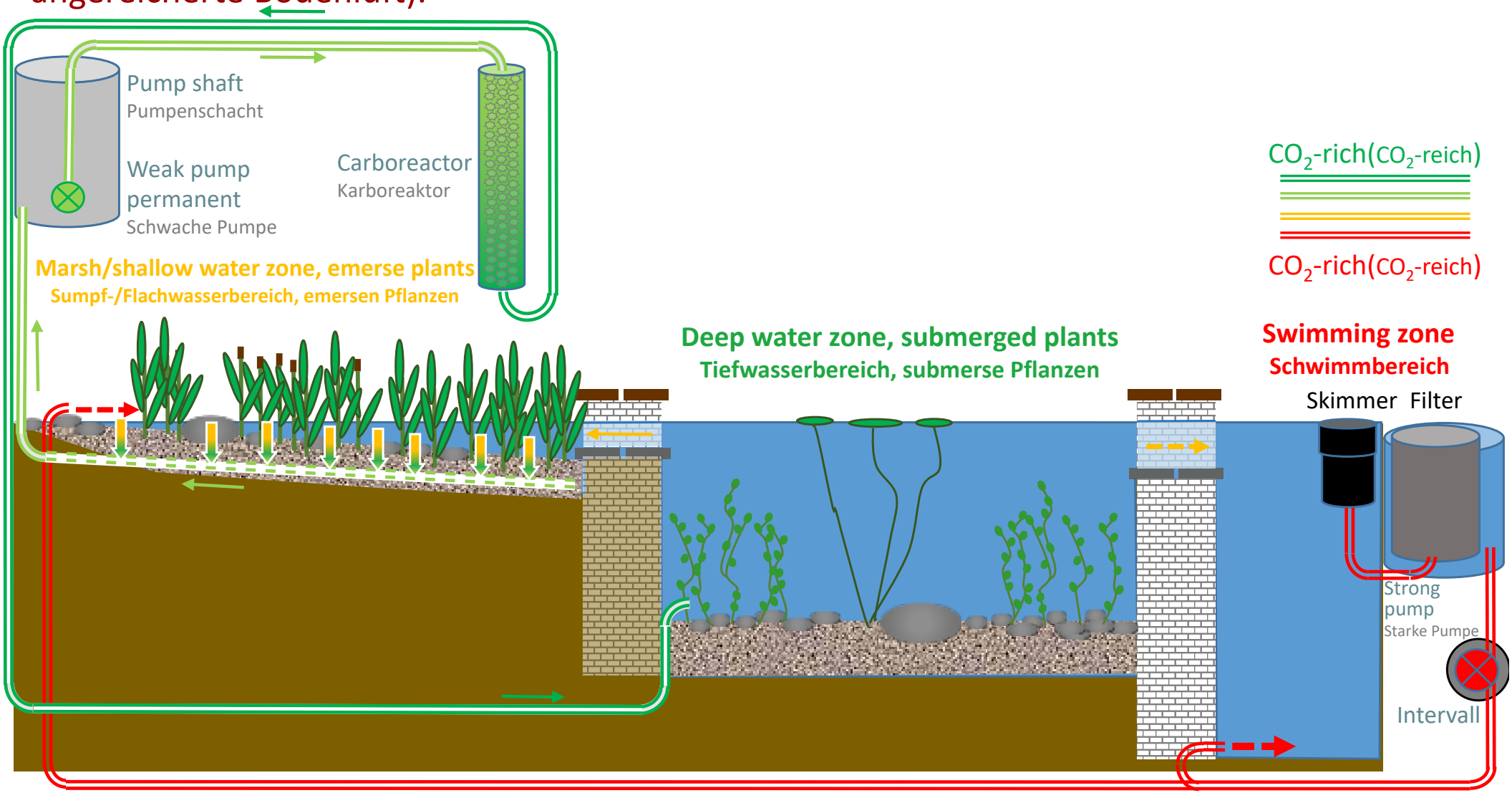


Carboreactor for CO_2 - supplementation

Karboreaktor zur zusätzlichen CO_2 - Anreicherung

If still required: additional CO_2-supplementation via Carboreactor (running with CO_2 from gas zylinders or CO_2-enriched ground air)

Optional: zusätzliche CO_2-Anreicherung über Karboreaktor (mit CO_2 aus Flaschen oder angereicherte Bodenluft).

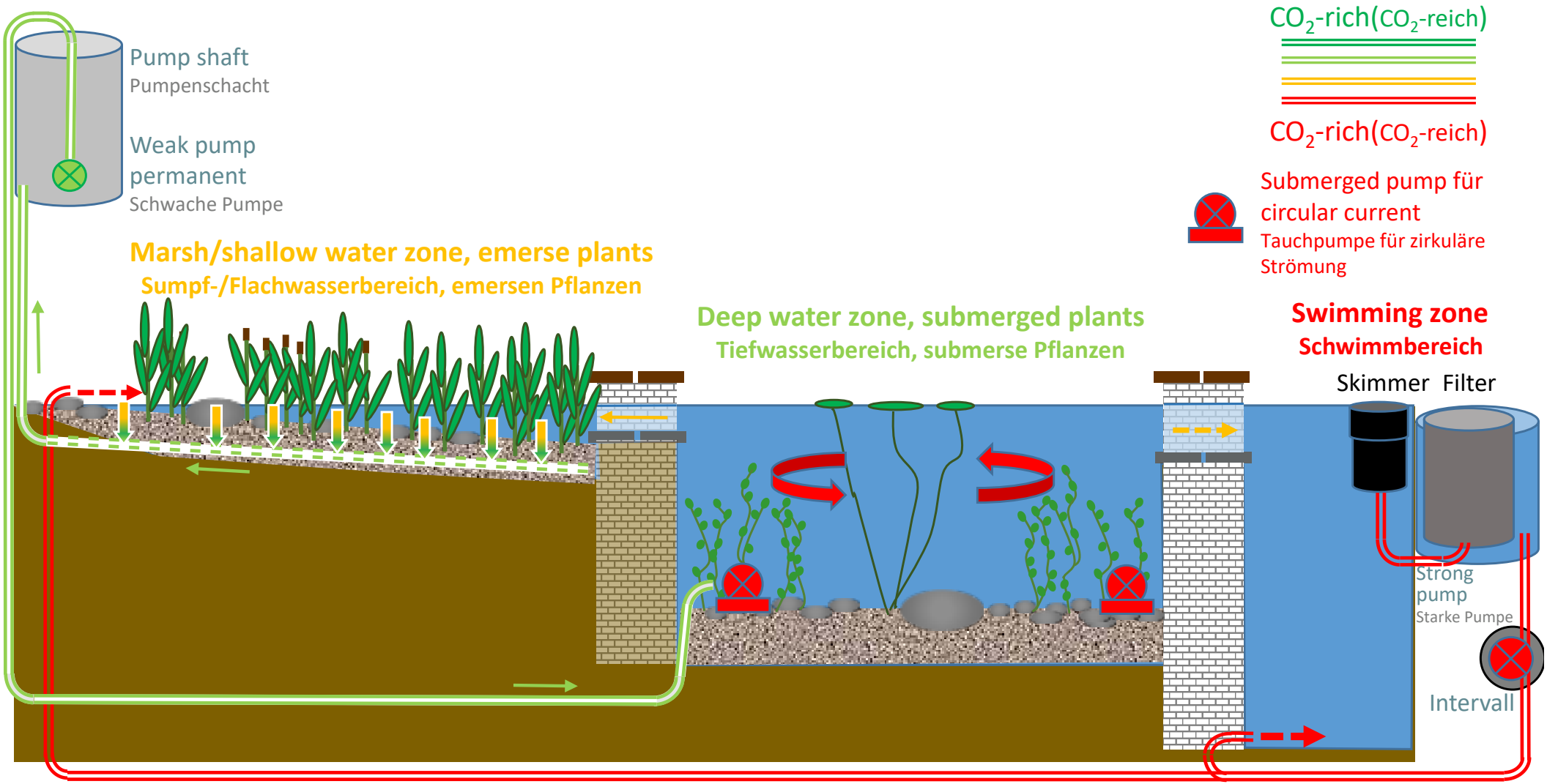


3. Generation of currents in the planted deep water zone

3. Erzeugung von Strömung in der bepflanzten Tiefwasserzone

Reduce the unstirred layer on plant leaves:
Installation of submerged pumps on the ground of the deep water zone for generation of circular currents

Reduktion der unbewegten Flüsigkeitsschicht auf Pflanzenblättern:
Installation von Tauchpumpen am Boden des Tiefwasserbereiches für Erzeugung einer zirkulären Strömung.



4. Complementation of natural sediments through biodegradable Carbon sources

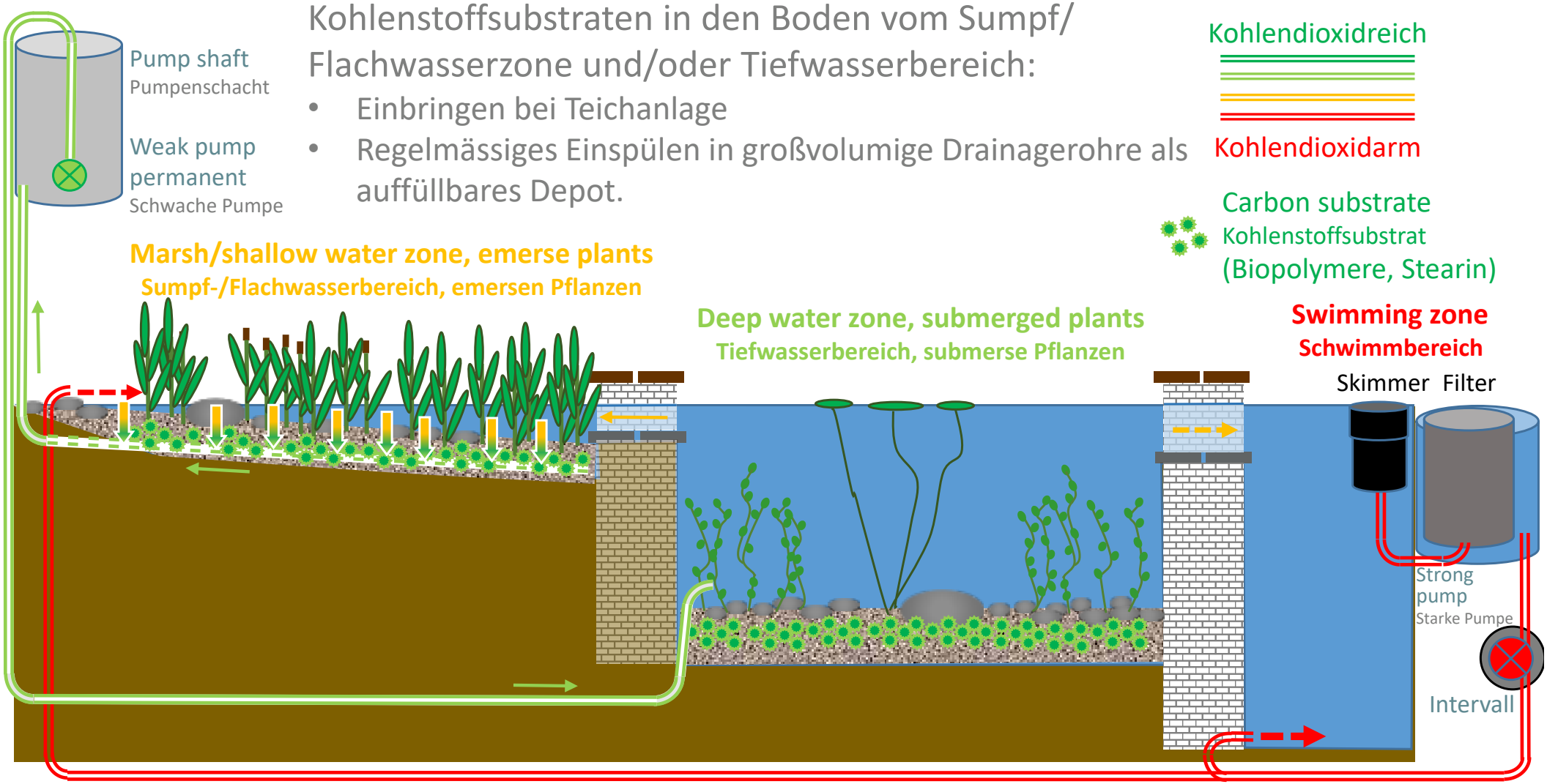
4. Ergänzung der natürlichen Sedimente durch mikrobiologisch abbaubare Kohlenstoffquellen

Incorporation of phosphate-free slowly degradable Carbon substrates into the ground substrate of marsh/shallow water zone and /or planted deep water zone:

- Incorporation during pond construction
- Regular (Bi-annual) refill into large drainage tubes

Einbringen von phosphatfreien langsam abaubaren Kohlenstoffsubstraten in den Boden vom Sumpf/ Flachwasserzone und/oder Tiefwasserbereich:

- Einbringen bei Teichanlage
- Regelmässiges Einspülen in großvolumige Drainagerohre als auffüllbares Depot.



Carbon sources as ground substrate for mikrobiological CO_2 production

Kohlenstoffquellen als Bodensubstrat für die mikrobiologische Kohlendioxidproduktion

Natural or natural-state plant raw materials: Pellets /Chips / fibres from wood, flax, hemp, gras, etc.

Natürliche / naturbelassene pflanzliche Rohstoffe:

Pellets /Chips / Fasern aus Holz, Flachs, Hanf, Gras, etc.

Advantages (Vorteile)

Low Costs (niedrigere Kosten)

Carbon content (Kohlenstoffgehalt): 50-60%,

Disadvantages (Vorteile)

Undefined and varying chemical composition (Undefinierte und schwankende chemische Zusammensetzung)

Often high content in slowly degradable compounds such as lignin, especially in wood (oft hoher Gehalt an nur sehr langsam abbaubaren Polymeren wie Lignin, insbesondere in Holz)

Relatively high phosphate content (Relativ hoher Phosphatgehalt)

Biopolymeres for mikrobiological CO_2 production: utilization as ground substrate

Biopolymere als Substrat für die mikrobiologische Kohlendioxidproduktion für Einbau als Bodensubstrat

Different biopolymers can all be utilized as carbon source by bacteria but show different Carbon content, price and biodegradation kinetics

Unterschiedliche Biopolymere können alle als Kohlenstoffquelle durch Bakterien genutzt werden, haben aber unterschiedlichen Kohlenstoffgehalt, unterschiedlichen Preis und aber unterschiedliche biologische Abbauraten

Biodegradable plastics (Biologisch abbaubare Kunststoffe)

Polyhydroxyalkanoat (PHA), Polyhydroxybuttersäure (PHB), Polycaprolacton (PCL), Polybutylen Succinate (PBS) Polylactide (PLA)

Carbon content (Kohlenstoffgehalt): 50-60%,

Disadvantage (Nachteil): Costs (Kosten): starting from (ab) ca. 0,9€ /kg

Biodegradable long chain fatty acids/wax (Biol. abbaubare langkettige Fettsäuren/Wachse)

Palm stearine

Carbon content (Kohlenstoffgehalt): 75%, Costs (Kosten): ca. 0,3€ /kg

Disadvantage (Nachteil): very slow biodegradation (sehr langsame Biodegradation)

Cellulose fiber products (Cellulosefaserstoffe)

From wood, flax, hemp or gras (aus Holz, Flachs, Hanf oder Gras)

Portion (Anteil) Cellulose: 80-90%, Carbon content (Kohlenstoffgehalt): ca. 50%, Costs (Kosten): ca 0,6€ /kg

Starch (Stärke)

Sago balls (Sagokügelchen), insoluble (wasserunlöslich)

Carbon content (Kohlenstoffgehalt): 44%, costs (Kosten): ca 0,3€ /kg

Disadvantage (Nachteil): very fast degradation (sehr schnell abbaubar)

Other degradable composites (Andere abbaubare Verbundstoffe)

European Patent pending

Biopolymere als Kohlenstoffquellen für Bakterien: Nutzung in Biofiltern (Phosphat Absorption)

- **Carbon**
- Nitrogen
- Potassium
- Calcium
- Magnesium
- Phosphorus
- Sulfur

Also for bacteria in Biofilters Carbon is a limiting growth factor!

Auch für Bakterien in Biofiltern ist Kohlenstoff a limitierender Wachstumsfaktor!

- **Kohlenstoff**
- Stickstoff
- Kalium
- Calcium
- Magnesium
- Phosphor
- Schwefel

Ratio of chemical elements in dry mass of E. coli.
Verhältnis chemischer Elemente in E. coli.

Element	Fraction	Mass	Atomic Mass	Number of Atoms
O	0.65	6.5E-013	15.9994	2.4E+010
C	0.185	1.85E-013	12.0107	9.3E+009
H	0.095	9.5E-014	1.0079	5.7E+010
N	0.032	3.2E-014	14.0067	1.4E+009
Ca	0.015	1.5E-014	40.078	2.3E+008
P	0.01	1E-014	30.9738	1.9E+008
K	0.004	4E-015	39.0983	61608817
S	0.003	3E-015	32.065	56341806
Na	0.002	2E-015	22.9897	52388678
Cl	0.002	2E-015	35.453	33971737
Mg	0.001	1E-015	24.305	24776795
Total				9.3E+010

➟ Beside Hydrogen and Oxygen (both surplus in water), **Carbon is the most frequent and essential Element** also in bacterial biomass !

➟ **Kohlenstoff** ist neben Wasserstoff und Sauerstoff (im Überschuss als Wasser vorhanden) **das mit Abstand häufigste und absolut notwendige Element auch** in der bakteriellen Biomasse !

Kohlenstoffquellen als Substrat für Mikroorganismen in Biofiltern (Phosphat adsorption)

Different from sewage water, Carbon (and required trace elements) are limiting factors for the growth and metabolism of microorgansms in biofilters in oligo/mesotropic ponds!

Anders als in Abwässern, sind Kohlenstoff (und Spurenelemente) limitierende Faktoren für das Wachstum von Mikroorganismen in Biofiltern in oligo/mesotrophen Schwimmteichen!

Kohlenstoffquellen als Substrat für Mikroorganismen in Biofiltern (Phosphat adsorption)

Limestone or other carbonate-rich stones

Kalkstein oder andere kalkreiche Gesteine

Advantages **(Vorteile)**

Very Low Costs (sehr niedrigere Kosten)

Disadvantages (Nachteile)

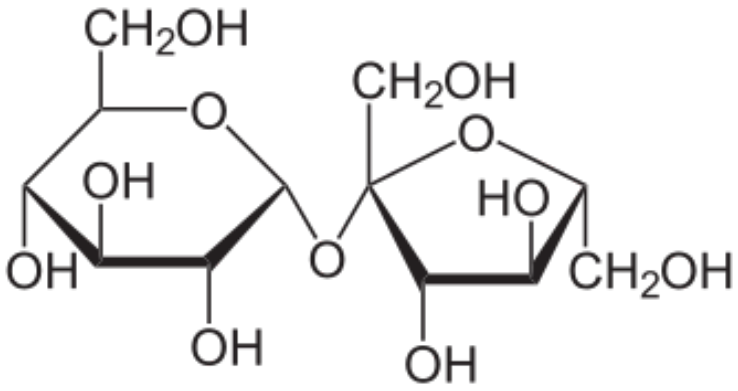
Increases pH (erhöht den pH-Wert)

Therefore less suitable for ponds with submerged plants (Daher weniger geeignet für Teiche mit Unterwasserpflanzen)

No utilization by Biofilm-forming bacteria! (Keine Kohlenstoffquelle für Biofilm-bildende Bakterien)

Potential carbon sources for microbes in biofilters?

Potentielle Kohlenstoffquellen für Mikroorganismen in Biofiltern?



Addition of Saccharose into the swimming pond as Carbon source for biofilters?

Zugabe von Rohrzucker in den Schwimmteich als Kohlenstoffquelle für Biofilter?

Increases growth of bacteria and biofilms in all areas of the swimming pond

Verstärkt das Wachstum von Bakterien und Biofilmen in allen Bereichen des Schwimmteiches

No perfect solution!

Daher keine perfekte Lösung!

Biopolymeres as carbon source for bacteria: utilization in biofilters (Phospate absorption)

Biopolymere als Kohlenstoffquellen für Bakterien: Nutzung in Biofiltern (Phosphat Absorption)

Direct carbon and micronutrient supply for microorganisms from biodegradable plastic bodies enriched with required trace elements?

Direkte Versorgung von Mikroorganismen in Biofiltern mit Kohlenstoff und Spurenelementen über Füllkörper aus biodegradablen Kunststoffen angereichert mit Spurenelementen?

Or from cost-effective composite materials based on biodegradable plastics and cellulose-rich fibers as filling material?

Oder Verwendung von relativ kostengünstigen Composite-Füllkörpern aus biodegradablen Kunststoffen und Cellulose-Fasern?

Biodegradable plastics
(Biologisch abbaubare Kunststoffe)

Cellulose fiber products
(Cellulosefaserstoffe)

Other degradable composites
(Andere abbaubare Verbundstoffe)

European Patent pending

Zusammenfassung

Summary

- Für submerse Pflanzen ist Kohlenstoff ist mengenmässig der wichtigste zuzuführende Nährstoff, emerse Pflanzen und Pflanzen mit Schwimmblättern erhalten ausreichend Kohlenstoff über die Luft.
- For sumerged plants Carbon is the quantitatively most important nutrient to be supplied, emerse plants obtain sufficient Carbon via atmospheric air.

- Voraussetzung für ein üppiges Wachstum von Unterwasserpflanzen ist eine ausreichend hohe CO_2-Konzentration im Wasser. Im Gegensatz zu vielen natürlichen Gewässern fehlt in Schwimmteichen der Zufluss CO_2-reichen Grundwassers und ausreichend mikrobielle Freisetzung von CO_2 aus organischen Sedimenten.
- A sufficiently high CO_2-concentration in the water is required for lush grow of submerged plants. In contrast to many natural water bodies there is no inflow in CO_2-rich ground waters and sufficient microbiological release of CO_2 from organic sediments.

Zusammenfassung

Summary

- Eine Erhöhung der Karbonathärte führt nur zu sehr begrenzter Wachstumsförderung von Unterwasserpflanzen, da die Verwertung von HCO_3^- viel zusätzliche Energie erfordert.
- An increase in carbonate hardness leads to very limited stimulation of submerged plant growth, since utilization of HCO_3^- does require a substantial amount of additional energy.

- Lösliche organische Kohlenstoffverbindungen wie Rohrzucker können als Kohlenstoff- und Energielieferanten für Unterwasserpflanzen dienen, fördern aber in starkem Masse die Vermehrung von Bakterien (Erhöhung der Keimzahl!) und die unerwünschte Bildung von Biofilmen auf allen Oberflächen einschließlich des Schwimmbereiches.
- Soluble organic carbon compounds such as Saccharose can provide Carbon and energy to submerged plants, however, they particularly support propagation of bacteria and undesired formation of biofilms on all surfaces including the pool area.

BIOPOND

Zusammenfassung I

Summary II

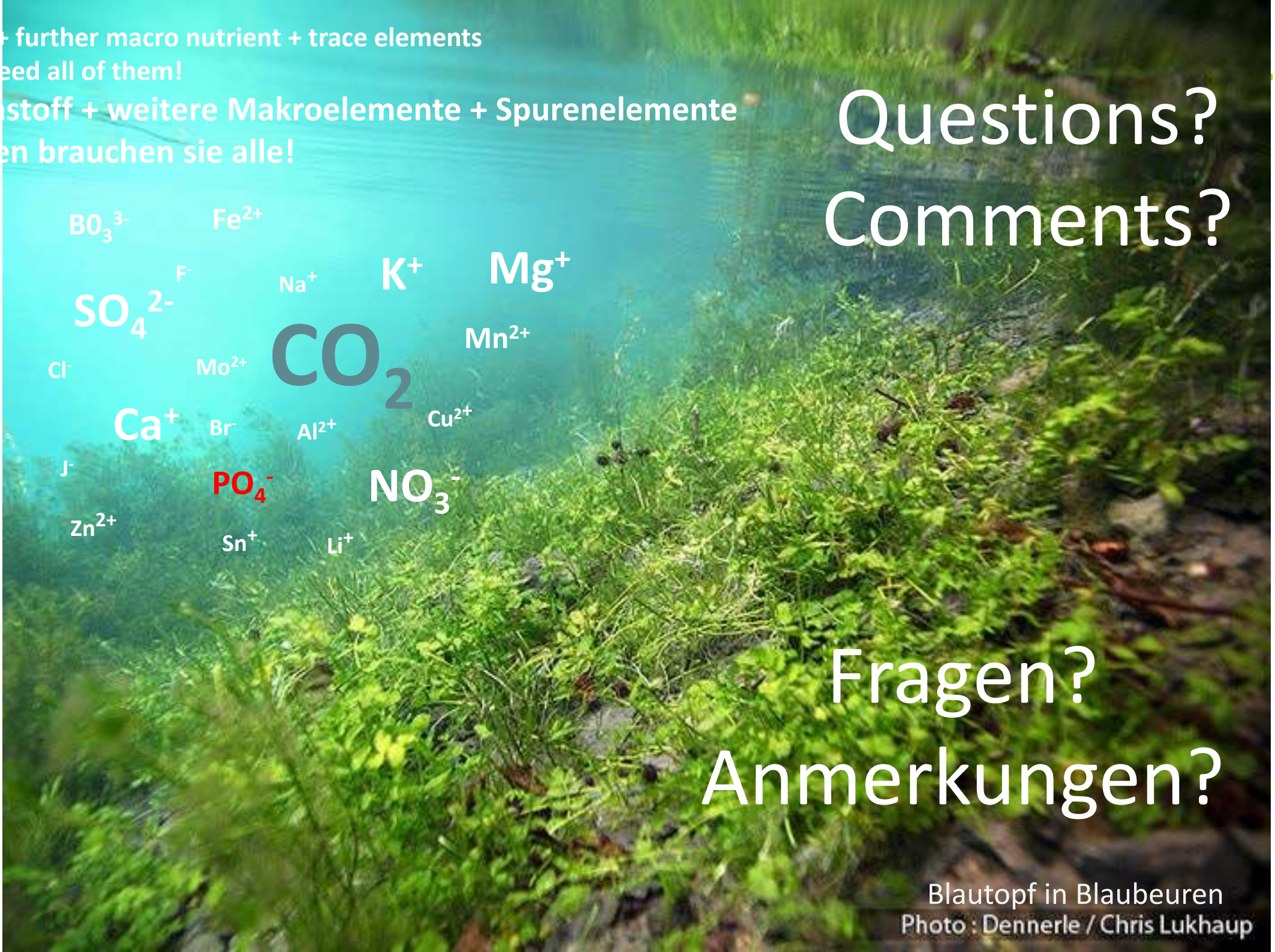
- Existierende Konzepte zur CO_2-Düngung über Bodenluft sind ineffizient.
- Existing concepts for CO_2-Supply via ground air are inefficient.
- Teichdüngung mit CO_2 aus Druckflaschen führt zu üppigem Wachstum von Unterwasserpflanzen, Begasung des kompletten Schwimmteiches ist jedoch nicht wirtschaftlich durchführbar.
- CO_2-supply from gas cylinders leads to lush growth of submerged plants, however supply of the whole water body is economically not feasible.
- Nutzung natürlicher CO_2-Quellen im Schwimmteich aus Bodenatmung und mikrobieller Umsetzung von Sedimenten im Bodengrund durch Optimierung der Bodengrunddurchströmung mindert den Bedarf für externe CO_2-Ergänzung merklich.
- Utilization of natural CO_2-sources in the swimming pond (plant respiration in the ground substrate and microbial assimilation from organic ground substrates with optimized guided substrate flow substatantially limits the need for external CO_2-supply.

Zusammenfassung I

Summary II

- (Partielle) bauliche Separierung des mit Unterwasserpflanzen besetzten Tiefwasserbereiches kann den externen CO_2-Bedarf weiter massiv senken, möglicherweise ist solchen optimierten Schwimmteichen nach den ersten Jahren keine zusätzliche Kohlenstoffdüngung mehr nötig.
- Construction of partial separation of the underwater area with submerged plants can further massively decrease the need for external CO_2-supply. This may lead to optimized swimming ponds that after the first years will not require external CO_2-supply.

- Unlösliche biodegradable Verbundstoffe aus Kohlenstoffverbindungen können möglicherweise als Bodensubstrat oder als Filtersubstrat in für eine verbesserte Kohlenstoffversorgung von Unterwasserpflanzen und Mikroorganismen in Biofiltern (verbesserte Phosphatabsorption) Verwendung finden.
- Unsoluble biodegardable composites that contain Carbon compounds may be utilized as ground substrate and filter substrate for improved carbon supply of submerged plants and microorganisms in biofilters (improved phosphate adorption).


+ further macro nutrient + trace elements
eed all of them!
stoff + weitere Makroelemente + Spurenelemente
en brauchen sie alle!
BO_3^{3-}
Fe^{2+}
F^-
Na^+
K^+
Mg^+
SO_4^{2-}
CO_2
Mn^{2+}
Cl^-
Mo^{2+}
Ca^+
Br^-
Al^{2+}
Cu^{2+}
J^-
PO_4^-
NO_3^-
Zn^{2+}
Sn^+
Li^+
Questions?
Comments?
Fragen?
Anmerkungen?
Blautopf in Blaubeuren
Photo : Dennerle / Chris Lukhaup