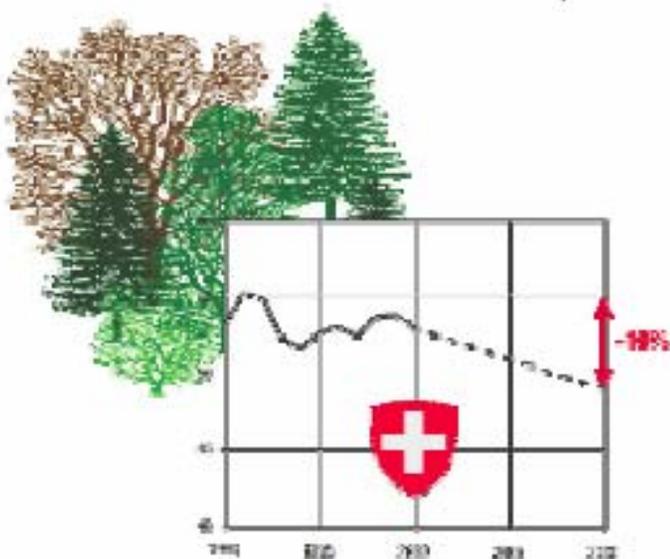


C-Flüsse / (-Pools) in Ökosystemen aus experimenteller Sicht

R. Siegwolf

Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen-PSI

Chancen und Risiken
biologischer Kohlenstoffsenken
Was und wie viel wissen wir?



CO₂-Konzentration in der Vergangenheit

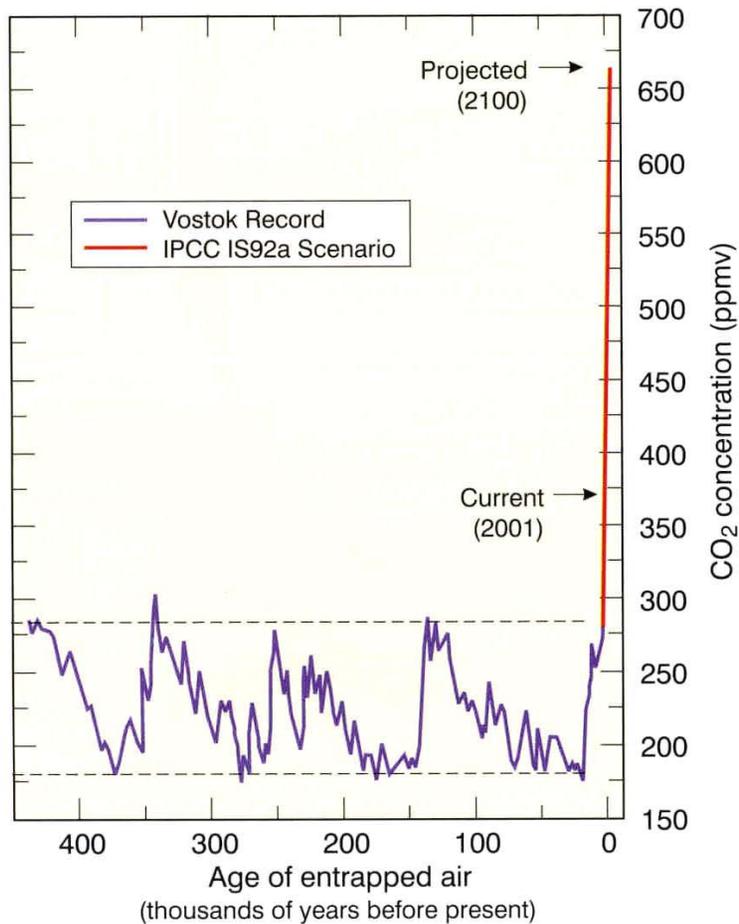
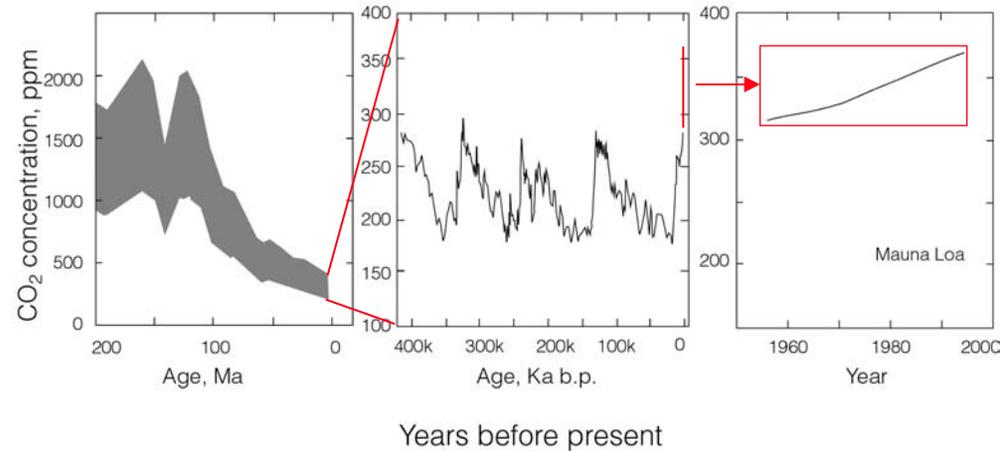
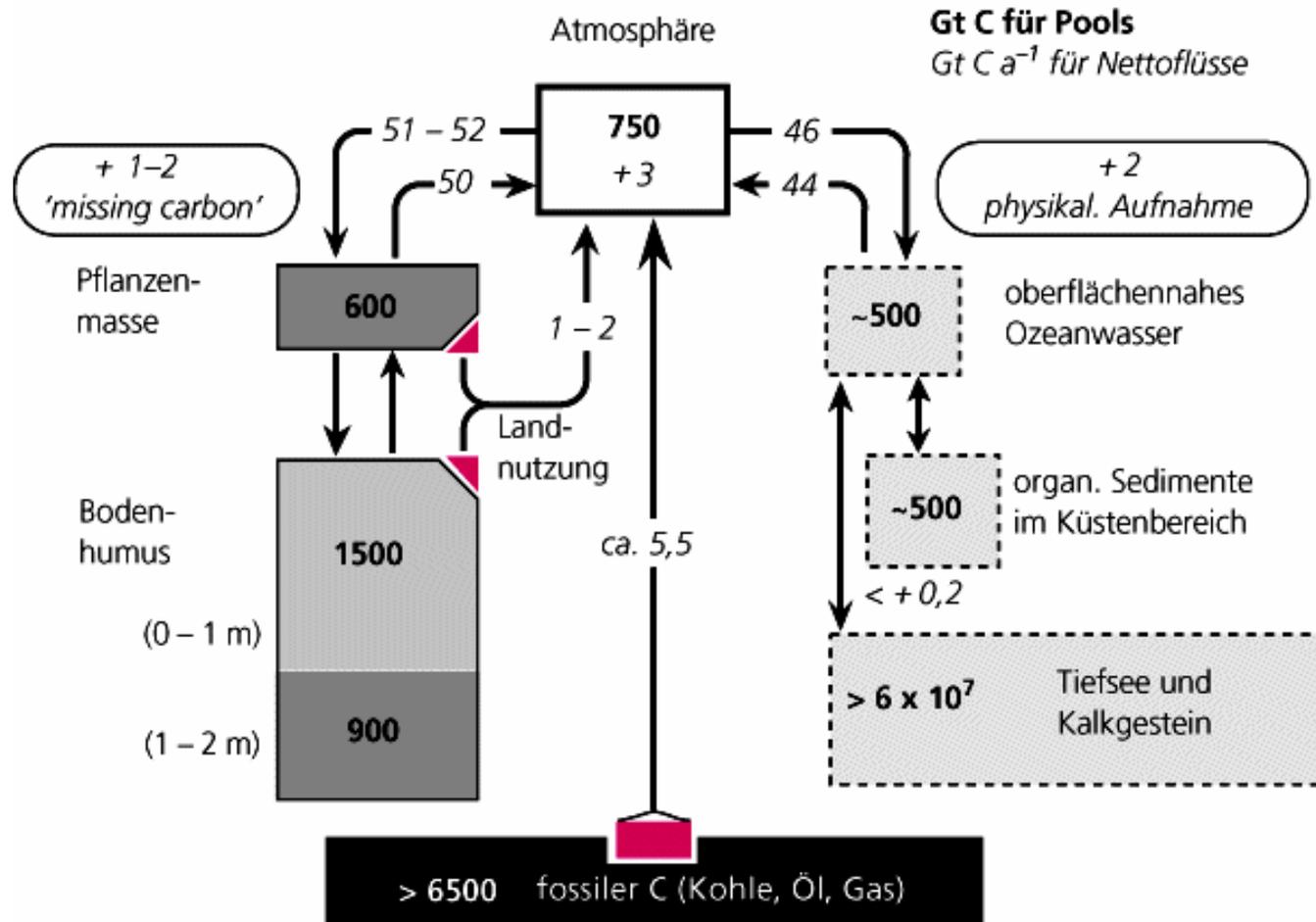


Figure 1. The Vostok ice-core record for atmospheric CO₂ concentration from Petit et al. (1999) and the “business as usual” prediction used in the IPCC Third Assessment (Prentice et al. 2001). The current concentration of atmospheric CO₂ is also indicated.

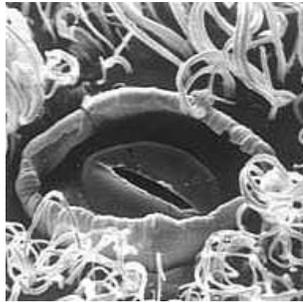


C-Flüsse und C-Vorräte



Größenordnungen der CO₂ und H₂O Flüsse Für verschiedene Maßstäbe

Scale



Gas

Global

0.52 Gt Tag⁻¹

0.52*10⁹t d⁻¹

H₂O

36 µg Tag⁻¹

42 g Tag⁻¹

120 kgTag⁻¹

28'500 ktTag⁻¹

100 Gt Tag⁻¹

36*10⁻¹²t d⁻¹

42*10⁻⁶t d⁻¹

120*10⁻³t d⁻¹

2,9*10⁷t d⁻¹

100*10⁹t d⁻¹

Möglichkeiten zur Erfassung der Kohlenstoffflüsse

Abschätzung der Biomassenänderung

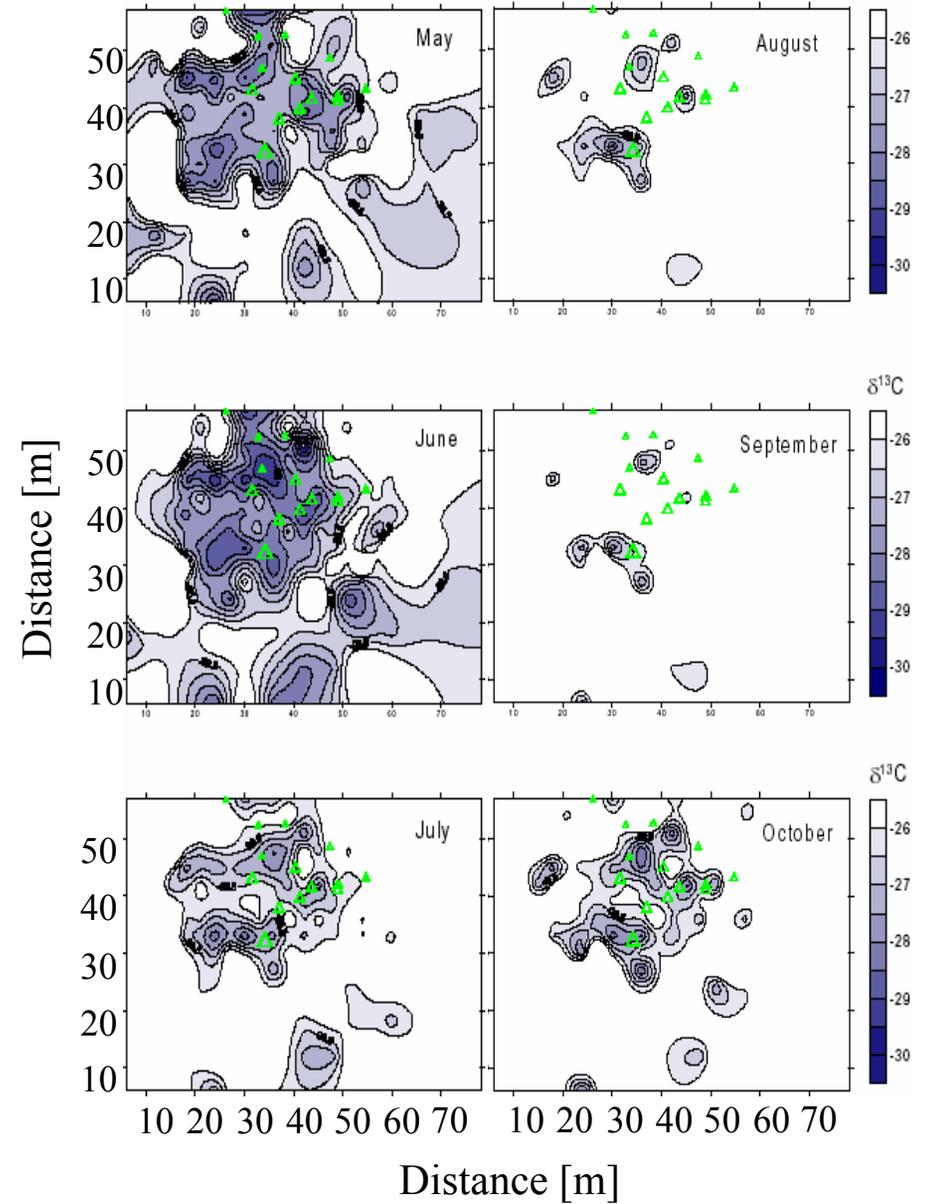
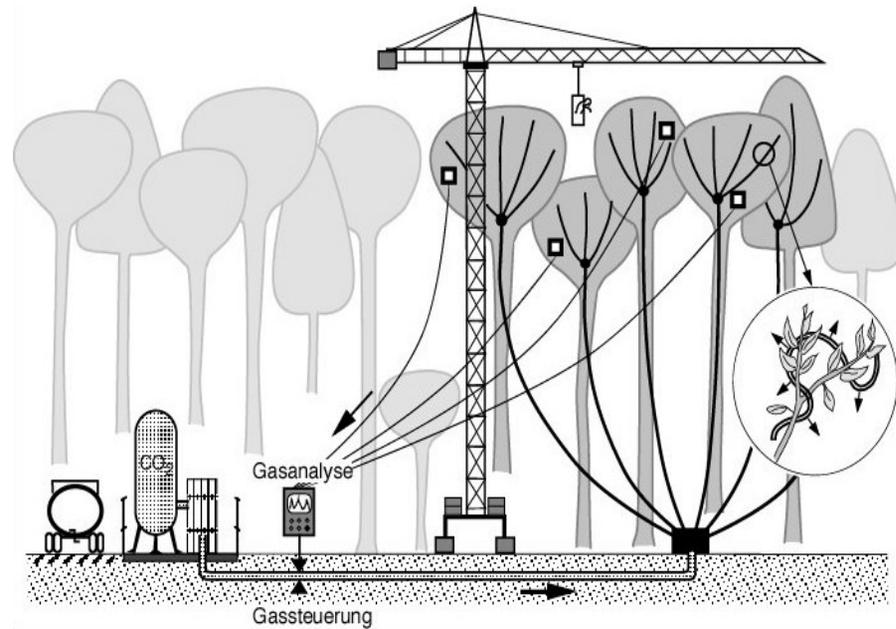
Biomassenvorrat oberirdisch

C-Vorrat im Boden

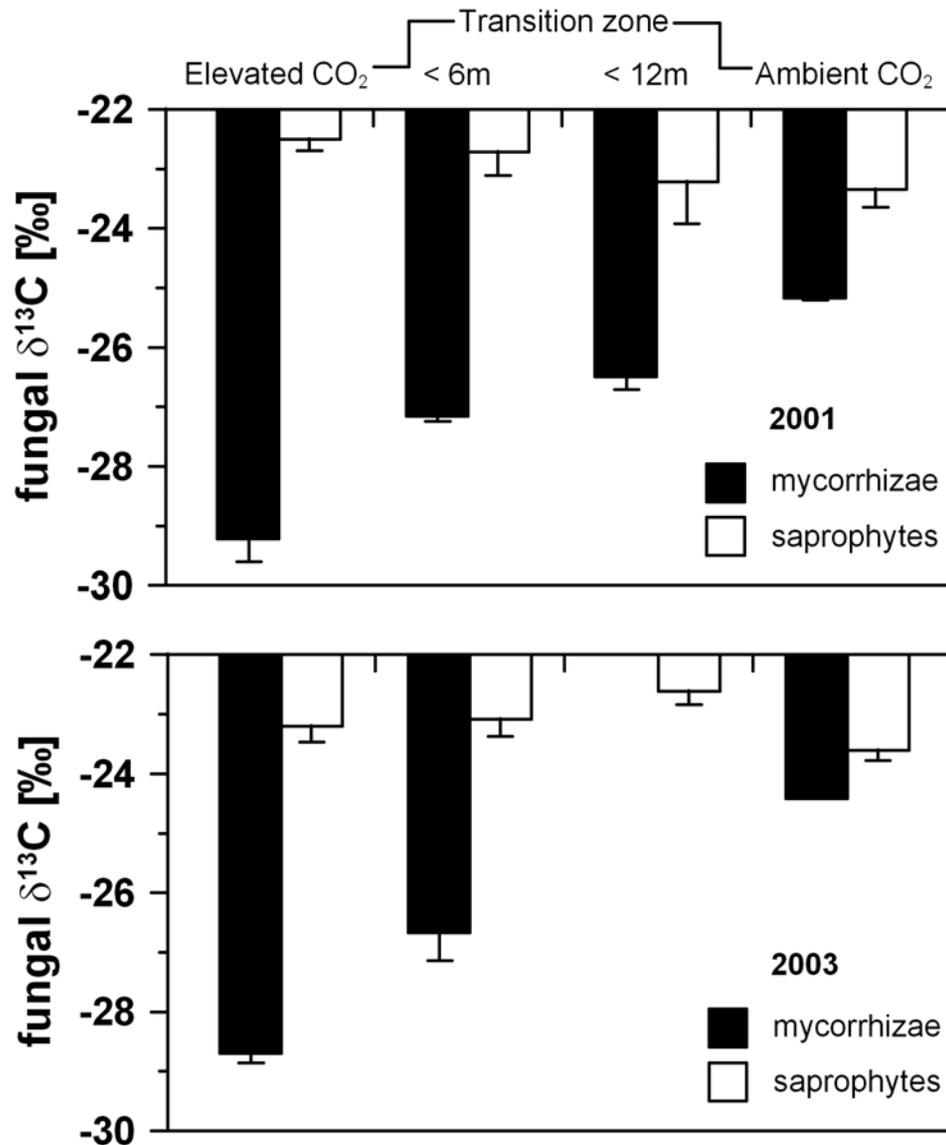
Abschätzung der Änderung des C-Vorrates im Boden



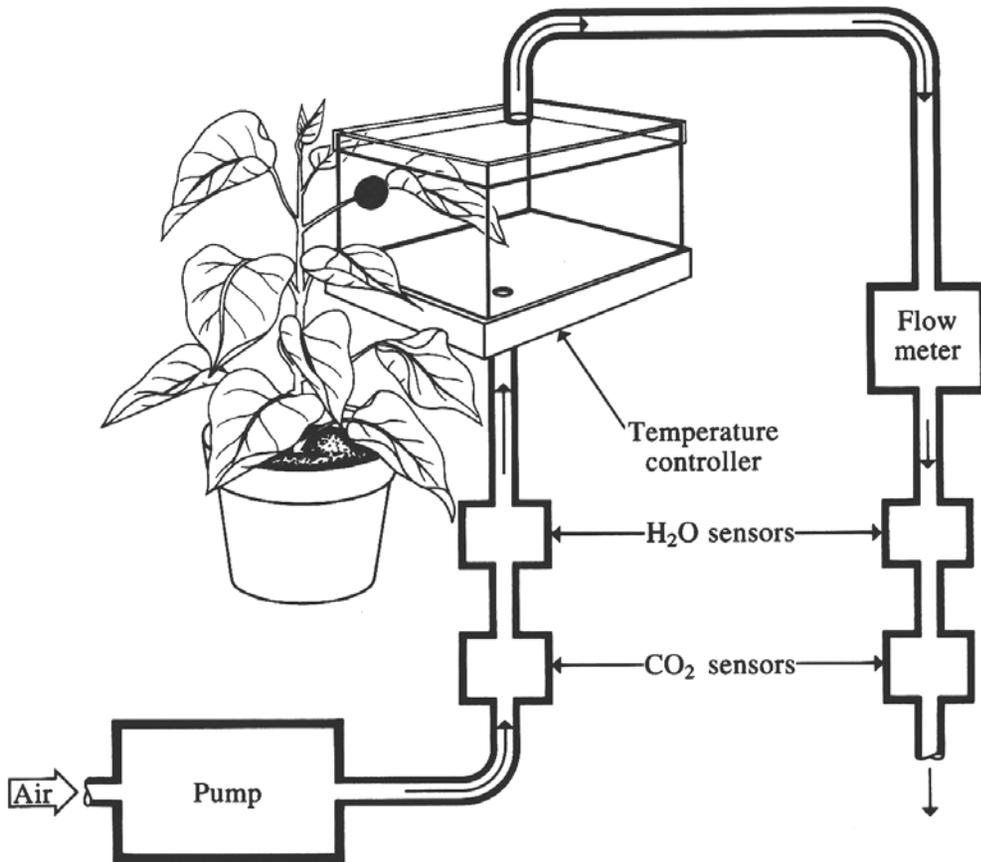
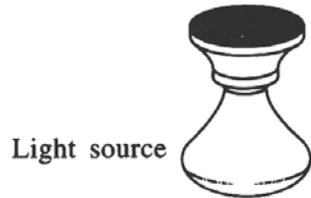
Räumliche und zeitliche Verteilung der $\delta^{13}\text{C}$ im Boden- CO_2



Kontrast zwischen Mycorrhiza und Saprophyten im $\delta^{13}\text{C}$ Signal



Messung und Berechnung des CO₂-Flusses



Die Flussberechnungen basieren auf dem Fick'schen Diffusionsgesetz

$$\frac{dm}{dt} = -D * A * \frac{dC}{dx}$$

vereinfacht

$$J = \frac{\Delta C}{\Sigma r} = \Delta C * g_l$$

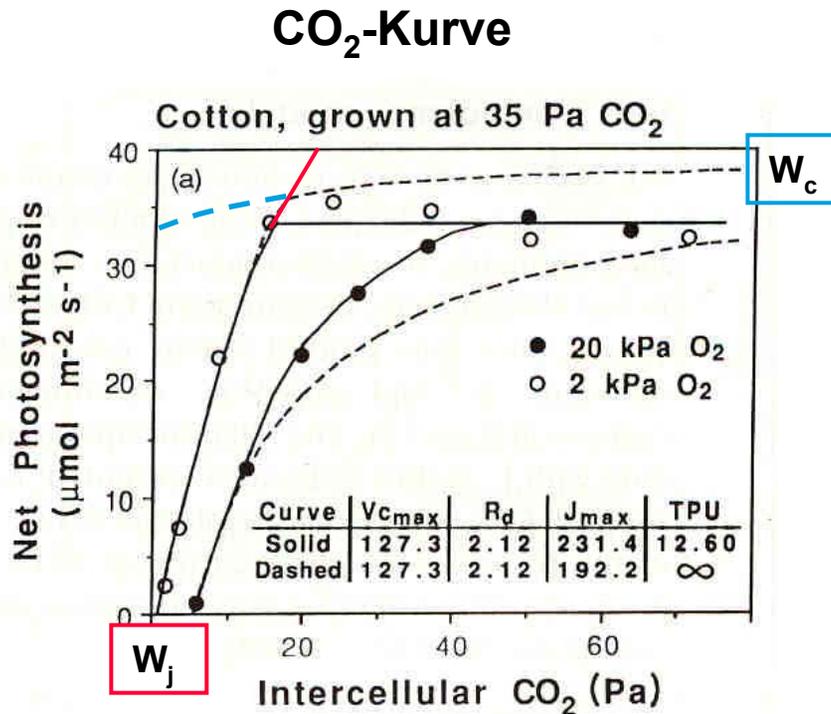
Messung und erste Modellierung der Netto- CO₂-Assimilation

Treibende Grössen
der CO₂-Aufnahme

CO₂-Angebot,
Licht,
Temperatur
Luftfeuchte

$$A_N = f (C, I, T, F)$$

Abhängigkeitskurven (Response curves)



$$W_c = \frac{V_{C_{\max}} \cdot C_i}{C_i + K_c(1 + O/K_o)}$$

$$W_j = \frac{J \cdot C_i}{4(C_i + O/\tau)}$$

W_c ... Karboxilierungsrate limitiert durch Rubisco (Quantität, Aktivierung, Kinetik)

W_j ... Karboxilierungsrate limitiert durch Rubisco Regeneration (CC)

V_{cmax} ... max. Karboxilierungsrate

K_c, K_o ... Michaelis-Menten Konst.

C_i, O ... CO₂, O₂ Partialdruck

J ... Elektronen-Transportrate

τ ... Spezifität der Rubisco bez. CO₂, O₂

Lichtabhängigkeit

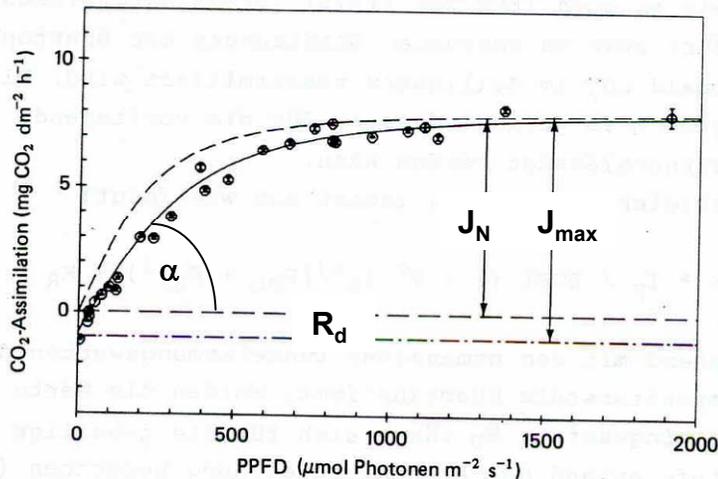
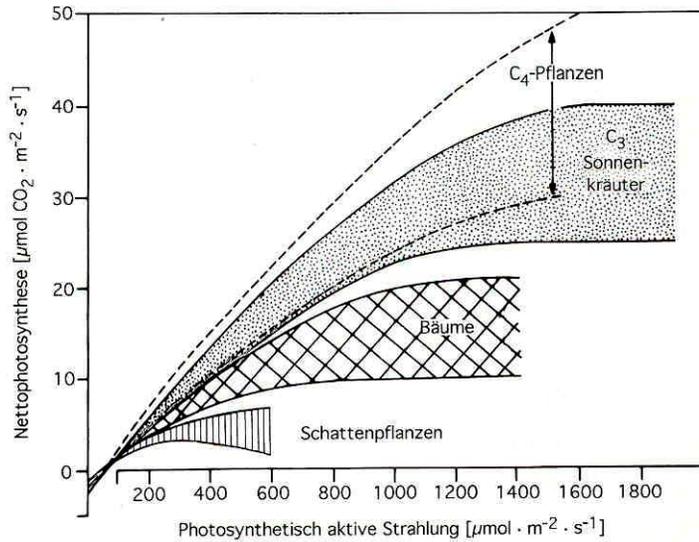
Die grosse Bandbreite ist Spezies spezifisch, entsprechend werden die Parameter J_{\max} , R_d und α angepasst.

Für den Elektronentransport

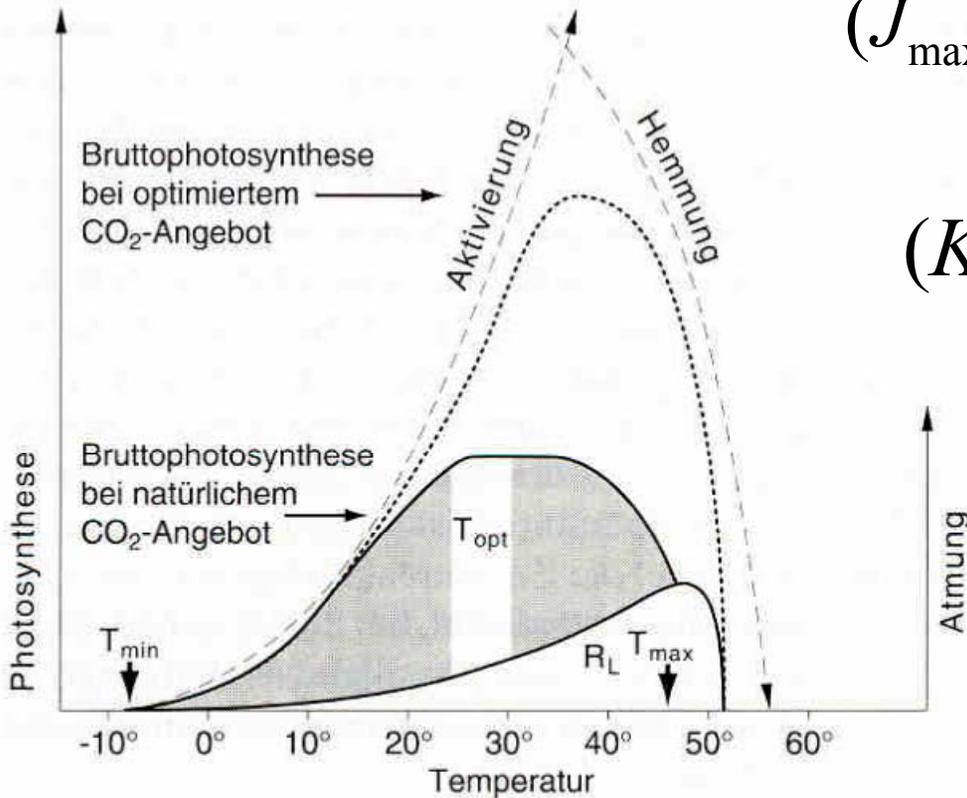
$$J = \frac{\alpha \cdot I}{\sqrt{2 \left(1 + \frac{\alpha^2 \cdot I^2}{J_{\max}^2} \right)}}$$

Für den Netto-CO₂-Gaswechsel

$$J_N = \frac{\alpha \cdot I}{\sqrt{2 \left(1 + \frac{\alpha^2 \cdot I^2}{J_{\max}^2} \right)}} - R_d$$



Temperaturabhängigkeitskurve



$$(J_{\max}, V_{C \max}) = \frac{e^{(c - \Delta H_a / R \cdot T_K)}}{1 + e^{(\Delta S \cdot T_K - \Delta H_d) / (R \cdot T_K)}}$$

$$(K_c, K_o, R_d, \tau) = e^{(c - \Delta H_a / R \cdot T_K)}$$

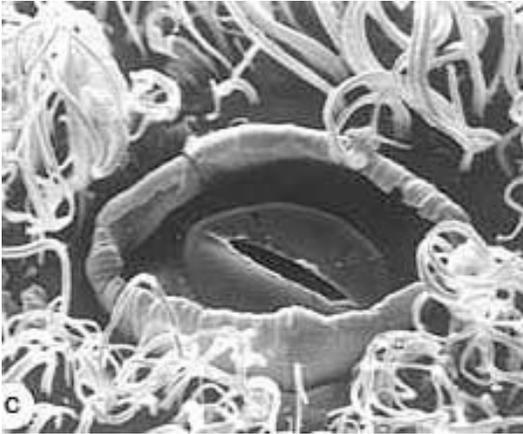
- $\Delta H_a, \Delta H_d$... Aktivierungs- Deaktivierungs-Energie (k J mol⁻¹)
- ΔS ... Entropie Term (k J K⁻¹ mol⁻¹)
- T_k ... Temperatur (Kelvin)
- R ... Gaskonst. (0.00831 k J K⁻¹ mol⁻¹)
- c ... Skalierungsparameter

Berechnungsablauf

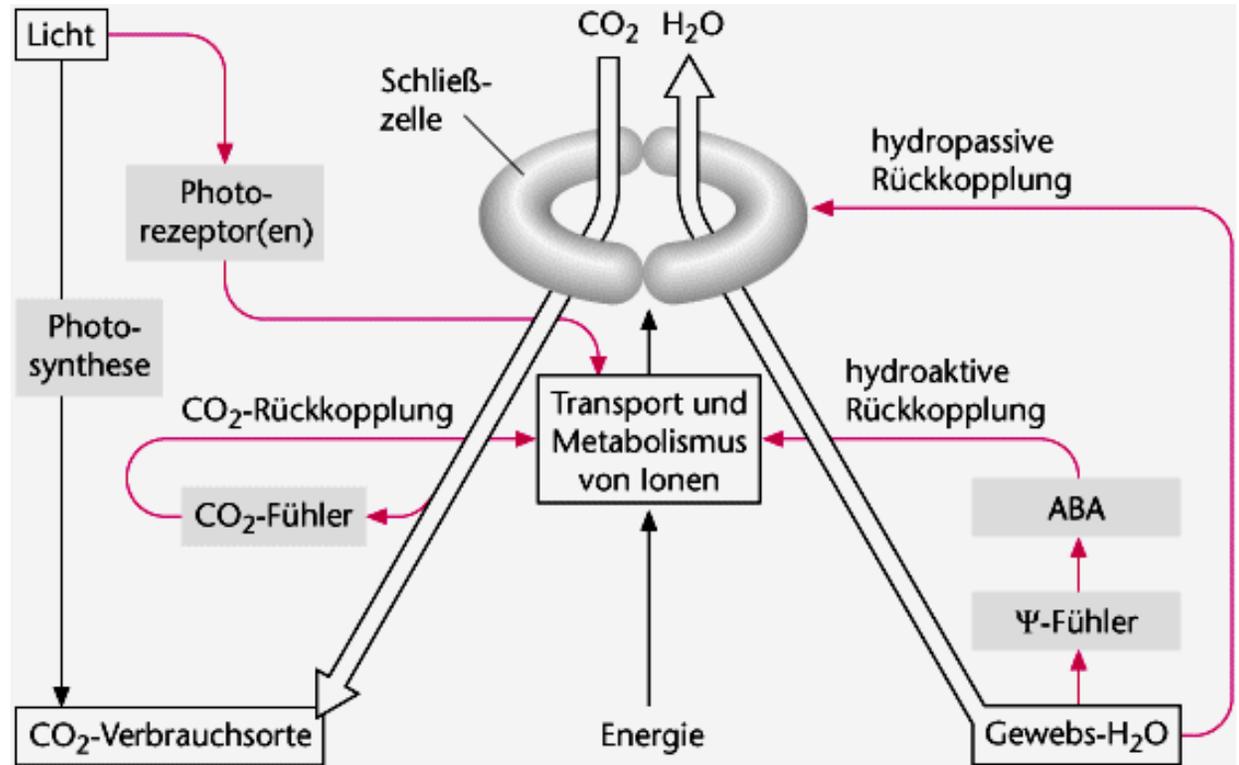
1. Bestimmung von J_{\max} , $V_{C\max}$, K_c , K_o , R_d und τ für die aktuelle **Temperatur**
2. Berechnung von J für eine die aktuelle **Lichtintensität**
3. Ermitteln von W_j (Verwendung von J), für die aktuelle **CO₂-Konzentration**
4. Berechnung von W_c unter Verwendung der oben ermittelten Parameter
5. Berechnung der **Netto-CO₂-Assimilation** mit folgender Gleichung

$$A_N = \left(1 - \frac{1/2 \cdot [O_2]}{\tau \cdot C_i} \right) \cdot \min\{W_c, W_j\} - R_d$$

Kontrollmechanismen der Stomata



Schliessende Spaltöffnung auf der Unterseite des Blattes.
Längsdurchmesser: 10 - 15 μm



Feuchte - Abhängigkeit

Dazu dient die folgende empirische Funktion

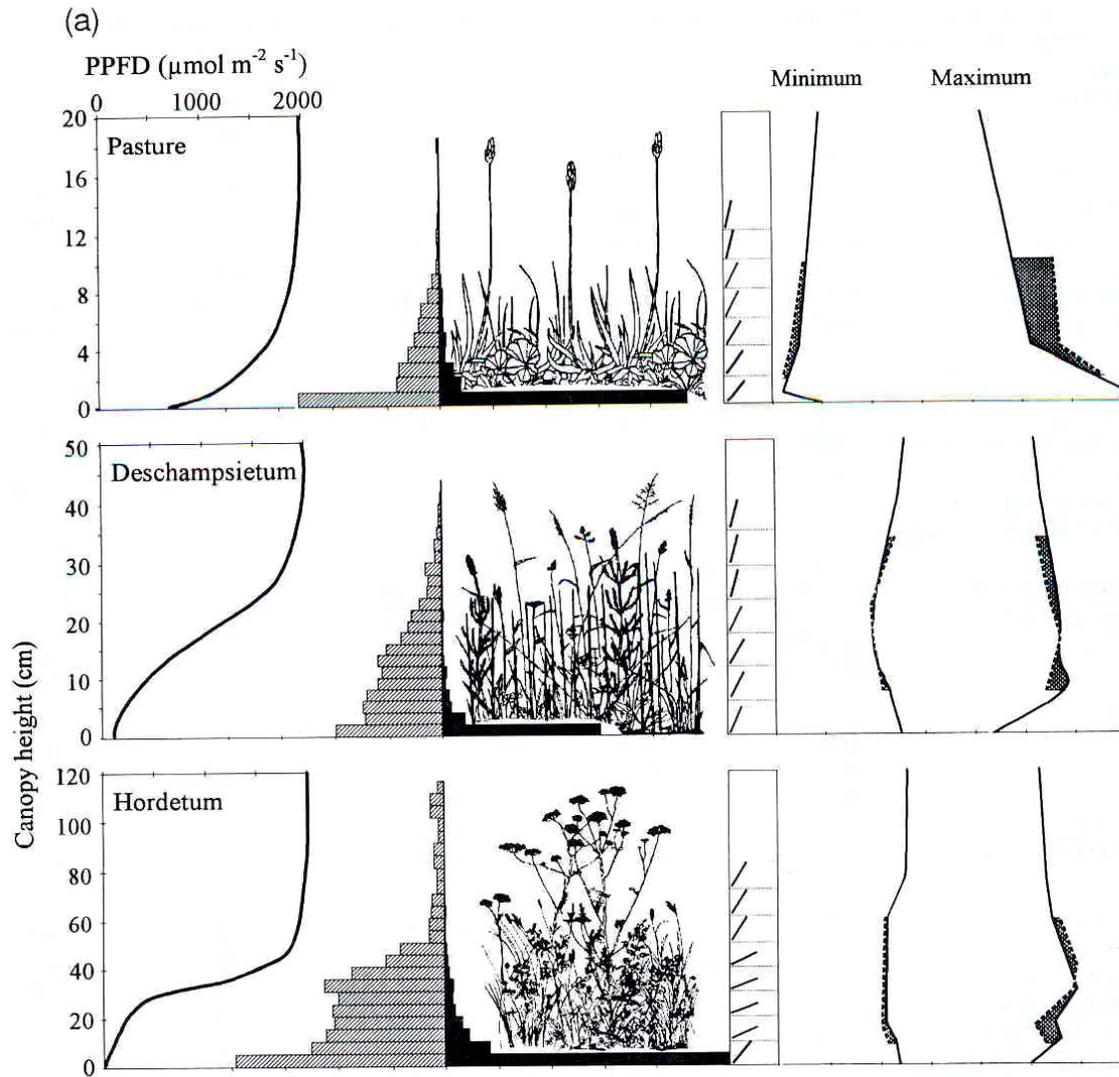
$$g_s = g_0 + g_l \cdot A_N \cdot RH / C_a$$

Wobei

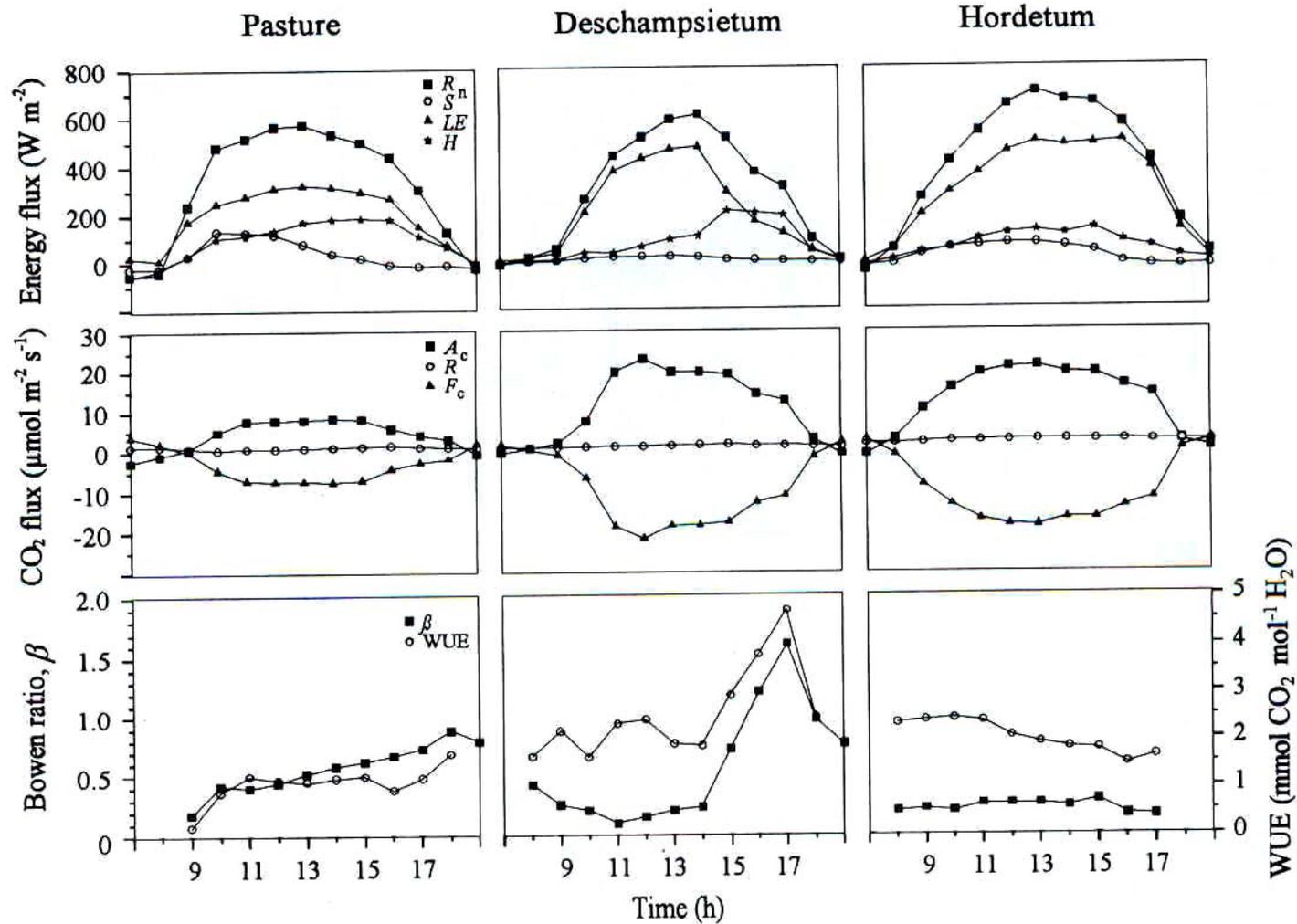
$$C_i = C_a - A \cdot 1.6 / g_s$$

Iterative Lösung, dh. keine analytische Lösung

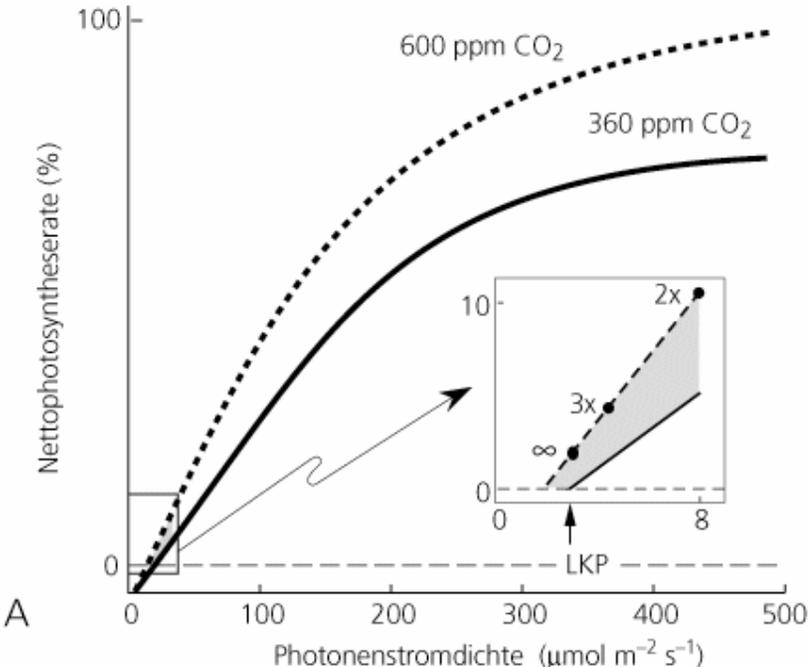
Extrapolation auf Pflanzenbestände



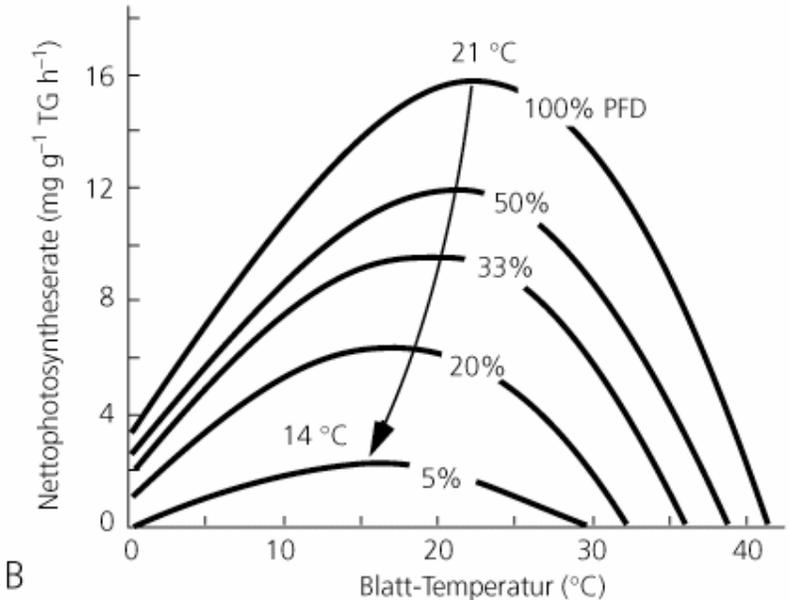
Simulation der Bestandesphotosynthese



Nichtlineare Zusammenhänge



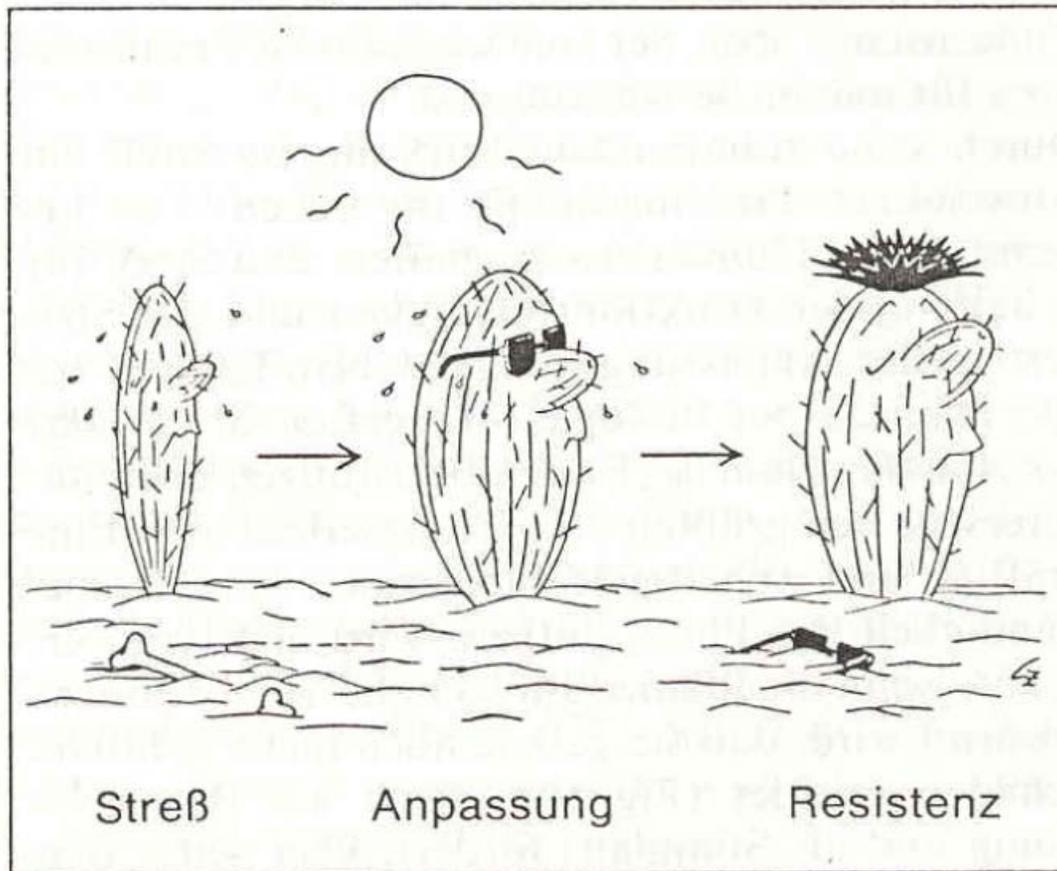
A



B

Wie weit entsprechen solche Hochrechnungen der Realität?

Wie erfassen wir z.B. Anpassungsmechanismen?



Temperatur-Bandbreiten

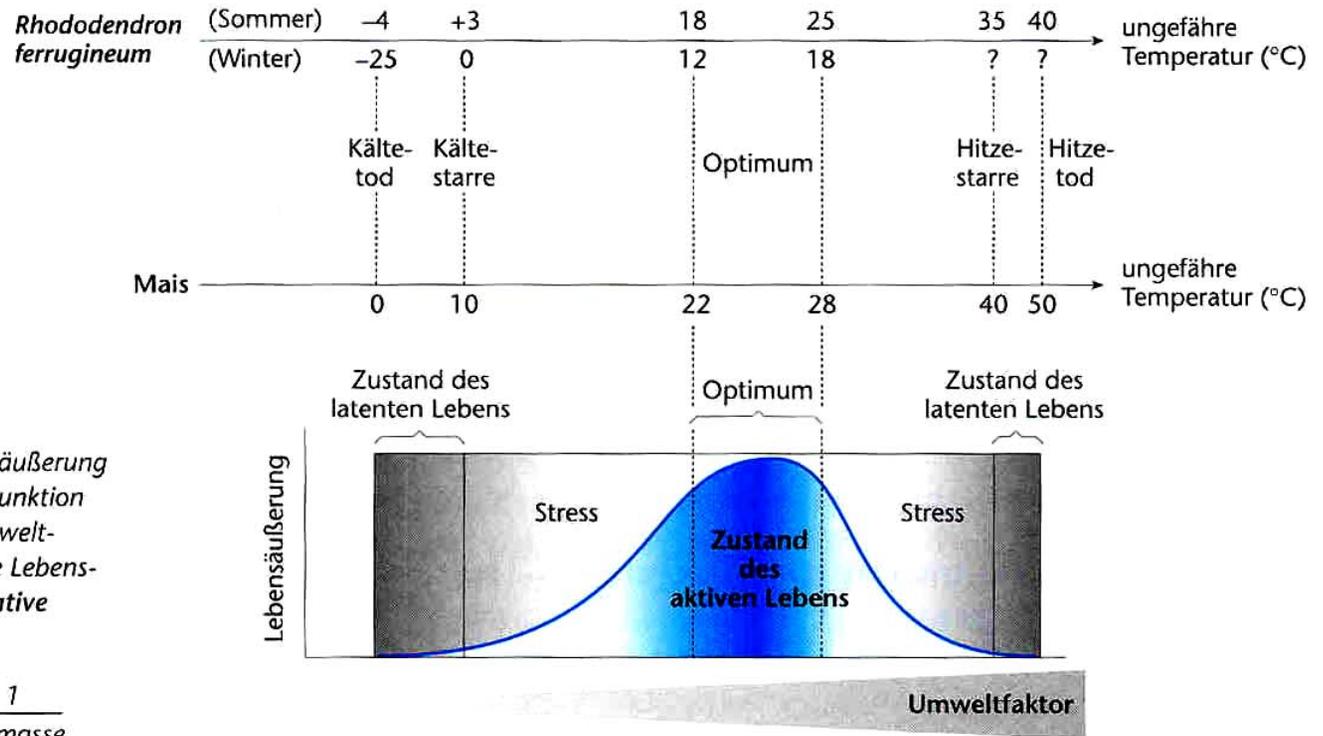


Abb. 1.1.3: Die Lebensäußerung eines Organismus als Funktion eines (abiotischen) Umweltfaktors. Als Maß für die Lebensäußerung kann die **relative Wachsrate R** dienen:

$$R = \frac{\Delta \text{Biomasse}}{\Delta t} \times \frac{1}{\text{Biomasse}}$$

Saisonaler Verlauf der Kältetoleranz

QuickTime™ and a
Photo - JPEG decompressor
are needed to see this picture.

Anpassung an hohe Temperaturen

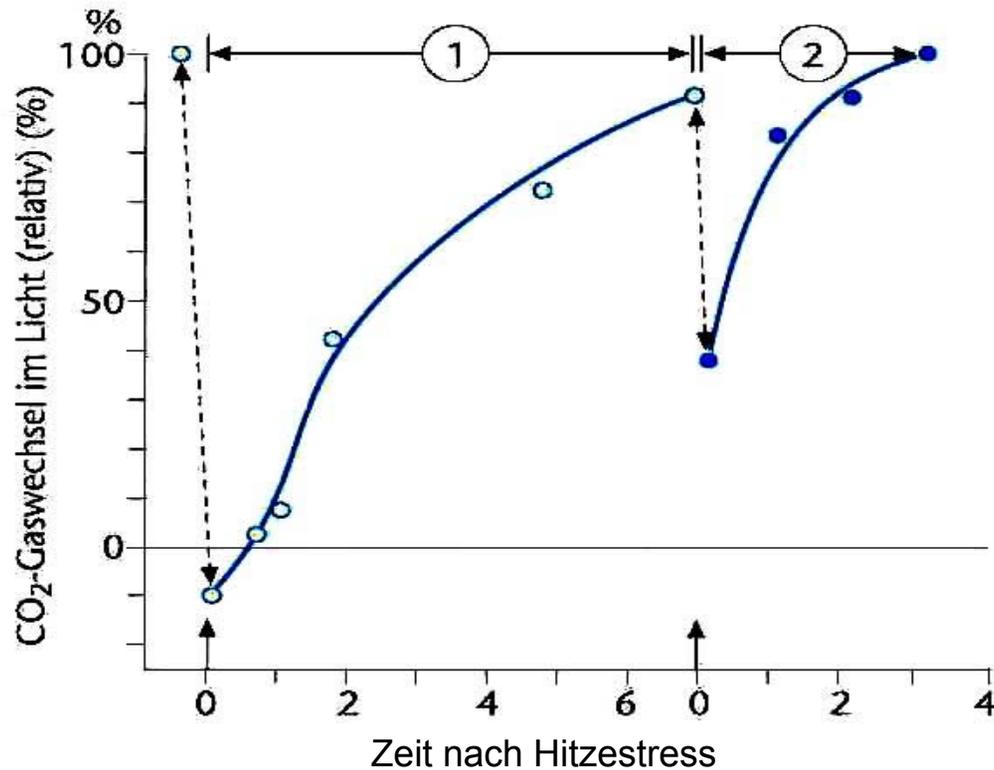
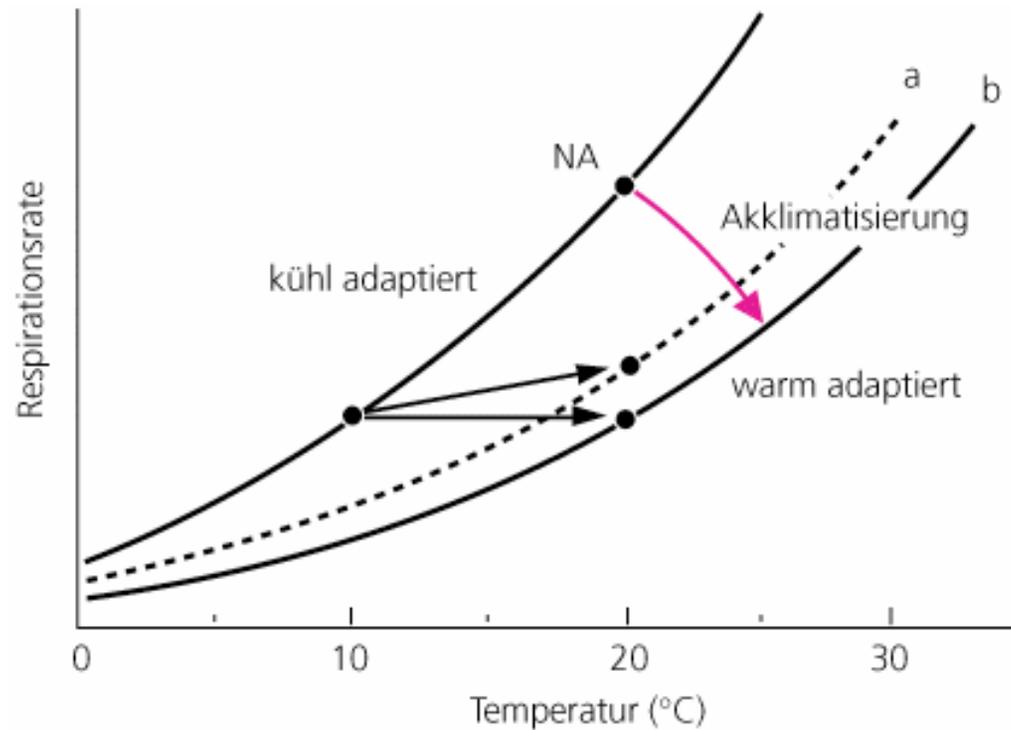
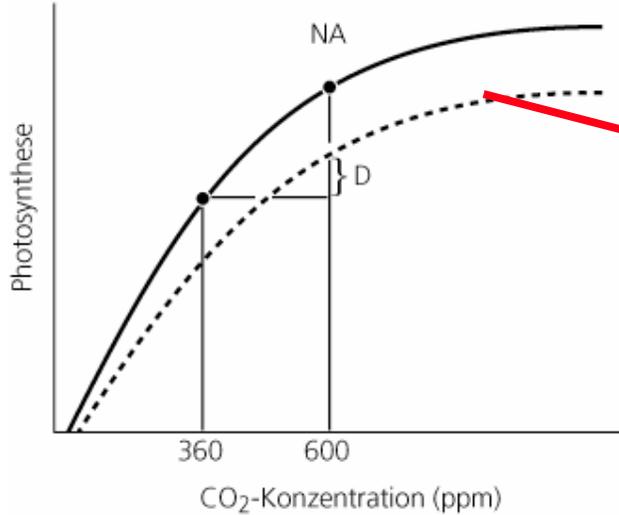


Abb. 1.3.10: Abhärtung von Tannennadeln nach einer Hitzestressbehandlung. Schädigung und Abhärtung wurden an der Photosyntheseleistung der Nadeln verfolgt. 1: Erholungsphase nach erstmaliger, 2: nach zweiter Hitzestressbehandlung (44 °C, 30 min). Ausmaß der Schädigung und Erholungsphase (Reparatur) sind bei der zweiten Stressbehandlung deutlich geringer als beim ersten Hitzepuls. Aus Larcher (1987).

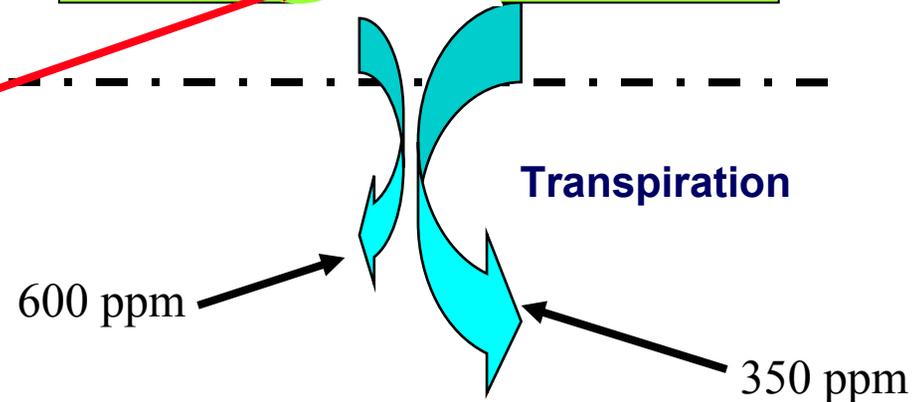
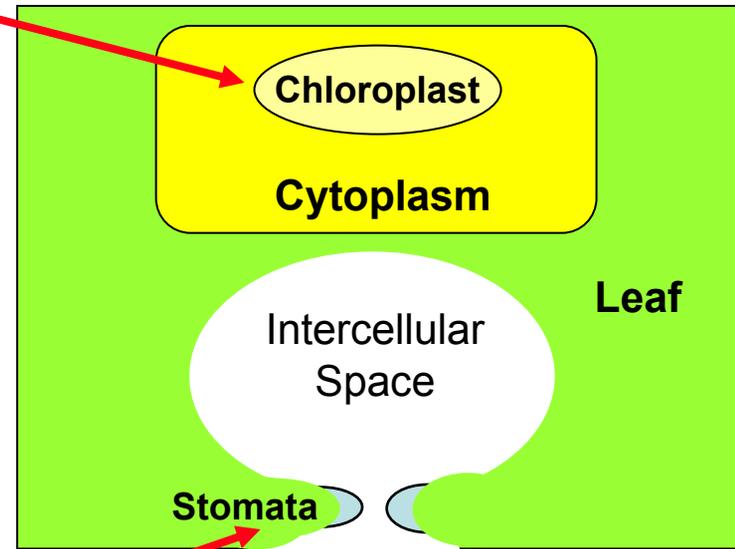
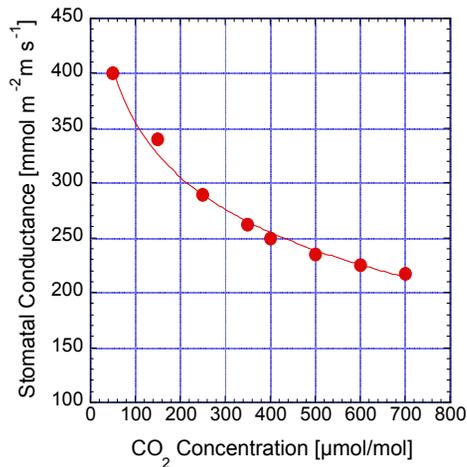
Aklimatisierung der Respiration



Anpassung an erhöhte CO₂ Konzentration

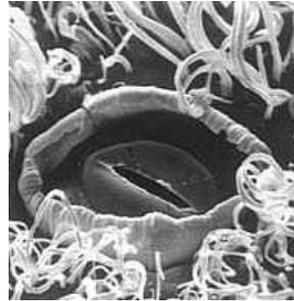
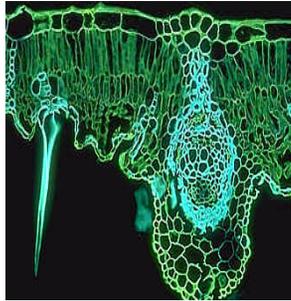


CO₂-Response Curve of Stomatal Conductance



Unterschiedliche Anpassungsmuster der Pflanzen auf verschiedenen Ebenen z.B auf erhöhte [CO₂]

Scale



**Pro-
cess
Level**

Biochemistry

Physiology

Morphology

Canopy

Ecosystem

**Res-
ponse**

**Reduction of
the Rubisco
activity**

**Stomatal
Closure**

**Reduction of
the stomatal
density??**

**Reduction of
leave density**

**Nutrients
limitation**

Standort

(Gegebenheiten im Gelände)

Klima

Strahlung, Lufttemperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Nebel, Wind, Blitz etc.

Relief

Hangrichtung und -neigung, Lage zur Umgebung, Tal, Kuppe u. ä.

Boden

Typ, Körnung, Struktur, Feuchtigkeit, Grundwasser, Temperatur, pH-Wert, chem. Zusammensetzung, Humus, geolog. Ausgangsmaterial, Strahlungsreflexion etc.

Biotische Faktoren

andere Pflanzen, Tiere über und im Boden, Mikroorganismen, Einwirkungen des Menschen etc.

Umwelt

(unmittelbar wirkende Faktoren)

Licht

als Energiequelle der CO₂-Assimilation und als Signal

Wärme

als Energiequelle für Prozesse

Wasser

Wasserpotential der Luft und des Substrats

Chemische Faktoren

CO₂-Konzentration, pH-Wert, Nährstoffe (v.a. N u. P) Spurenelemente, Salzkonzentration etc.

Störungen und Stress

Klimaextreme, Feuer, Verbiss, mechan. Belastung durch Schnee, Wind, Schutt, Raumeinengung

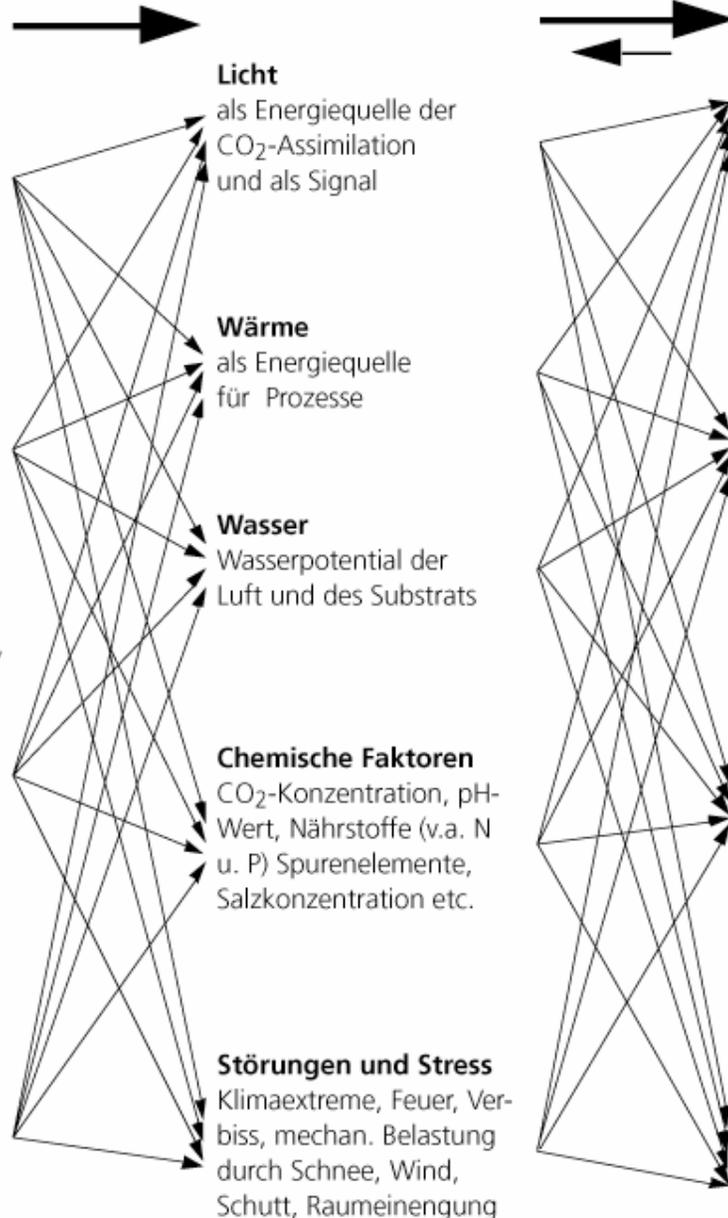
Pflanze

Assimilation und Wachstum

Phänologie und Reproduktion

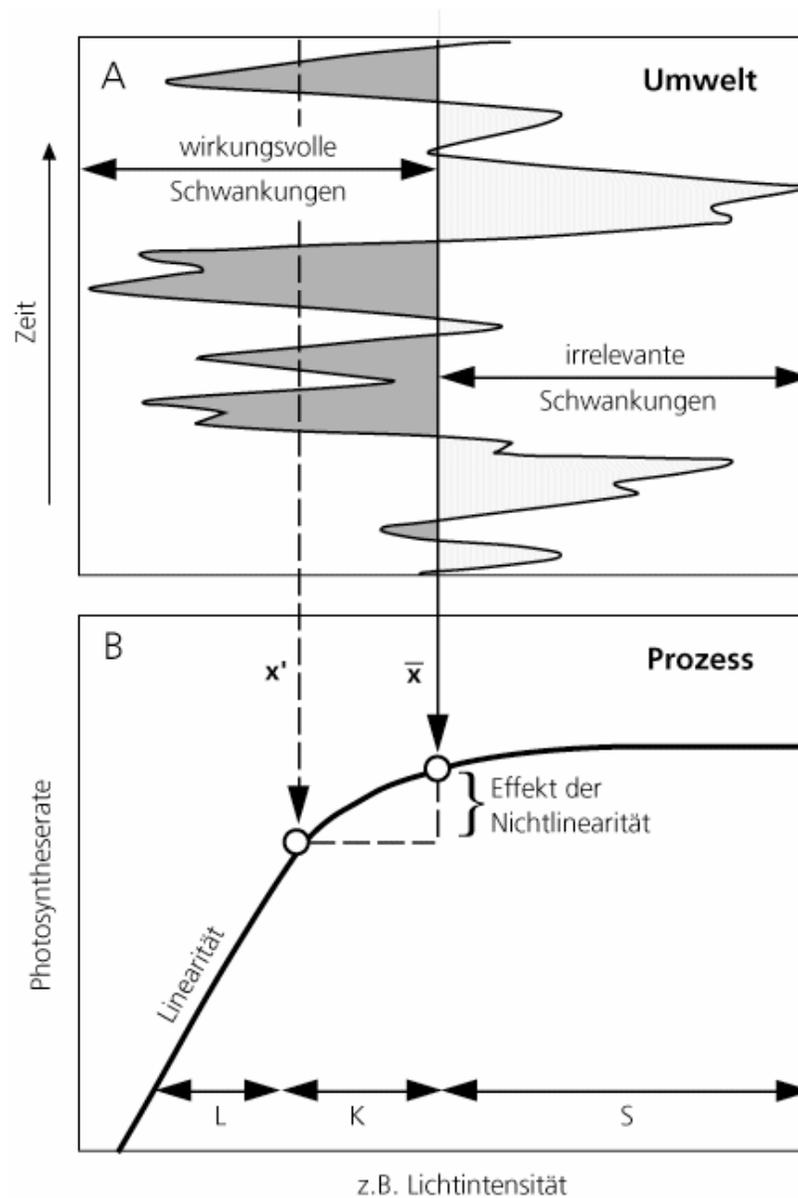
Morphologie und Bestandsstruktur

Stress- und Störungsresistenz, Persistenz



Müssen / können wir diese Komplexität einbeziehen?

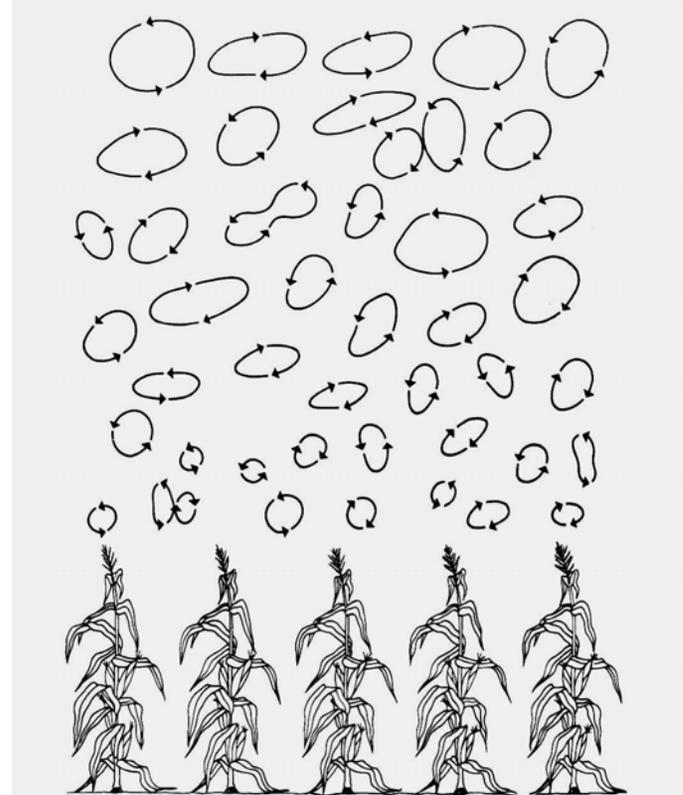
Reduzieren auf die relevanten Umwelteinflüsse



CO₂ Fluss-Messungen des Ökosystems

Open path IRGA zur direkten
Messung der CO₂ Konzentration

Sonicanemometer zur
Messung turbulenter Flüsse



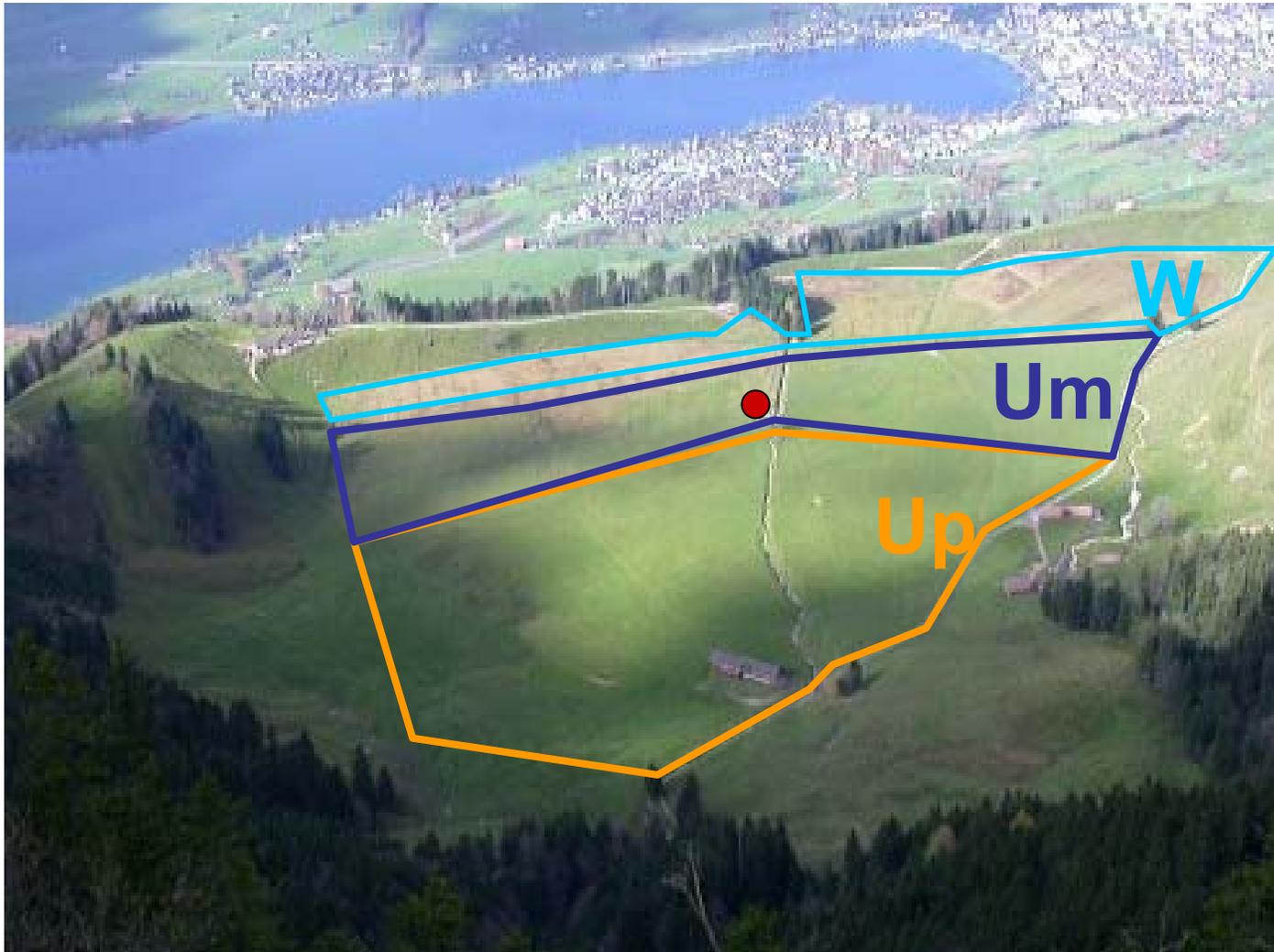
$$NEE = \overline{\rho w' C'} + \rho \frac{dC}{dt} = F_R + F_A$$

Seebodenalp

A: geschütztes **Feuchtgebiet**

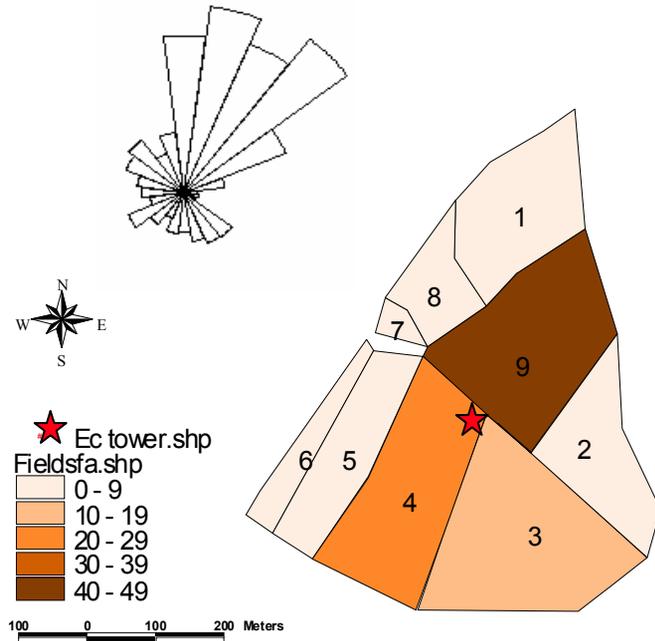
Um: extensiv genutzte **Wiese**

Up: extensiv genutzte **Weide**

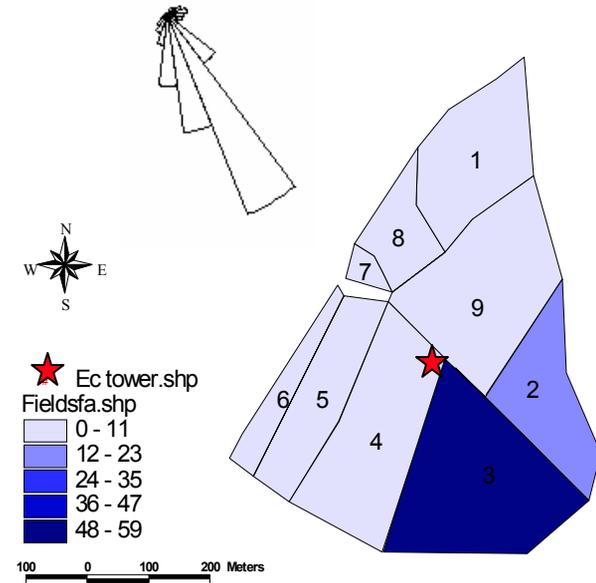


Räumliche Variation: Footprint Analyse

Tag



Nacht

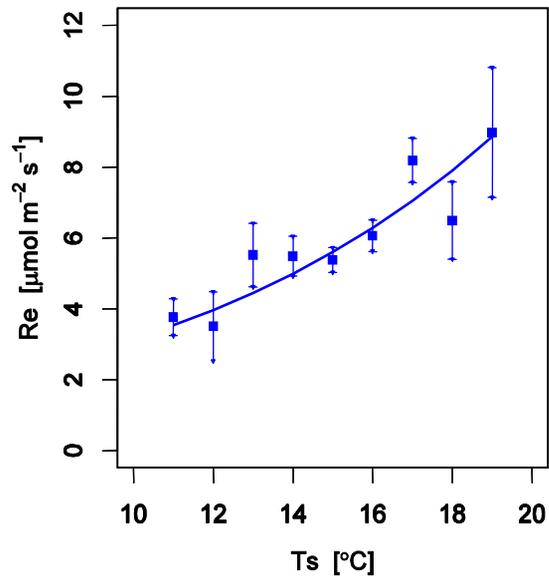


- Nur **4 Flächen** sind im Footprint, kein Feuchtgebiet
- **2 Wind Sektoren: Wiese und Weide**

Zeitliche Variation

Tagesverlauf der
Respiration & Assimilation

Land-Nutzung
Lokales Windsystem



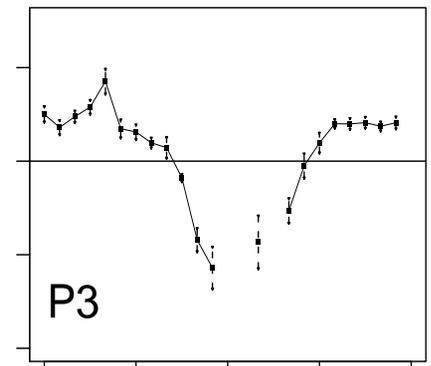
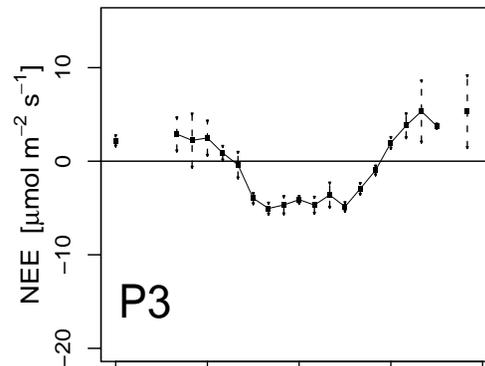
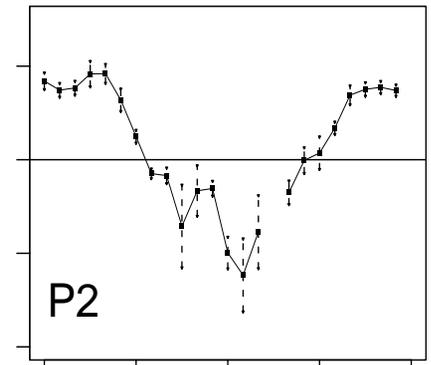
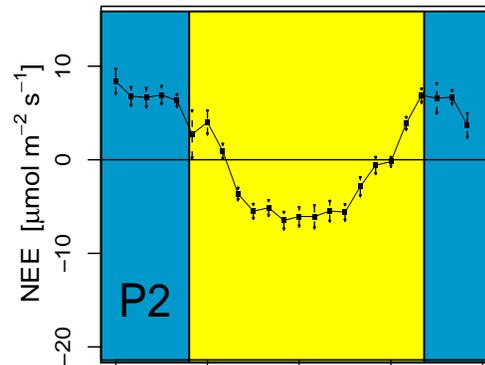
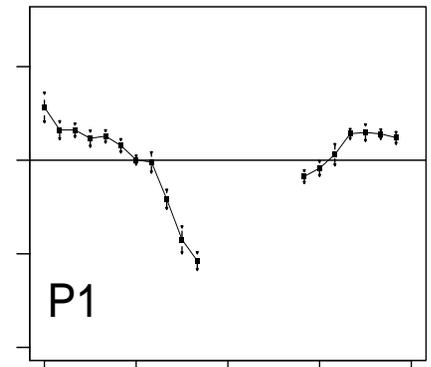
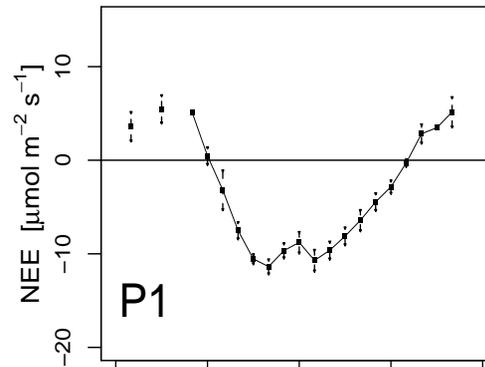
1. Schnitt

2. Schnitt

Schnee

meadow

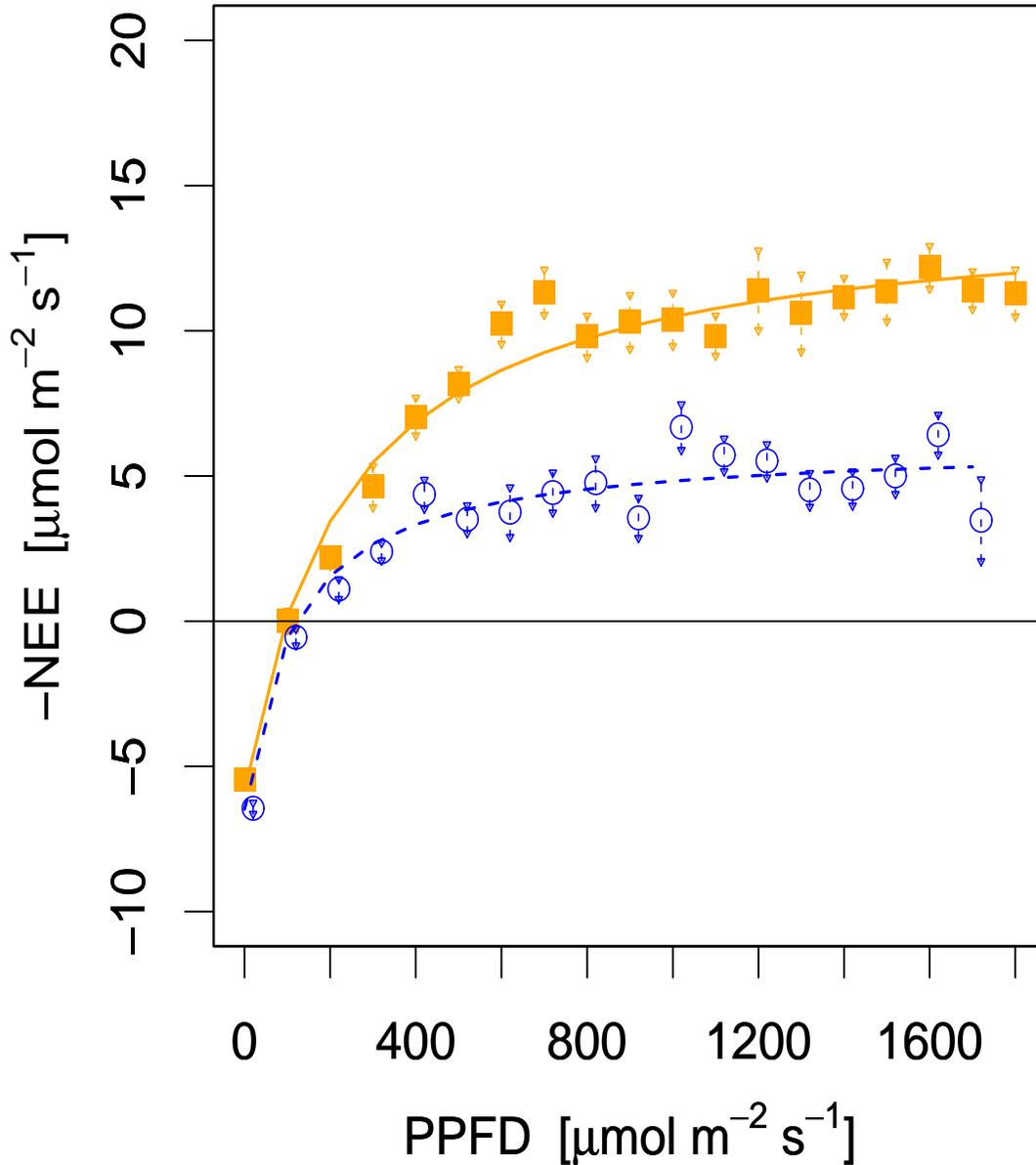
pasture



Time of Day [TD]

Time of Day [TD]

Assimilation = GPP



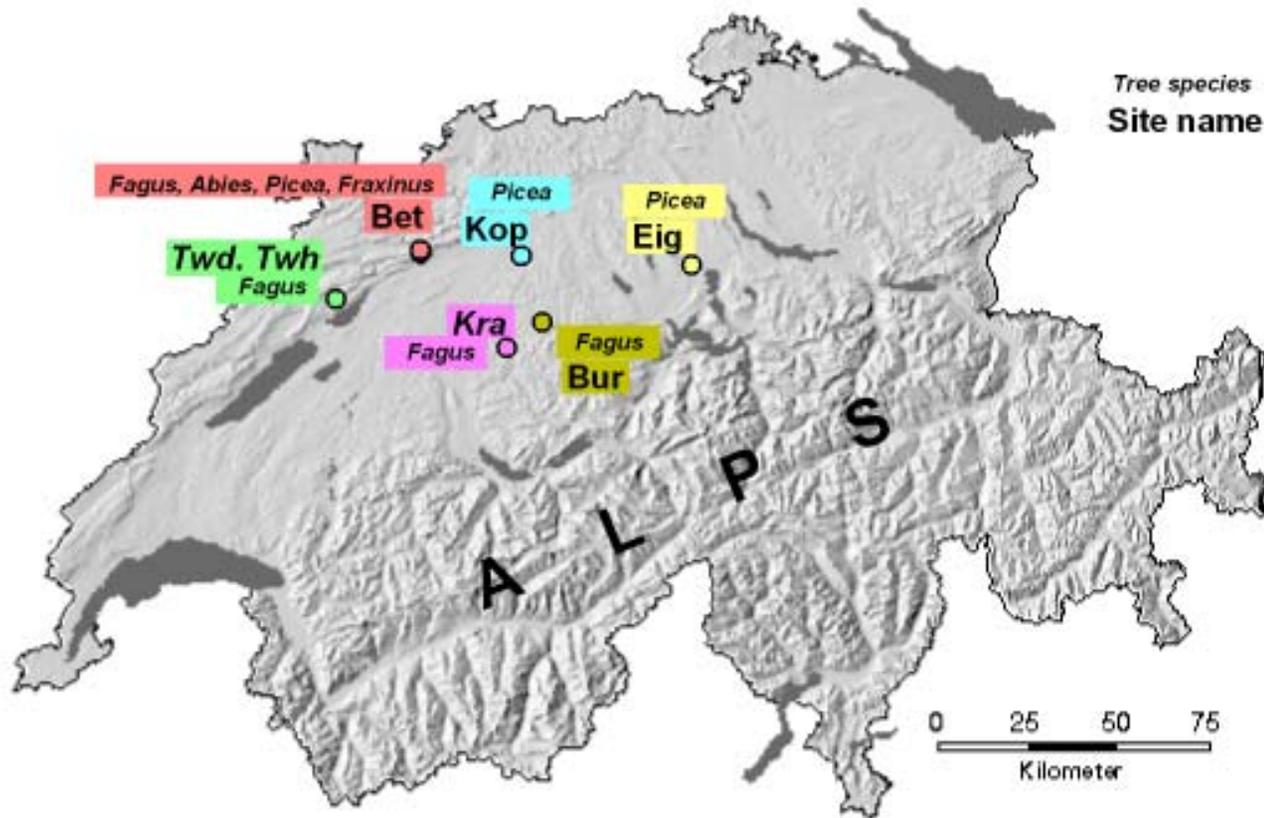
$$- \text{GPP} = \frac{A_{\max} \cdot \alpha \cdot \text{PPFD}}{\alpha \cdot \text{PPFD} + A_{\max}} - R_{\text{eco}}$$

Vor dem Schnitt

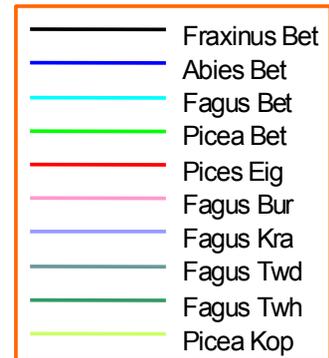
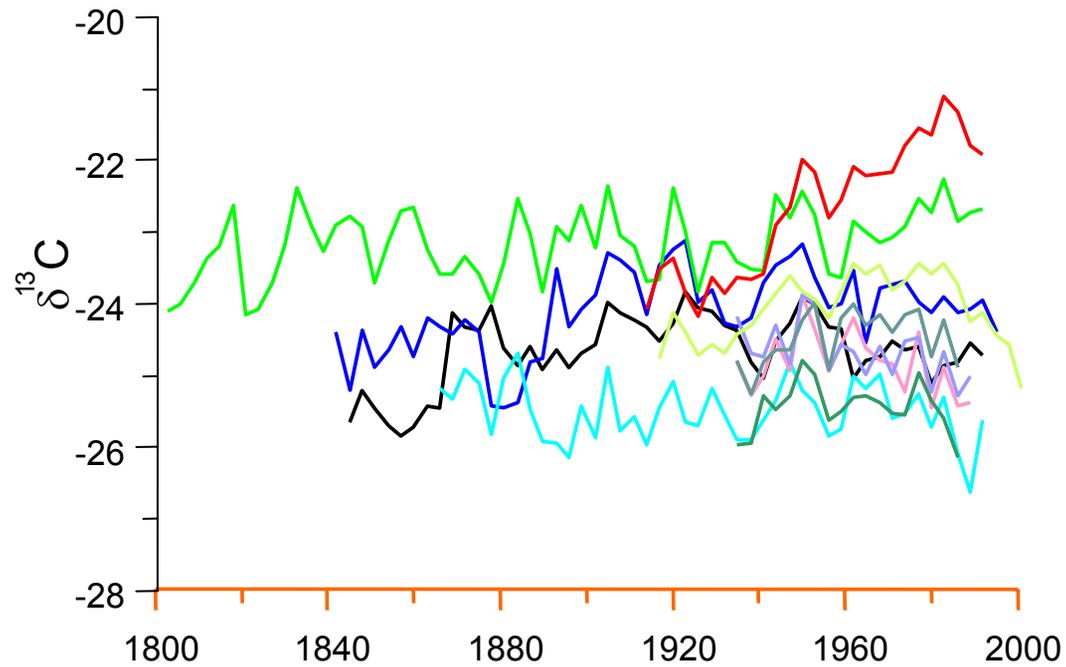
Nach dem Schnitt & kontinuierl. Beweidung

Jahrring- $\delta^{13}\text{C}$, Wassernutzungs-Koeffizient in Bäumen und Global Change

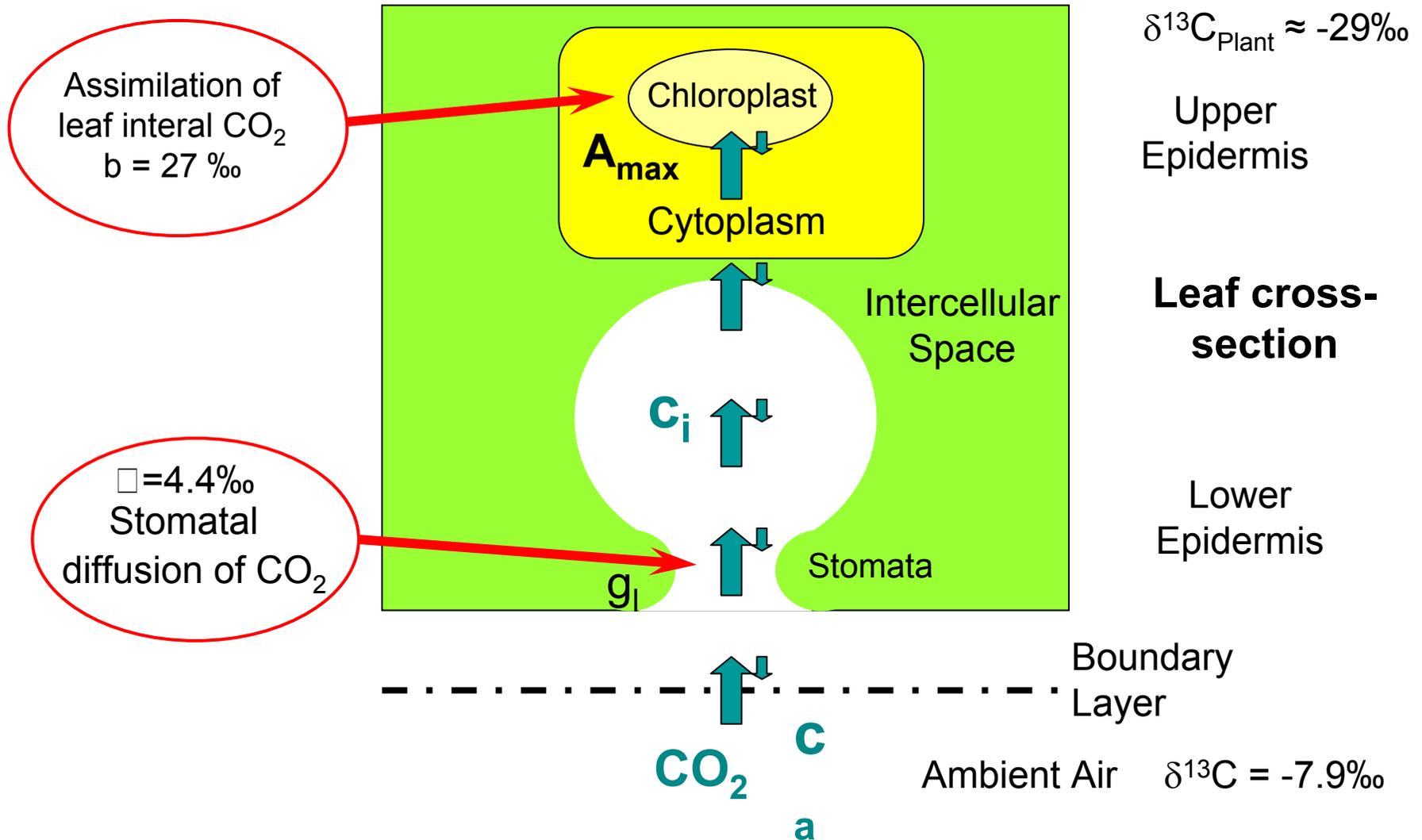
Standorte mit Jahrring-Isotopen-Chronologien



$\delta^{13}\text{C}$ -Chronologien



^{13}C Isotopen Fraktionierung im Blatt



Bedeutung der interzellularen CO₂-Konzentration

$$A=(c_a-c_i)*g$$

A=Photosynthese ~ CO₂-Aufnahme

g=stomatäre Leitfähigkeit ~ Wasserabgabe

$$W=A/g=c_a-c_i$$

W=Wasser-Nutzungs-Koeff. ~ C-Aufnahme
pro Einheit Wasserverlust

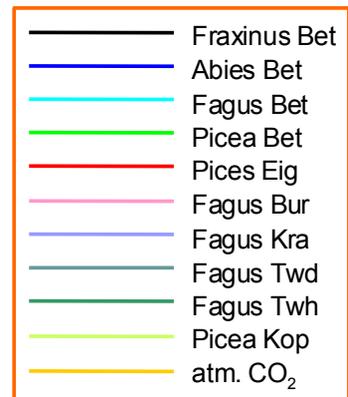
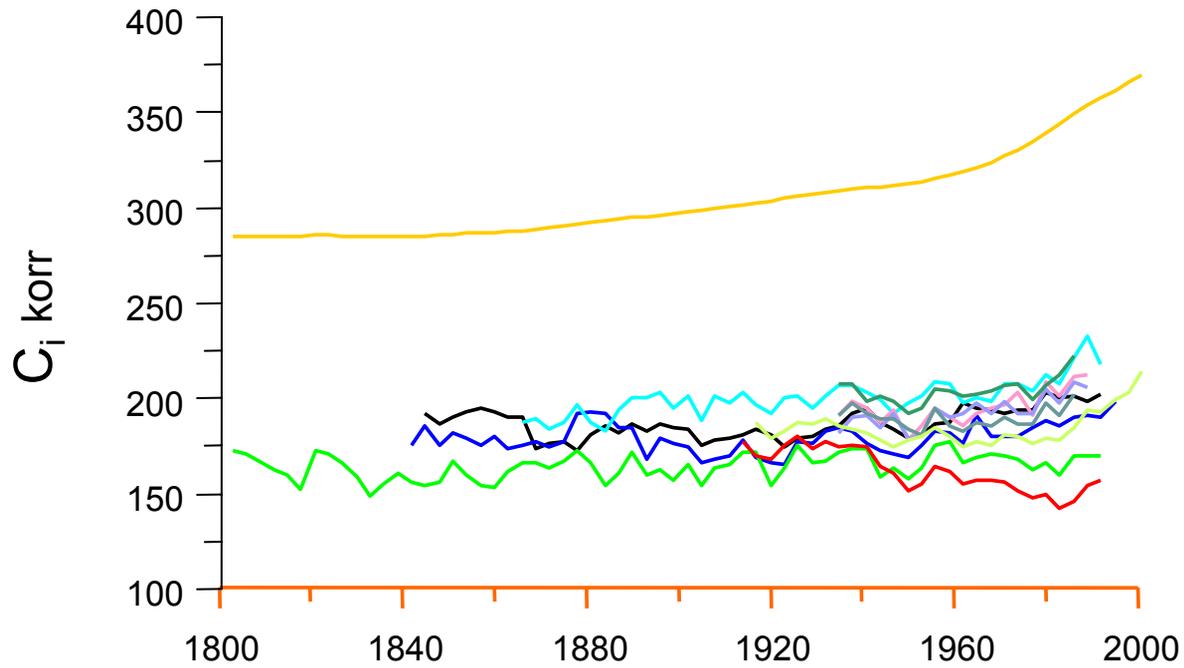
$$\delta^{13}\text{C}_{\text{plant}}=\delta^{13}\text{C}_{\text{air}}-(a+(a-b)c_i/c_a)$$

Vorgehen:

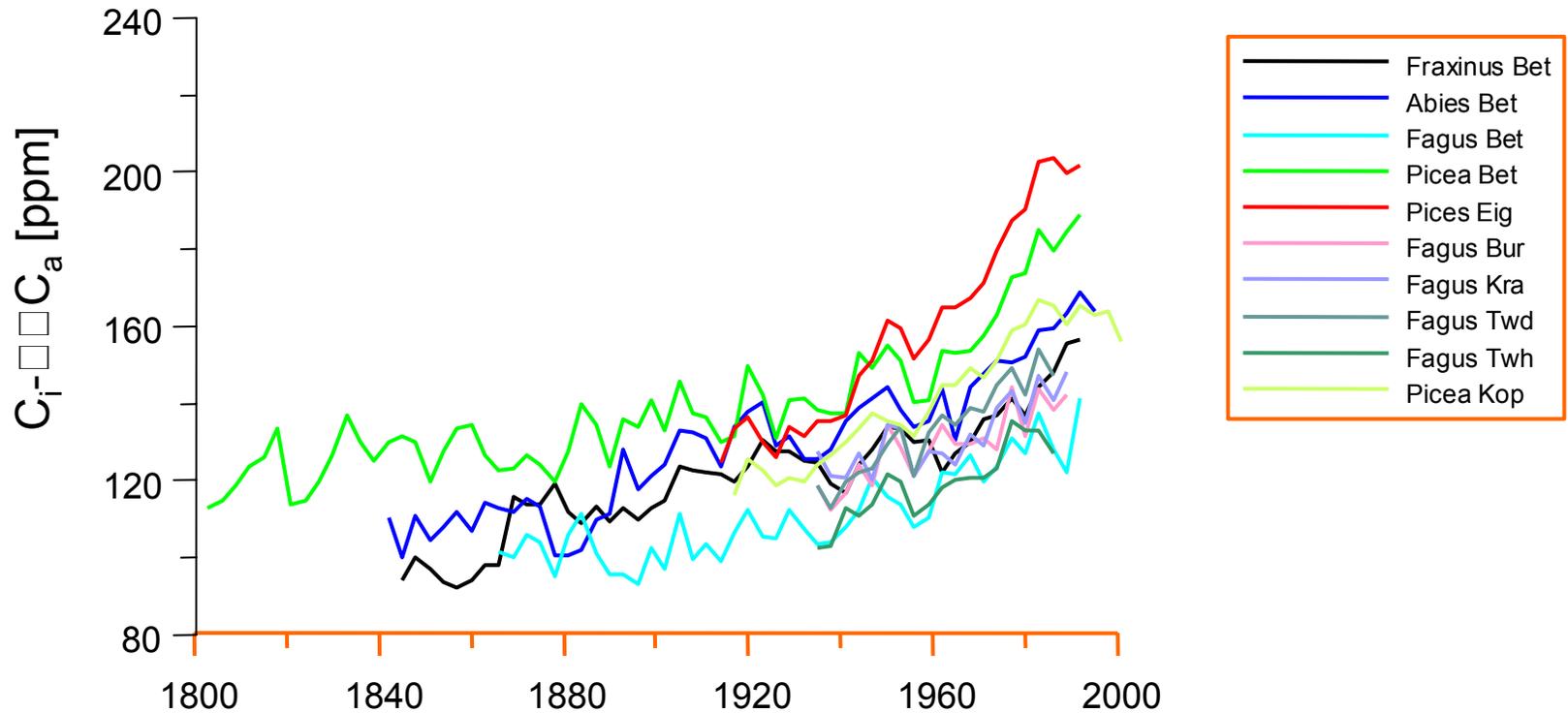
$\delta^{13}\text{C}$ messen

c_i , c_a-c_i , W berechnen

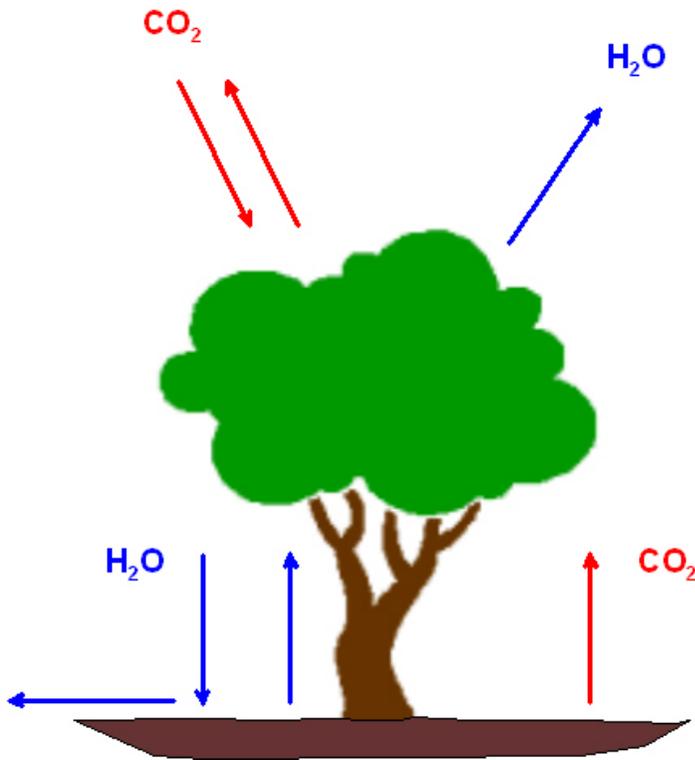
C_i-Chronologie



$C_a - C_i$ und die Wassernutzungseffizienz nahm bei Bäumen um fast 50% zu



Resultatinterpretation

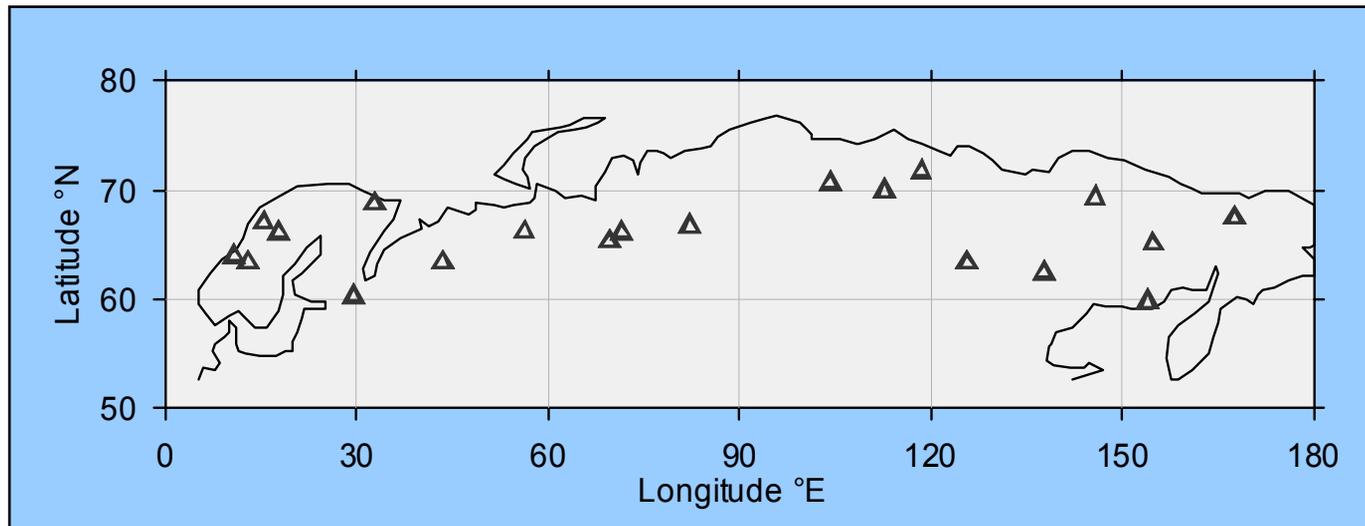


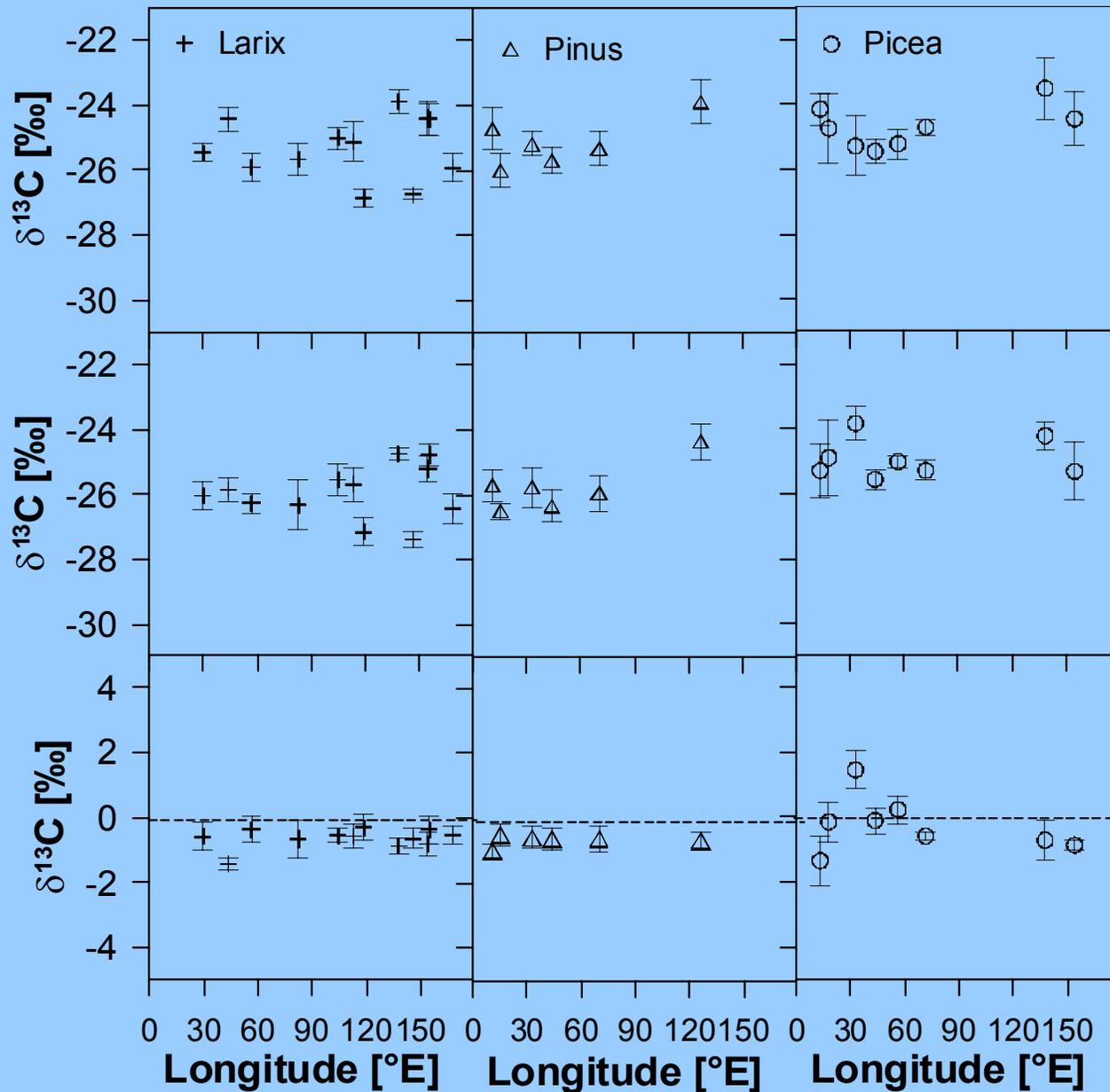
Das Verhältnis zwischen dem Wasser und dem CO_2 - Fluss hat sich verändert:

- Entweder wird weniger Wasser verbraucht bei gleich bleibender CO_2 - Aufnahme
- oder mehr CO_2 - wird aufgenommen bei gleichem Wasserverlust
- Oder beide Größen haben sich verändert

Trends in den Isotopenverhältnissen entlang der nördlichen Europäischen Baumgrenze in Eurasien

M. Saurer, F. Schweingruber, E.A. Vaganov, S.G. Shiyatov, R. Siegwolf



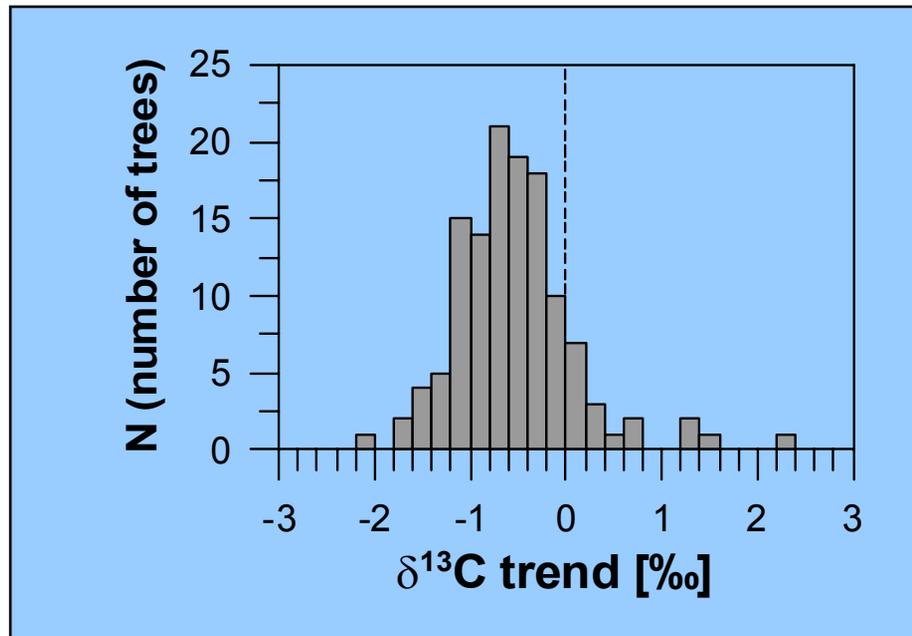


1861-90

1961-90

trend

Häufigkeitsverteilung der Änderung der Isotopenverhältnisse

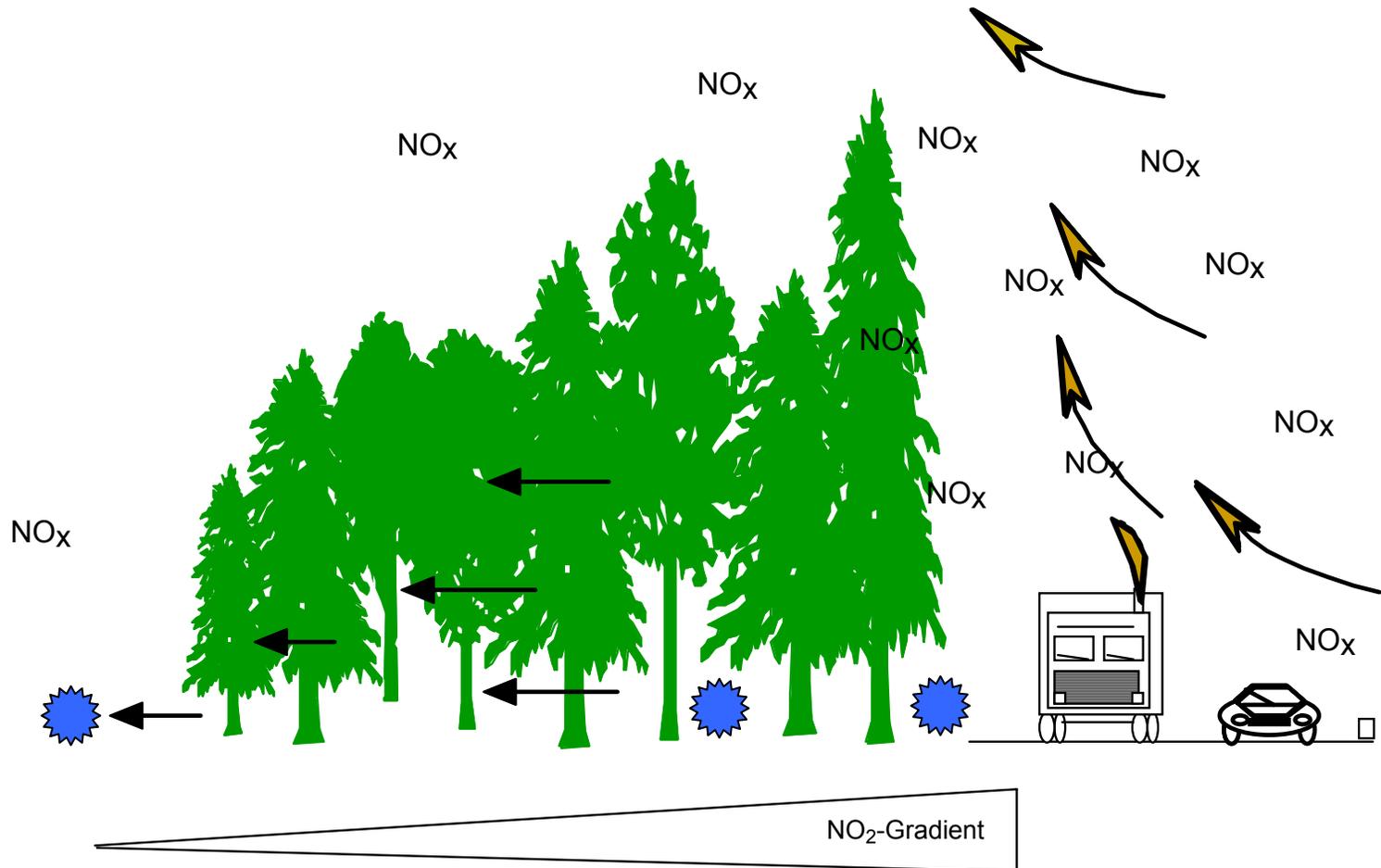


Änderung des Wassernutzungskoeffizienten zwischen 1861-90 und 1961-90

	<i>Larix</i>	<i>Pinus</i>	<i>Picea</i>
Number of sites	12	6	8
W_i 1861-90 [$\mu\text{mol mol}^{-1}$]	63.4 \pm 7.9	65.1 \pm 6.2	68.7 \pm 5.4
W_i 1961-90 [$\mu\text{mol mol}^{-1}$]	74.4 \pm 7.9	76.2 \pm 7.2	84.2 \pm 5.7
%-change of W_i	17.4 \pm4.5	17.2 \pm2.7	22.6 \pm12.1

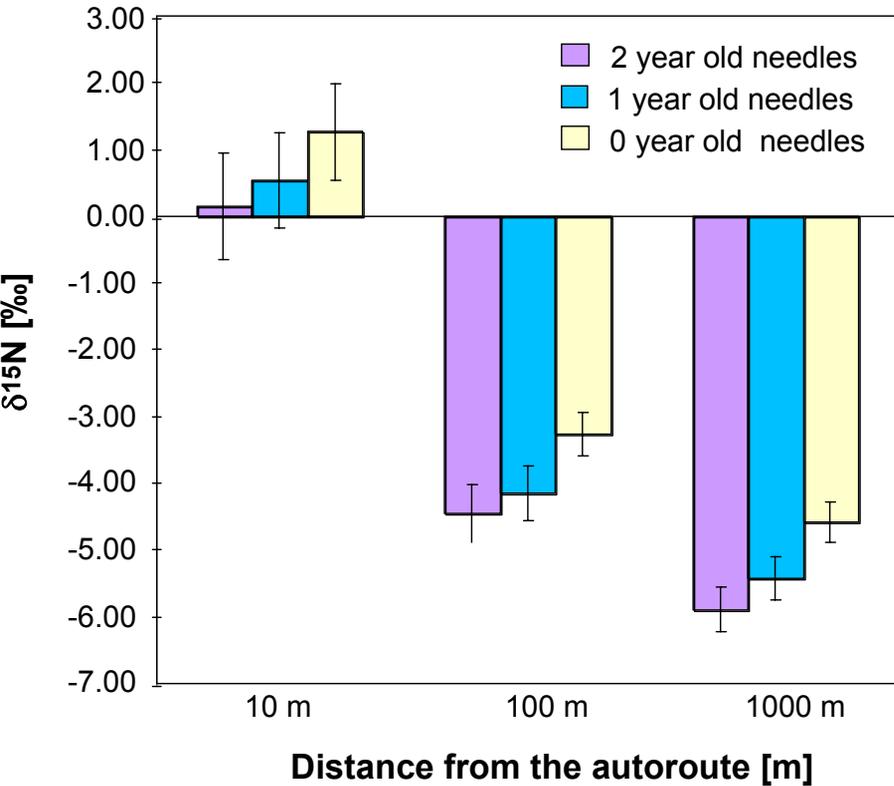
Jahring- $\delta^{15}\text{N}$ als Indikator für Veränderungen der Stickstoffemissionen entlang der Autobahn

NO_x Emissionen entlang der Autobahn

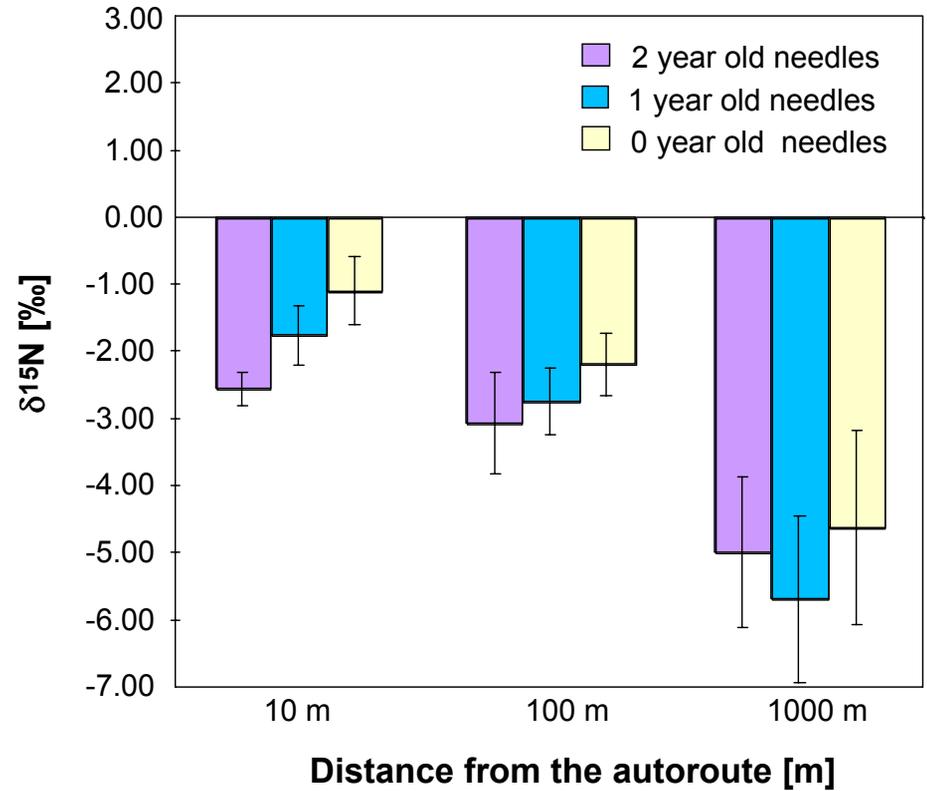


$\delta^{15}\text{N}$ in der Biomasse

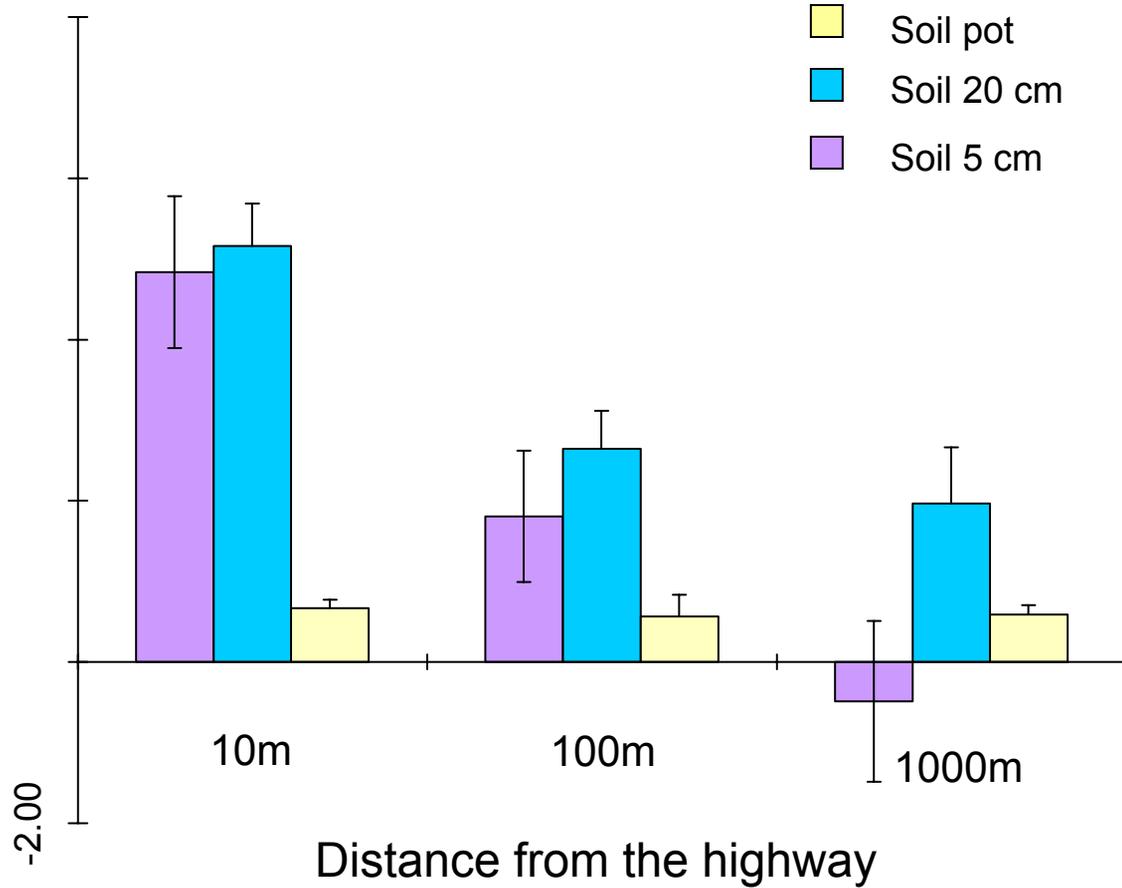
$\delta^{15}\text{N}$ in Nadeln 60-70 jähriger Bäume
(*Picea abies*) entlang der Autobahn



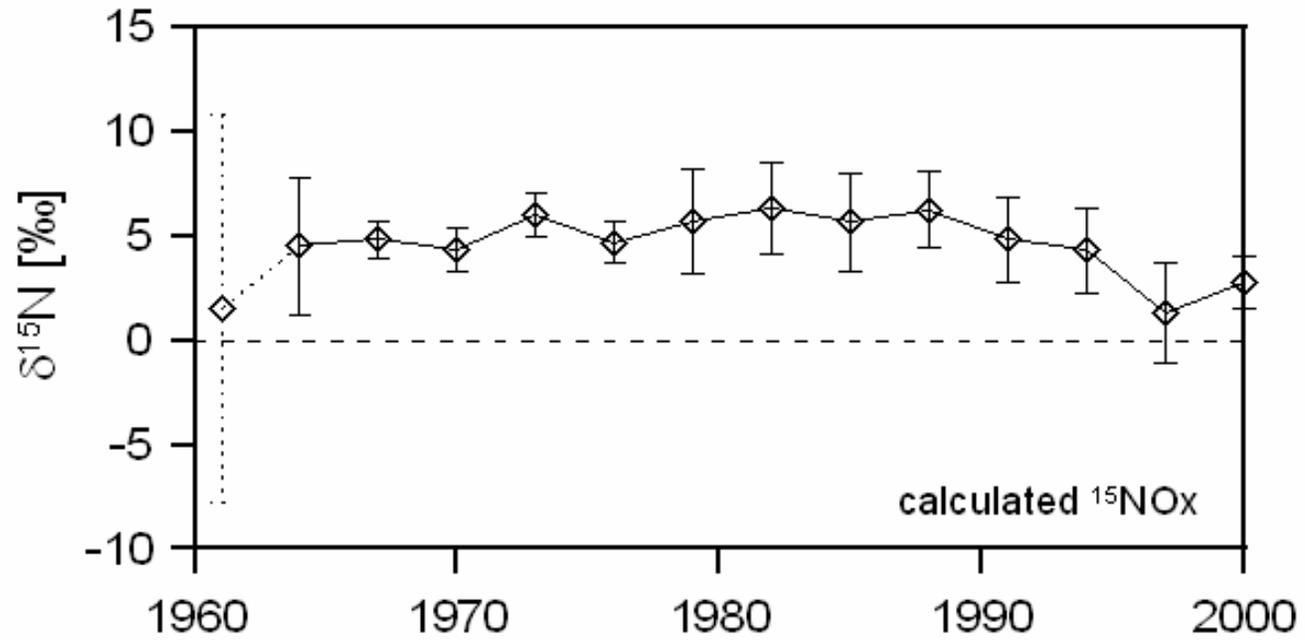
$\delta^{15}\text{N}$ Werte von 5 jährigen vertopften Bäumen
(*Picea abies*) nach 2 jähriger Exposition

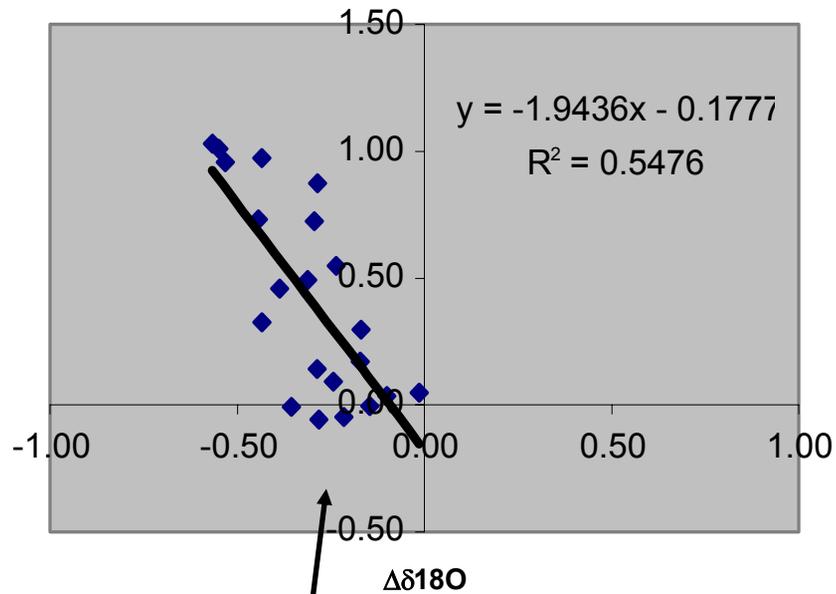


$\delta^{15}\text{N}$ Werte des Bodens am Versuchsort



$\delta^{15}\text{N}$ Muster in Jahrringen

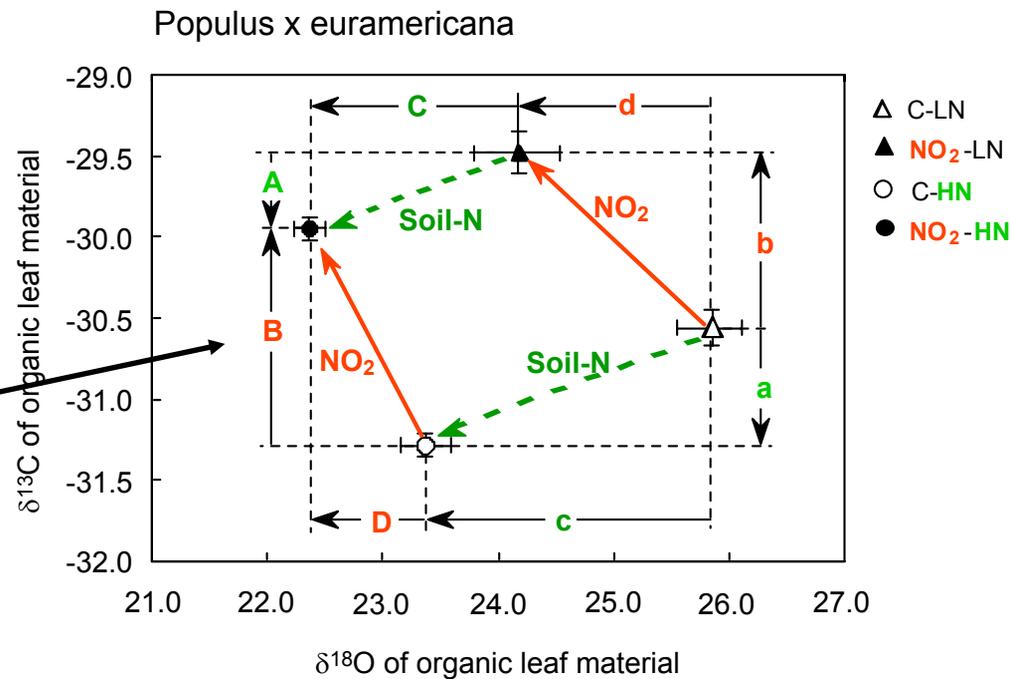




Filed, in tree rings

Laboratory, in leaves

Physiologische Auswirkungen



Schlussfolgerungen

- Die isolierte Betrachtung einzelner Prozesse führt sehr leicht zu falschen Schlussfolgerungen und Fehleinschätzungen bezüglich der Auswirkungen auf Ökosystemebene.
- Es ist daher dringend notwendig, die Untersuchungen von einzelnen Prozesse an Ökosystemkomponenten auf gesamte Systeme räumlich und zeitlich auszudehnen.
- Einfache experimentelle Ansätze mit stabilen z.B. mit Isotopen in Jahrringen ermöglichen den Zugang zu wichtigen Informationen von zeitlich und räumlichen Umweltveränderungen.