



Universität für Bodenkultur Wien
Department für Wald- und
Bodenwissenschaften

O balanço de carbono nos ecossistemas: métodos de determinação e modelagem espacial e dinâmica temporal

Klaus Katzensteiner*, **Otto Eckmüller**** & **Helmut Schume***
Institut für Waldökologie, Institut für Waldwachstumsforschung, BOKU Wien

5º Simpósio Latino-americano sobre Manejo Florestal
Santa Maria de 23 Novembre 2011
Curso pre-evento



Universität für Bodenkultur Wien
Department für Wald- und
Bodenwissenschaften

Der Kohlenstoffhaushalt von Ökosystemen: Methoden zur Erfassung und Modellierung der räumlichen und zeitlichen Dynamik

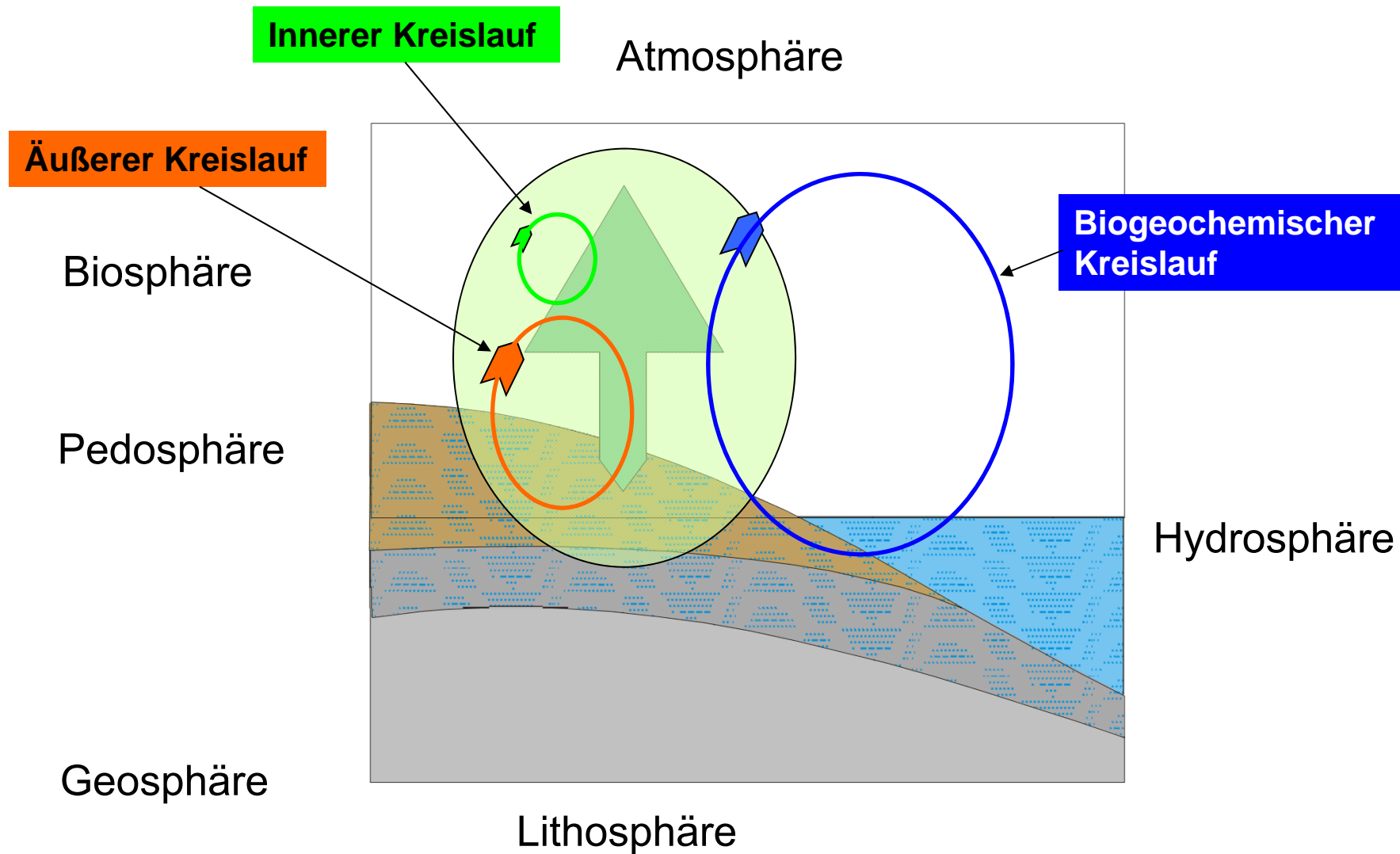
*Methods for the determination and modelling of the carbon cycle
of ecosystems*

Klaus Katzensteiner*, Otto Eckmüller** & Helmut Schume*
Institut für Waldökologie, Institut für Waldwachstumsforschung, BOKU Wien

5º Simpósio Latino-americano sobre Manejo Florestal
Santa Maria de 23 Novembre 2011
Curso pre-evento



Terrestrische Ökosysteme an der Schnittstelle von Sphären



Flüsse: Stoff- und Energieflüsse verbinden Ökosystem mit der Umgebung und die Systemelemente miteinander

Ermittlung über **Konzentrationen** und **Konzentrationsgradienten**

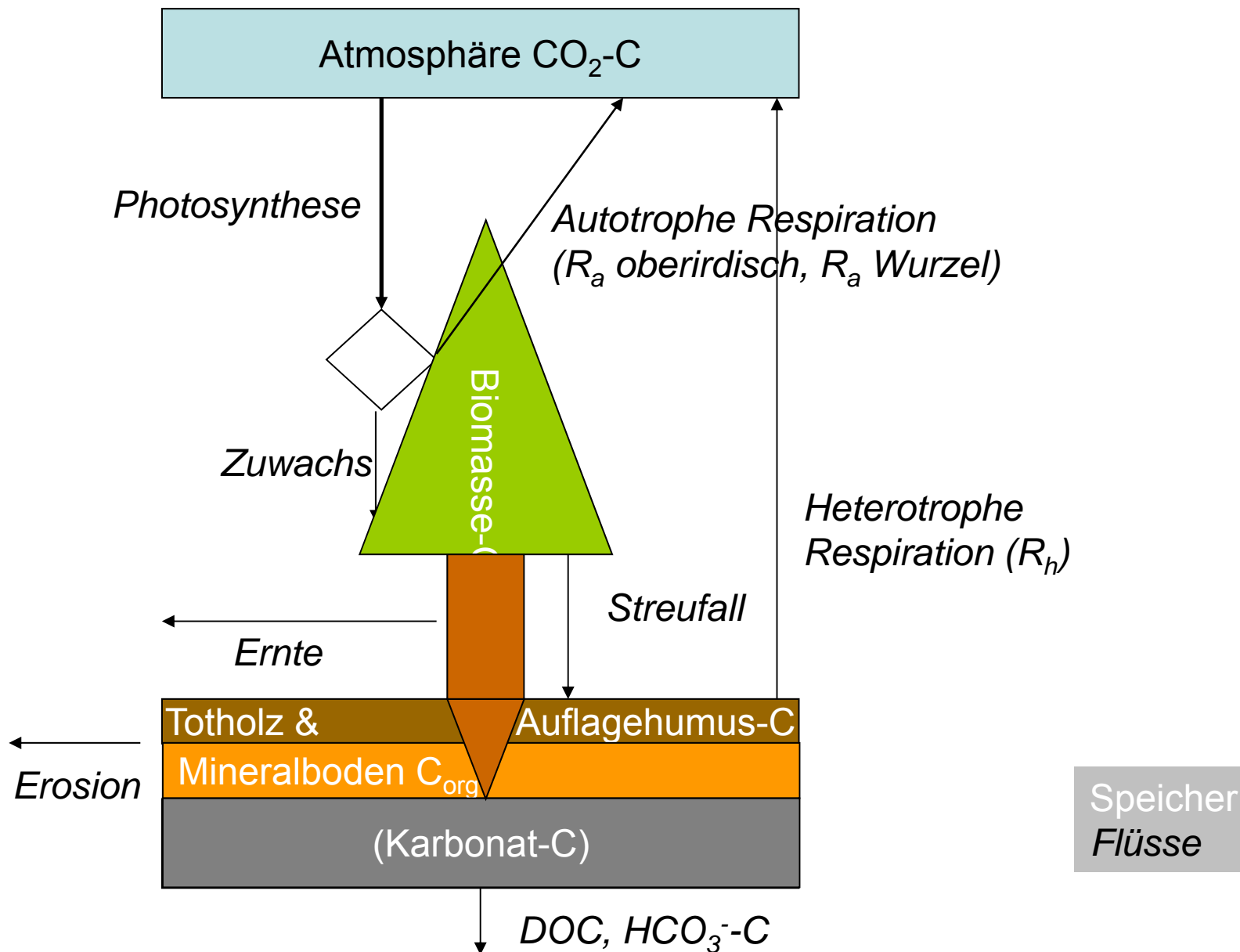
Fluss = Gesamtmenge, die über einen beliebigen Zeitraum über einen beliebigen Querschnitt strömt: z.B. [cm³] oder [kg]

Flussrate I = Menge/Zeit [m³.sec⁻¹] oder [kg.sec⁻¹]

Flussdichte (flux) i = Flussrate/Fläche = Menge/(Zeit.Fläche)

z.B.: [cm³. sec⁻¹.cm⁻²] oder [kg.sec⁻¹.m⁻²]

Der Kohlenstoffhaushalt von Ökosystemen



Stoffbilanzierung in Waldökosystemen

Bilanzsaldo über Zeitraum t : $B(t) = I_{in} * \Delta t - I_{out} * \Delta t$

I ... Flussrate

$B(t) = 0 \rightarrow$ Fließgleichgewicht

$B(t) \neq 0: \rightarrow$ Vorratsänderung oder Umsetzung

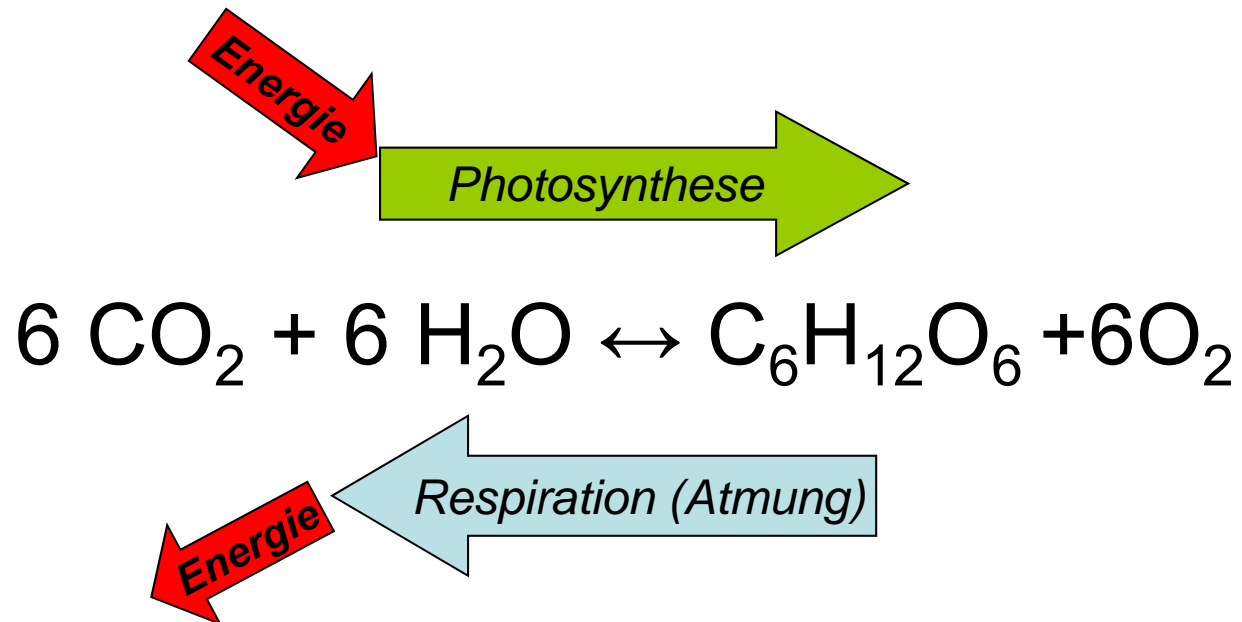
$B(t) > 0 \rightarrow$ **Sequestrierung**

Waldökosysteme unterscheiden sich von Agrarsystemen:

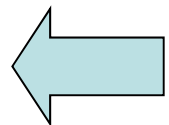
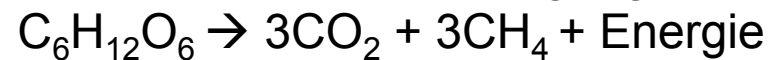
- \rightarrow lange Umtriebszeiten
- \rightarrow hohe Stoffvorräte in oberirdischer Biomasse
- \rightarrow häufig Akkumulation von Auflagehumus
- \rightarrow seltene Störungen
- \rightarrow komplexe innere Stoffkreisläufe

- **GPP - Bruttoprimärproduktion** (**Gross primary production**): Menge des Kohlenstoffs der bei der Photosynthese durch Pflanzen fixiert wird
- **NPP – Nettoprimärproduktion**: Bruttoprimärproduktion (Fixierung von CO₂ in organischen Verbindungen über Photosynthese) minus **autotropher Respiration Ra** (Abgabe von CO₂ durch die gleiche Pflanze)
- **Rh - Heterotrophe Respiration**: Umwandlung organischer Verbindungen durch heterotrophe Bodenorganismen in CO₂.
- **NEE – Netto Ökosystemproduktion (auch Net ecosystem exchange)**: Die endgültige Bilanz der Kohlenstoffflüsse durch Photosynthese, autotrophe und heterotrophe Respiration an den Grenzen des Ökosystem. $NEE = NPP - Rh$
(syn. Net ecosystem production $NEP = GPP - Ra - Rh$)
- **NBP – Nettobiomproduktion**: Die Bilanz der Kohlenstoffflüsse an den Ökosystemgrenzen inklusive Verluste durch Feuer und Ernte (Schulze et al. 2000)

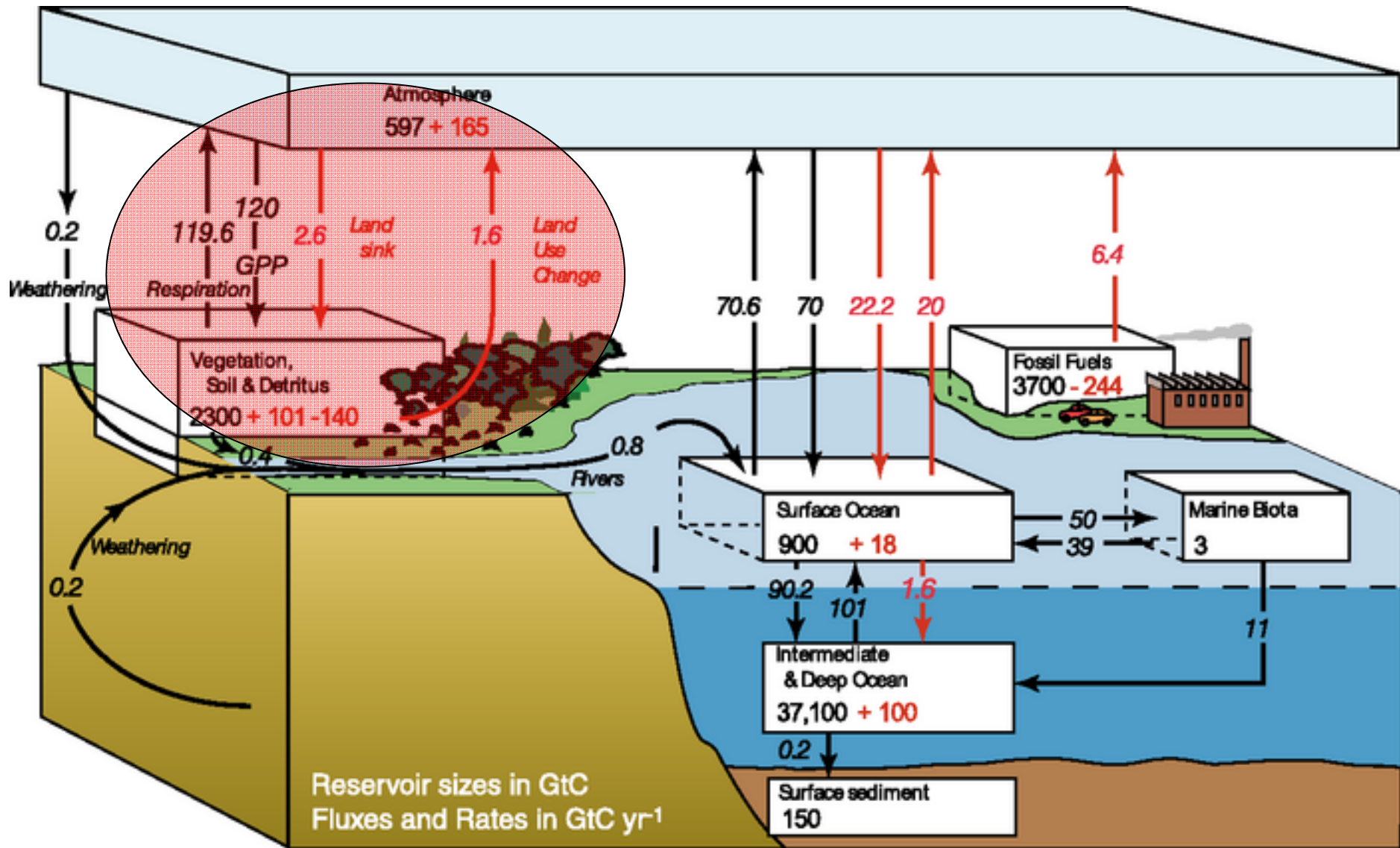
Biogene Prozesse (Stoffwechsel)



Bei reduzierenden Bedingungen auch anaerobe Prozesse (Gärung)

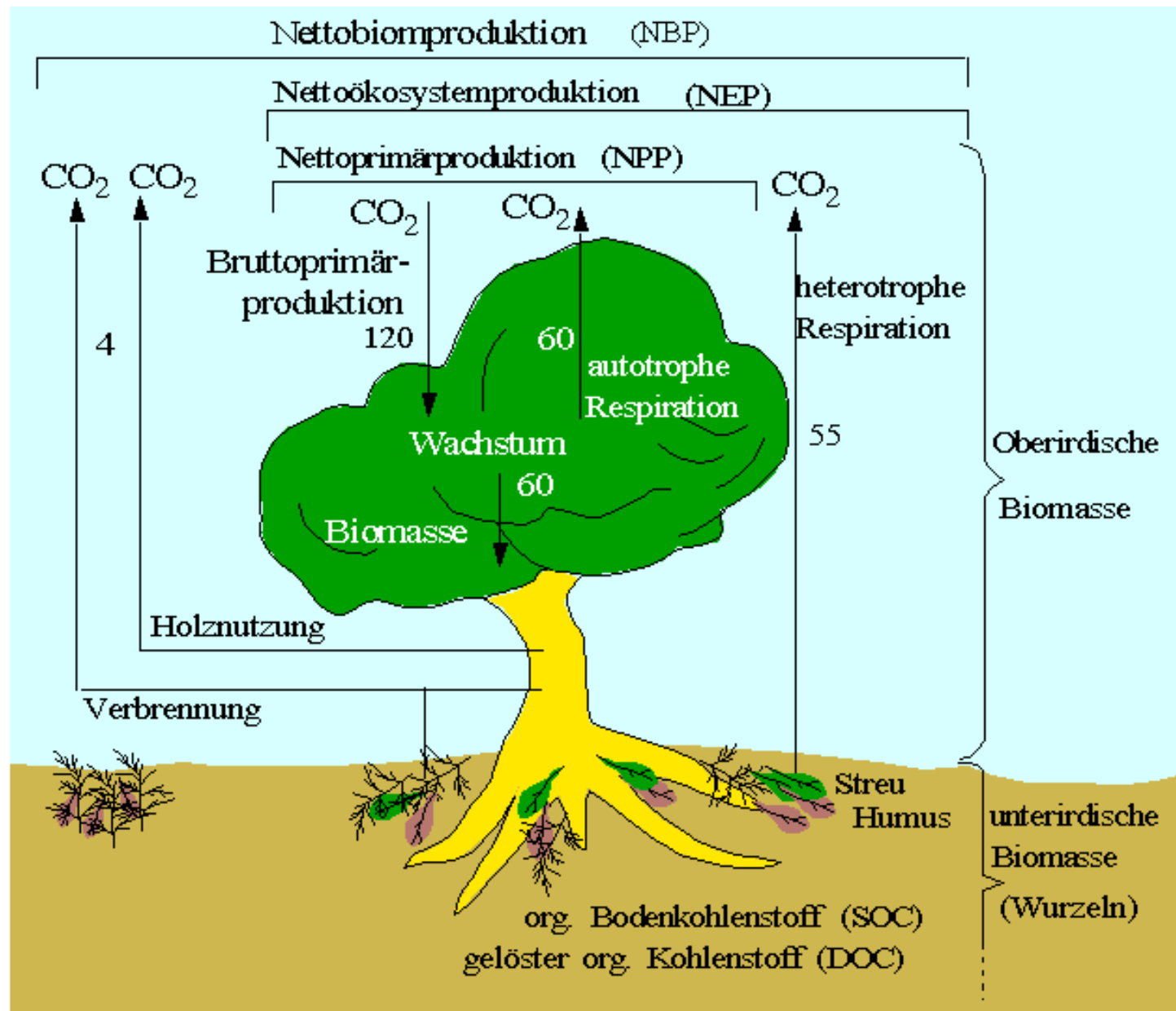


Der globale Kohlenstoffhaushalt



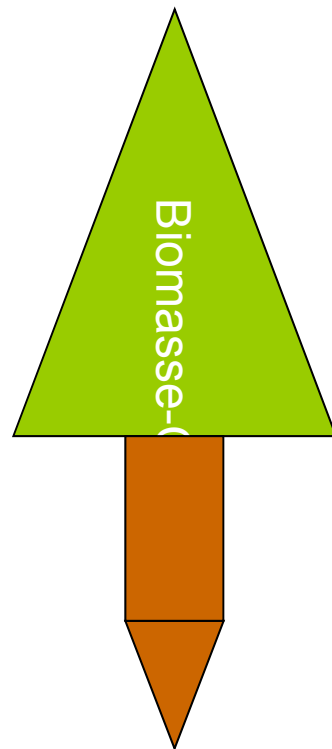
- Vorindustrielle Speicher und Flüsse
- Anthropogen verursachte Flüsse & Δ Speicher

C-Flüsse Global [Pg C. yr⁻¹]



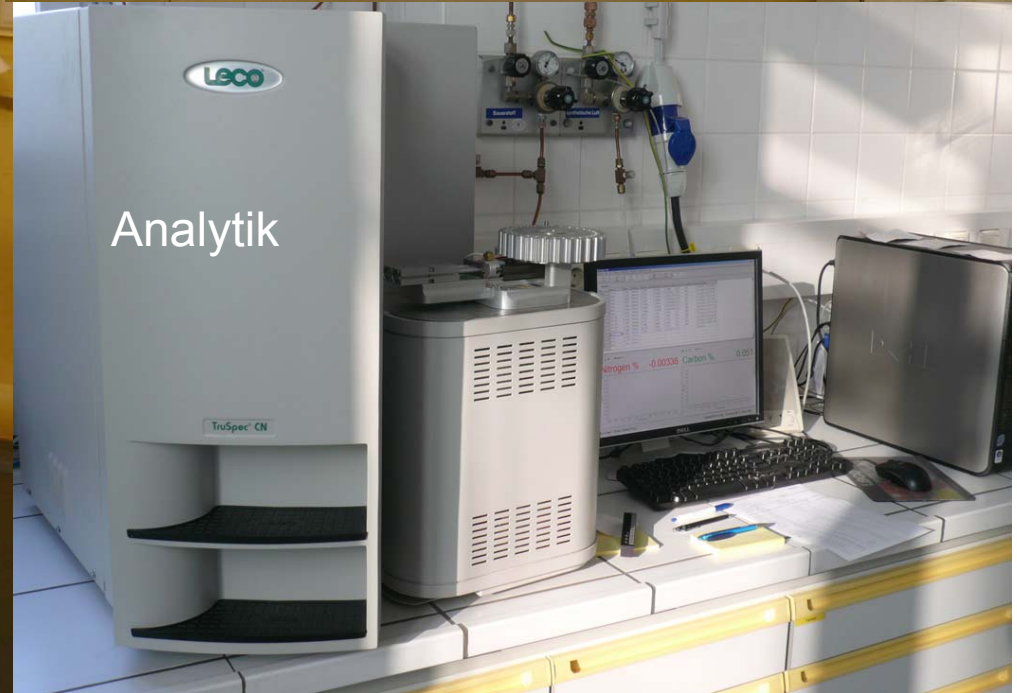
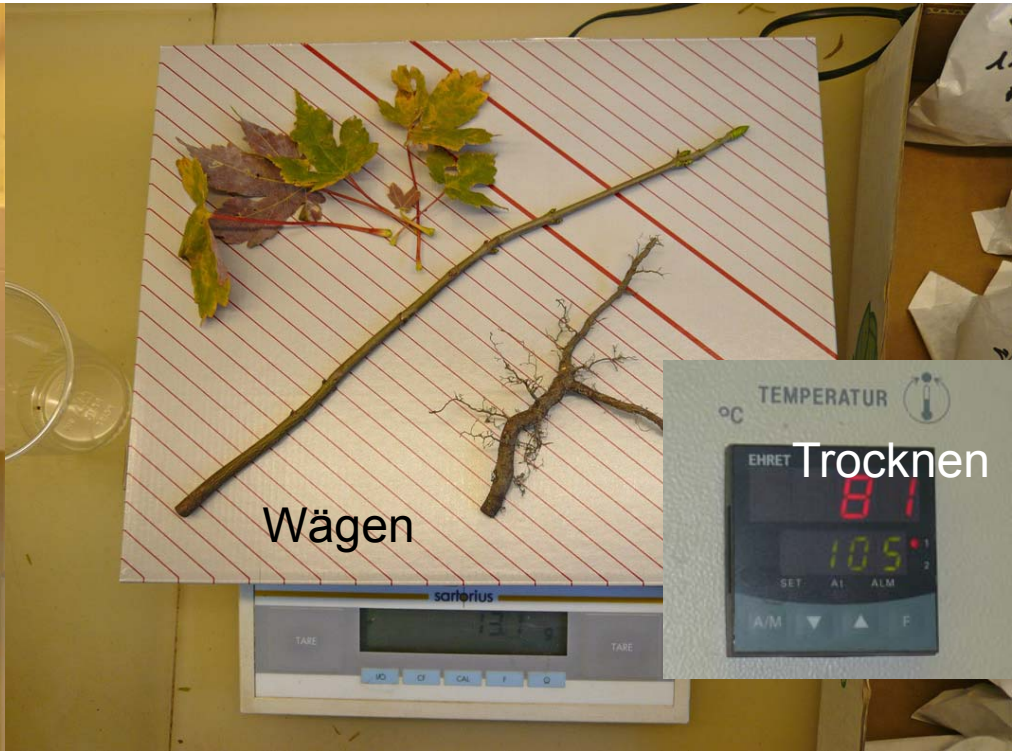
Der Kohlenstoffhaushalt von Ökosystemen

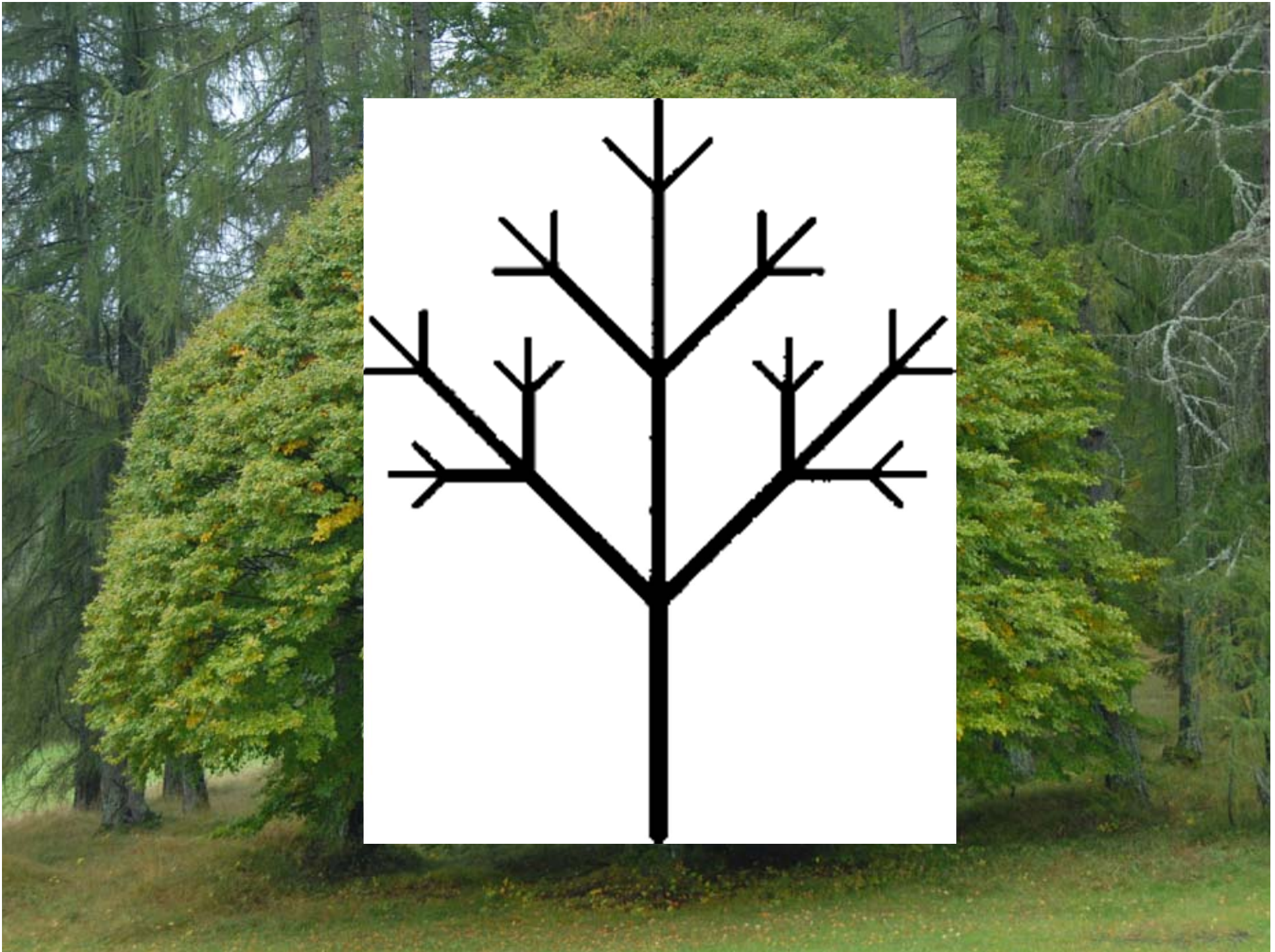
Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung in der Biomasse



Ernten
Trocknen
Wägen
Kohlenstoffanalyse

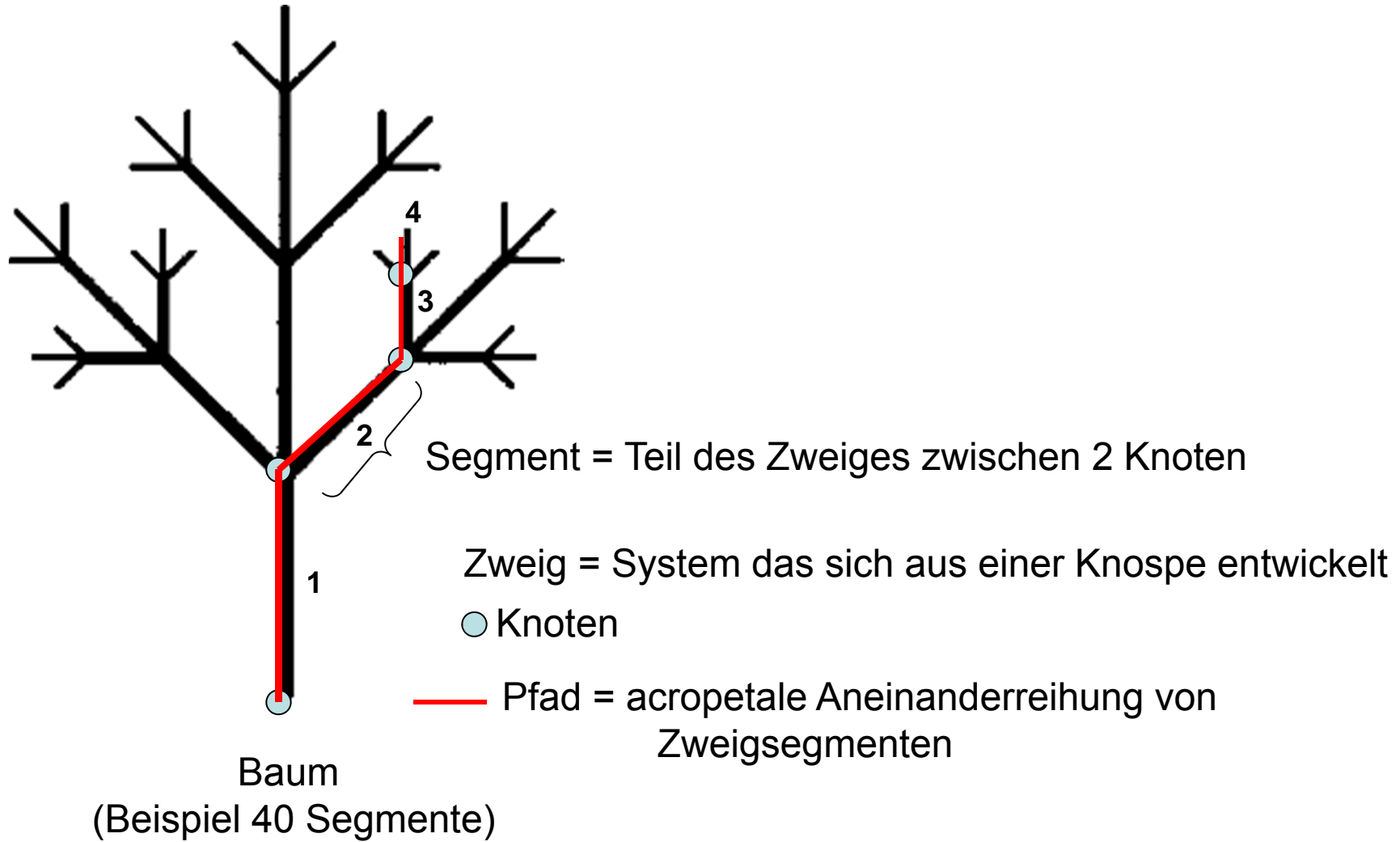
→ Masse [g] * Kohlenstoffgehalt [g.g⁻¹]
= Kohlenstoffvorrat [g]

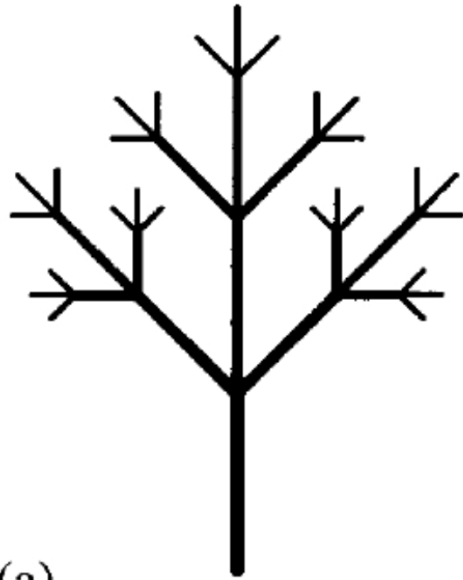




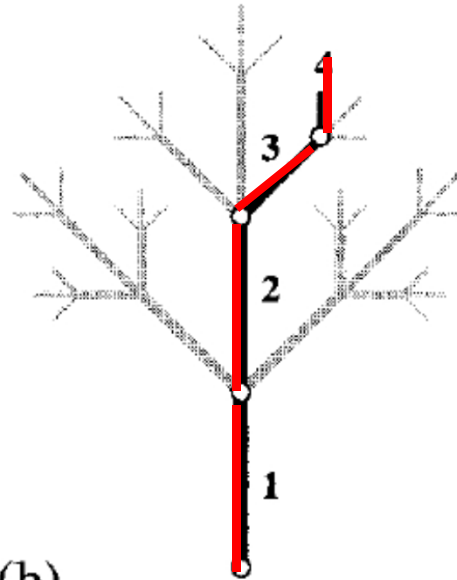
Stratifizierte Probenahme

z.B. Randomized Branch Sampling (Gregoire & Valentine, 2008)

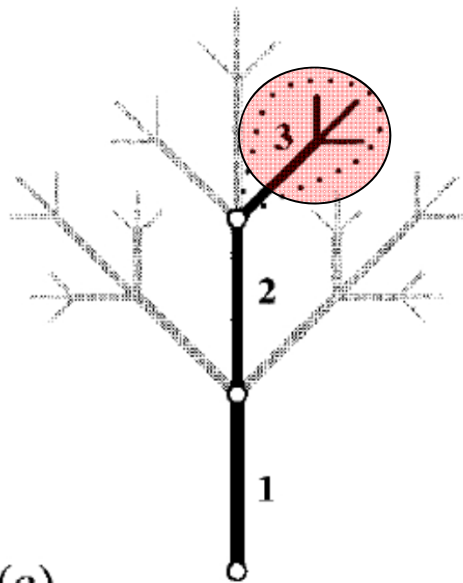




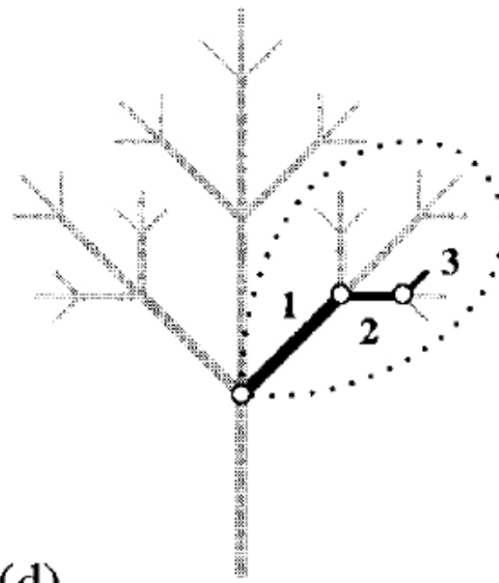
(a)



(b)



(c)



(d)

- a. Baum aus 40 Segmenten und 27 möglichen Pfaden (Knospe des Hauptstamms bis Terminalknospe)
- b. 4 Segmente eines möglichen Pfades
- c. Abbruch bei Knoten 3 → Abschnitt 3 wird als Terminalsegment betrachtet
- d. Start des Pfades bei einem Astansatz

Randomized branch sampling:

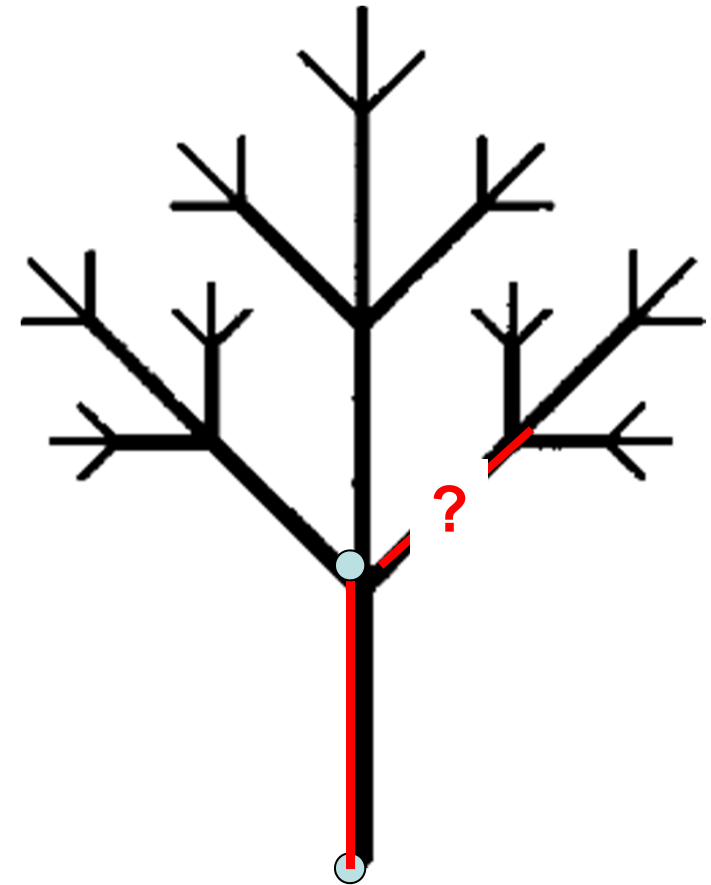
Auswahl des ersten Segmentes des Pfades mit Wahrscheinlichkeit p_1 (da nur 1 Ast/Stamm: $p_1 = 1$)

Zufallsauswahl eines Zweiges mit Ursprung im 2. Knoten mit Wahrscheinlichkeit p_2 (da mehrere Möglichkeiten (Verzweigung): $p_2 < 1$)

Zufallsauswahl eines Zweiges mit Ursprung im 3. Knoten mit Wahrscheinlichkeit p_3

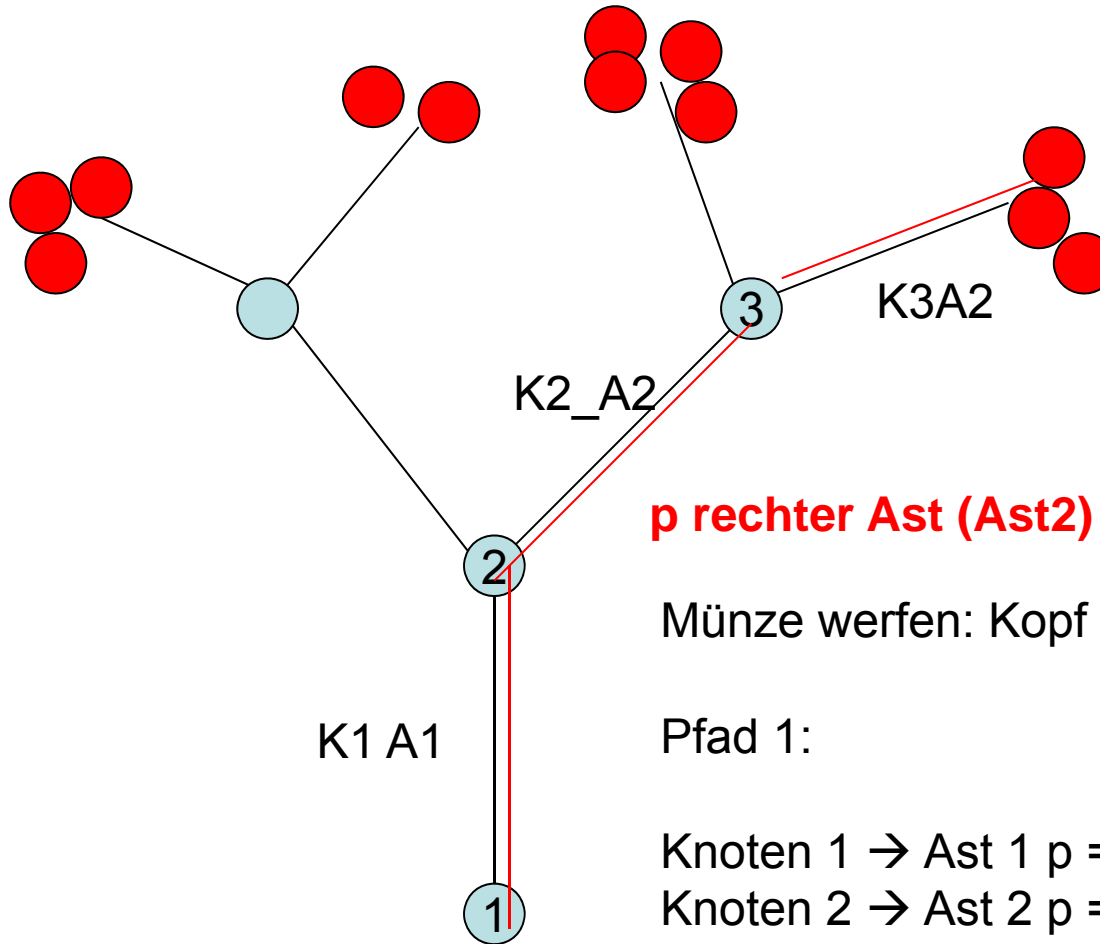
Wiederholen bis zu Abbruchkriterium (kleiner Zweig, Terminaltrieb...)

→ Wahrscheinlichkeit p_R an Knoten R



Auswahlwahrscheinlichkeit bei einer Verzweigung: entweder gleiche Wahrscheinlichkeit für jeden Ast oder abhängig von einer Messgröße (z.B. Astbasisfläche)

Beispiel: wie viele Früchte sind am Baum?



p rechter Ast (Ast2) = ?

Münze werfen: Kopf = Ast 1, Zahl = Ast 2

Pfad 1:

Knoten 1 → Ast 1 $p = 1$

Knoten 2 → Ast 2 $p = 0.5$

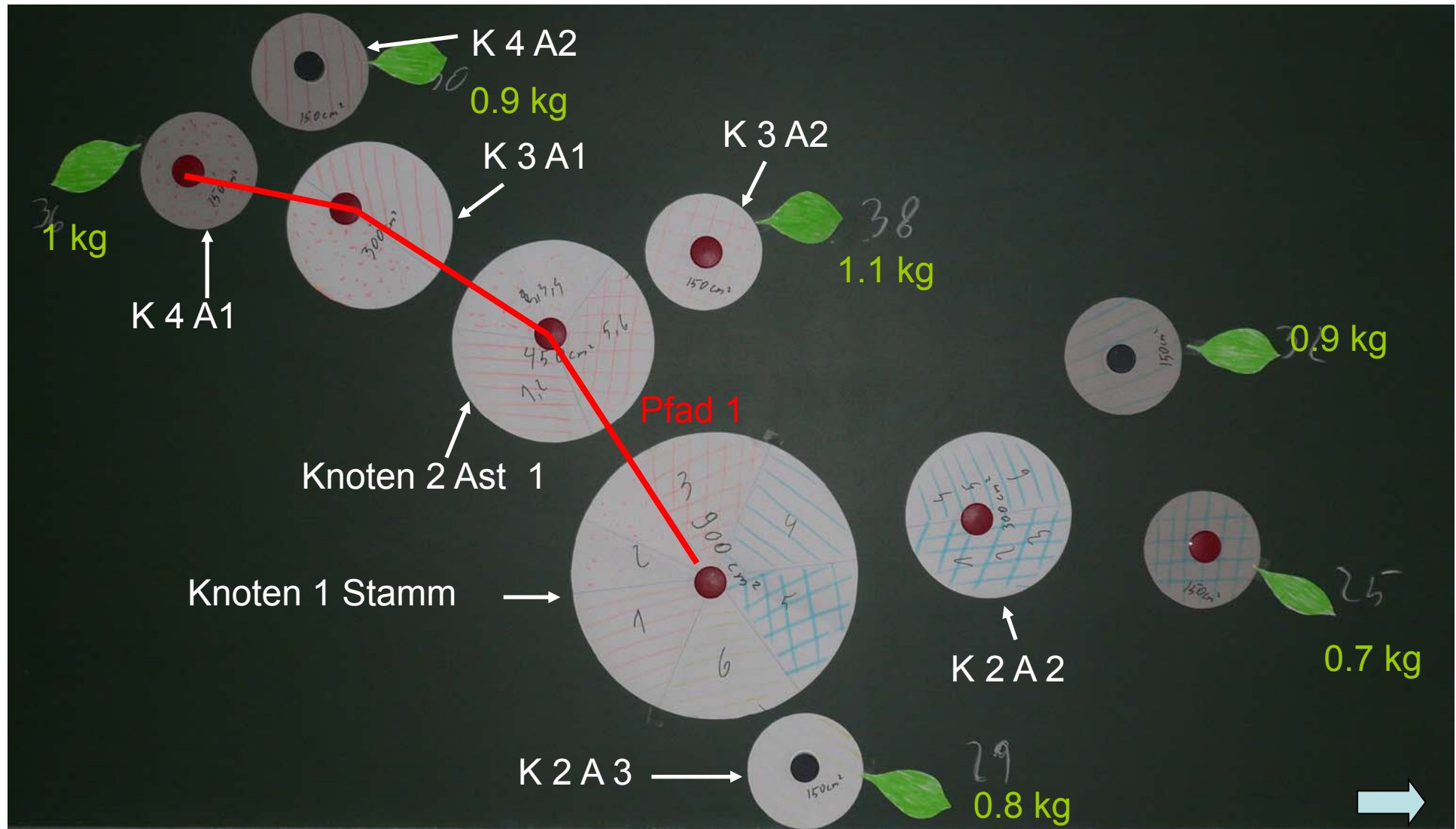
Knoten 3 → Ast 2 $p=0.5$ → 3 Früchte

Wahrscheinlichkeit K3A2 zu wählen: $p_{K1A1} \cdot p_{K2A2} \cdot p_{K3A2} = 1 \cdot 0.5 \cdot 0.5 = 0.25$

Anzahl am Baum = Anzahl Ast K3A2 / Wahrscheinlichkeit K3A2 zu wählen = $3 / 0.25$

→ 12 Kirschen als statistischer Wert aus diesem Pfad

Welche Kohlenstoffmenge ist in den Blättern einer Buche mit 27 cm BHD?



Knoten 1: Stamm (900 cm²)

Knoten 2: 3 Äste (450 cm, 300 cm², 150 cm²) → **Wie hoch ist die von der Astbasisfläche abhängige Wahrscheinlichkeit Ast 1, Ast 2 oder Ast 3 zu wählen?**

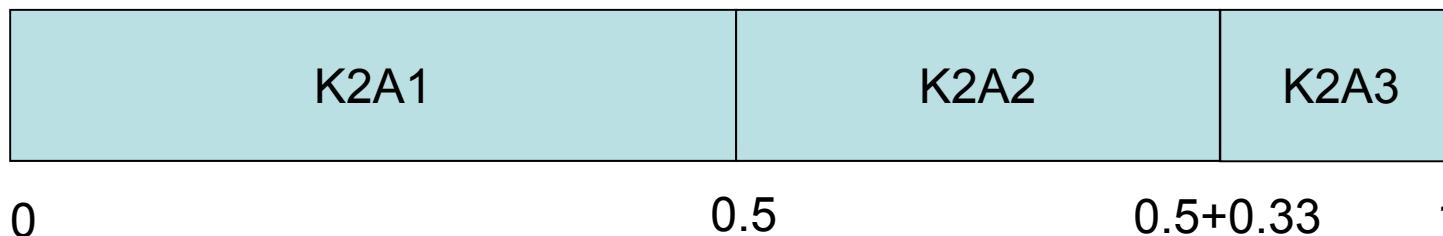
Welche Kohlenstoffmenge ist in den Blättern einer Buche mit 27 cm BHD?

Knoten 2: 3 Äste (450 cm², 300 cm², 150 cm²) → Wie hoch ist die von der Astbasisfläche abhängige Wahrscheinlichkeit Ast 1, Ast 2 oder Ast 3 zu wählen?

$$P_{Knoten2,Ast1} = \frac{Kreisfläche_{Ast1}}{\sum_{i=1}^n Kreisfläche_{Ast_n}} = \frac{450}{450 + 300 + 150} = 0.5$$

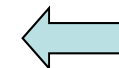
$$P_{Knoten2,Ast2} = 0.33 \quad P_{Knoten2,Ast3} = 0.17$$

Auswahl über Zufallsgenerator



Wenn Zufallszahl ≤ 0.5 dann wähle Ast 1

Wenn 0.5 < Zufallszahl ≤ 0.83 dann wähle Ast 2



Welche Kohlenstoffmenge ist in den Blättern einer Buche mit 27 cm BHD?

Selbe Prozedur bei jedem Knoten entlang des Pfades

Ernte der Blätter am letzten Zweig entlang des Pfades, trocknen, wiegen

→ Blattmasse Zweig

Beispiel Pfad 1:

$$Blattmasse_{Baum} = \frac{Blattmasse_{\text{gewählter Ast, letzter Knoten}}}{\prod_1^{Knoten} p_{Knoten, Ast}}$$

$$p_{Knoten1, Stamm} = 1 \quad p_{K2, A1} = 0.5 \quad p_{K3, A1} = 0.66 \quad p_{K4, A1} = 0.5$$

$$Blattmasse_{Baum} = \frac{1}{1 * 0.5 * 0.66 * 0.5} = 6$$

Schätzung aus Pfad 1: 6 kg Biomasse mit einem C-Gehalt von 50 %, d.h. 3 kg Kohlenstoff

Durchführung: viele Pfade → Mittelwert (aufwändig, teuer, rechenintensiv)

Besser: größeres Terminalsegment wählen (z.B. Abbruchkriterium Ast $d < 5$ cm)
→ besserer ‚Support‘ der Stichprobe, weniger Wiederholungen nötig

Vorteil: Möglichkeit der Beerntung stehender Bäume...

Für Berechnung von Biomasse/C in den Segmenten und im Stamm:

Messung der Durchmesser am Anfang und Ende der Segmente → Berechnung der Volumina als Kegelstumpf (Äste) oder über Basisfläche, Länge, Formzahl (Stamm)

Messung/Schätzung der Dichte (z.B. 0.5 g.cm^{-3})
und des Kohlenstoffgehaltes (0.5 g.g^{-1})

Hochrechnung wie bei Blattmasse demonstriert

Die Methode ist auch für die Bestimmung der Wurzelbiomasse brauchbar



Probenahme und Messung sind aufwändig und teuer

- Messung an einer Anzahl von Individuen einer Baumart
 - unterschiedlicher BHD's, Höhe, Kronenlängen (als Prozent der Höhe)
- Ableitung allometrischer Funktionen

$$\ln(X) = \text{intercept} + \ln(\text{BHD}) + \ln(H) + \ln(1-\text{CRA})$$

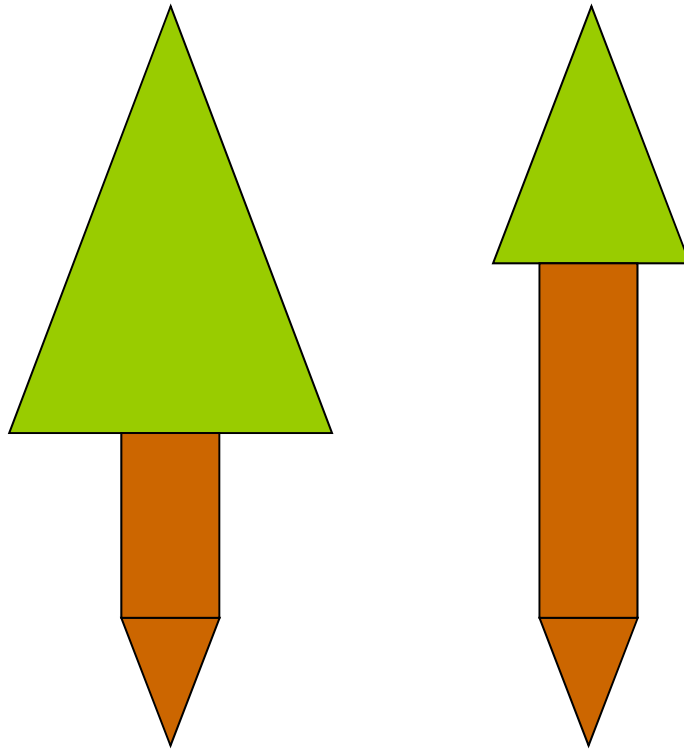
X... Biomasse, Kohlenstoffmenge etc.

BHD...Brusthöhendurchmesser [cm]

H.....Baumhöhe [m]

CRA...Kronenlänge/Baumhöhe [m.m⁻¹]

Funktionen ohne Berücksichtigung des **Kronenanteils** sind höchstens regional gültig (unterstellen gleiche Standortverhältnisse, gleiche Bestandesbehandlung)



Vorsicht bei Extrapolation publizierter Funktionen (v.a. Metaanalysen):
Funktionen nicht linear, Gültigkeit auf Messbereich der Eingangsdaten
beschränkt

Hochrechnung auf Bestandesebene:

- Vollaufnahme (Messung von BHD, H, Kronenanteil aller Bäume)
- Fixe Probekreise
- Winkelzählproben

Anwendung allometrischer Funktionen

Einzelbaumniveau (Vorrat = Summe der Einzelbäume)

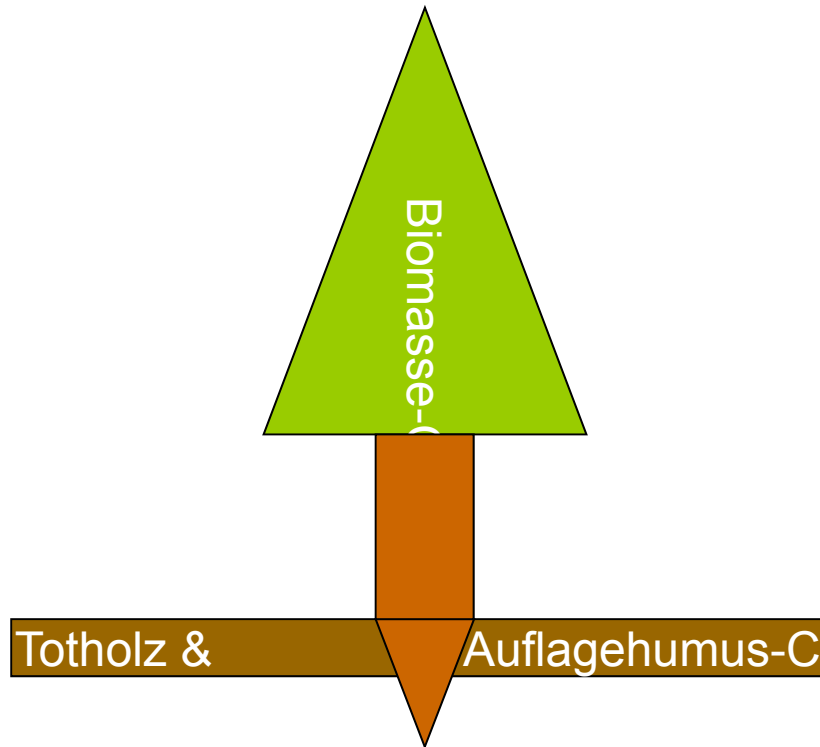
oder

Grundflächenmittelstamm

(Vorrat = Stammzahl * rechnerischer Vorrat Grundflächenmittelstamm)

Der Kohlenstoffhaushalt von Ökosystemen

Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung im Totholz



Totholz stehend:

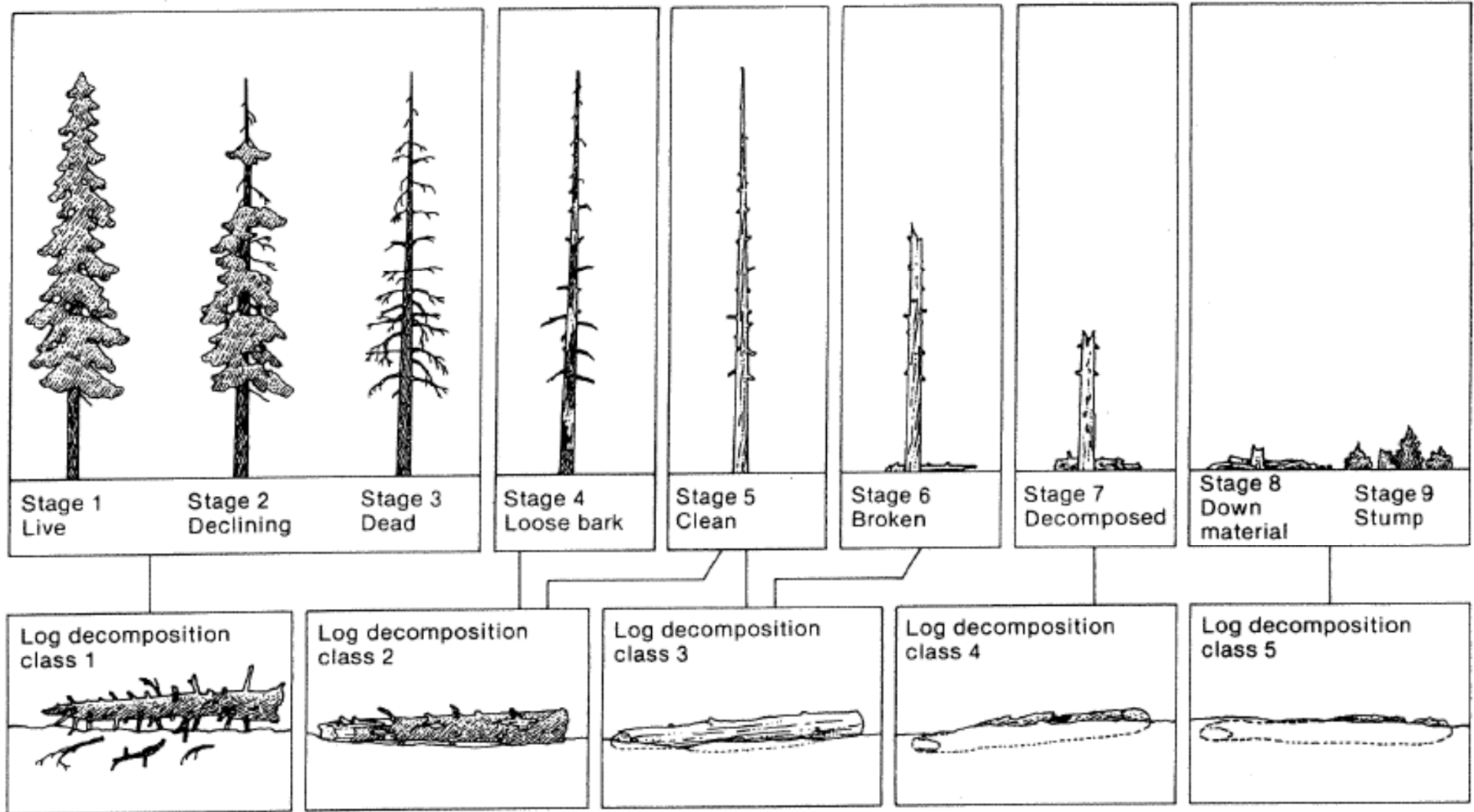
Wie Inventur lebender Bäume, Volumen nach Schafffunktionen, Dichte- und C-bestimmung an Teilproben

Totholz liegend:

Abschätzung für fixen Probekreis nach Zersetzungsgraden

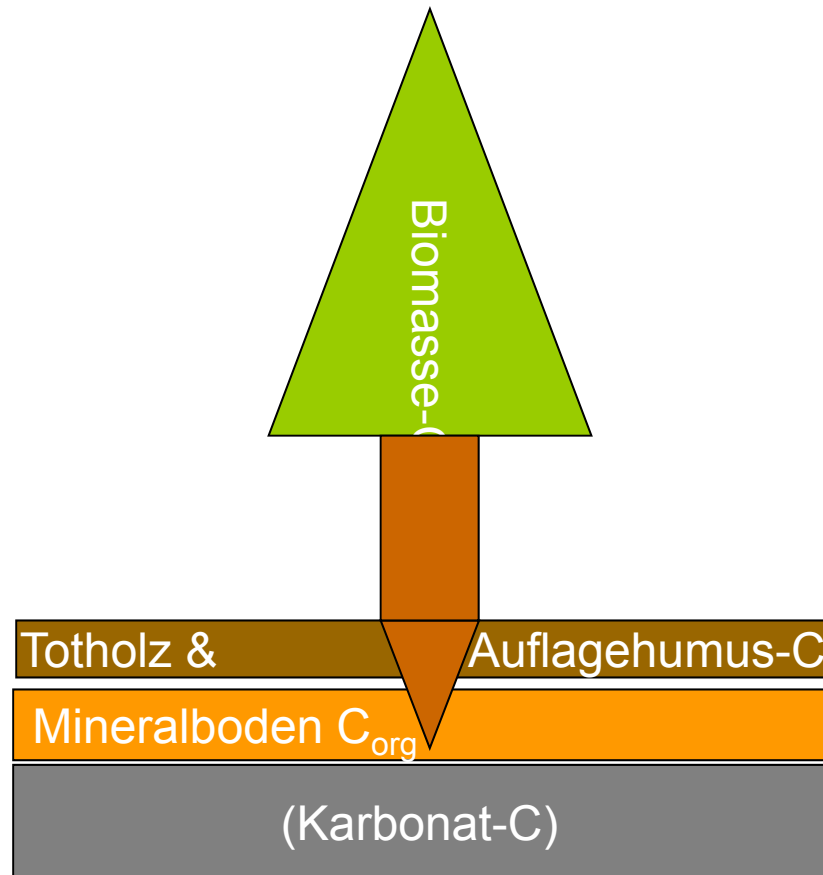


Abschätzung der **Volumina** und **Zersetzungsgrade** Volumsgerechte Entnahme von Teilproben für Dichtebestimmung und C-Analyse



Der Kohlenstoffhaushalt von Ökosystemen

Ermittlung der Kohlenstoffspeicherung im Auflagehumus und Mineralboden



Auflagehumus:

Volumsgerechte Probenahme mit Rahmen (definierte Fläche)

Trennung von Humus, Wurzeln, Steinen

Bestimmung der Trockenmasse

Vermahlen

C-Analyse

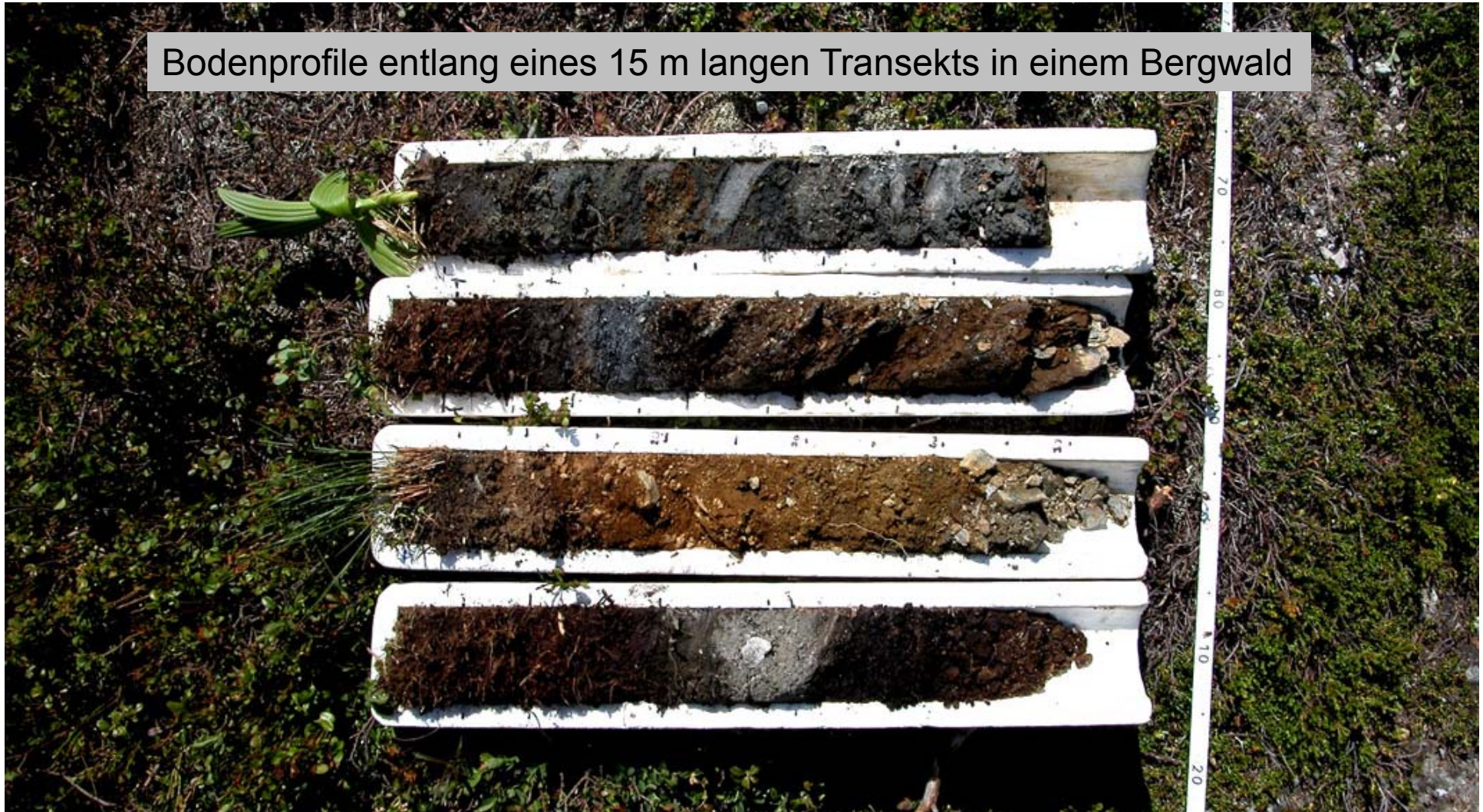
Böden sind heterogen. Stichprobenanzahl und Volumen (Flächenrepräsentanz) der Einzelprobe bestimmen die Genauigkeit der Schätzung

Die Analyse von **MISCHPROBEN** senkt die Analysekosten steigert aber die Genauigkeit der Schätzung!

Bodenprobenahme



Bodenprofile entlang eines 15 m langen Transekts in einem Bergwald



Böden sind heterogen. Stichprobenanzahl und Volumen (Flächenrepräsentanz) der Einzelprobe bestimmen die Genauigkeit der Schätzung

Die Analyse von **ähnlichen MISCHPROBEN** senkt die Analysekosten steigert aber die Genauigkeit der Schätzung!



Wo ist die Untergrenze des Systems? → Vorsicht bei Literaturangaben

Messung der C-Gehalte im Boden: verschiedene Methoden bringen unterschiedliche Ergebnisse

Hier: Trockene Veraschung einer definierten Bodenmenge, Messung des entstehenden CO₂ über Infrarotgasanalysator



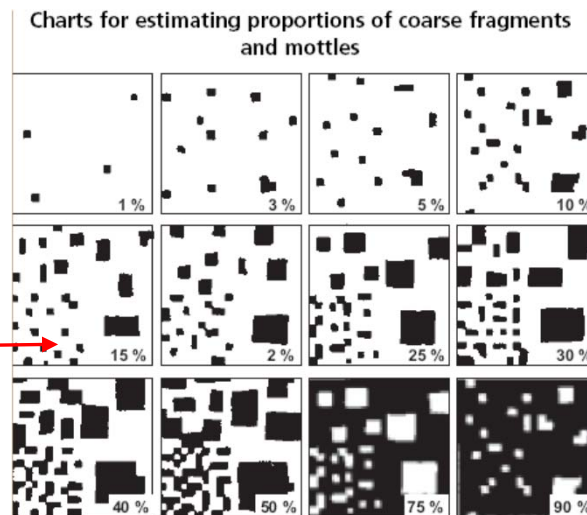
Bei Karbonatböden ist eine Unterscheidung von anorganisch gebundenem C und organisch gebundenem C nötig
(Scheibler Prinzip: $\text{CaCO}_3 + 2 \text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$)!

Neben Stoffgehalten sind Skelettgehalt und Lagerungsdichte wichtige Eingangsgrößen

$$Stoffvorrat = \sum_{Bodenhorizonte} 10 * Stoffgehalt * \rho * Horizontmächtigkeit * (1 - Skelettgehalt / 100)$$



Stoffvorrat [g.m⁻²]
 Stoffgehalt [mg.g⁻¹],
 Lagerungsdichte Feinboden ρ [g.cm⁻³]
 Horizontmächtigkeit [cm]
 Skelettgehalt [Vol.-%]



15%

In Waldbodeninventuren wird oft auf volumengerechte Probenahme verzichtet (abgelegene Standorte, hoher Grobbodenanteil (Blöcke, Steine, Grus > 2 mm))

Daher wird die Vorratsberechnung oft anhand diagnostischer Parameter und mit Hilfe von Pedotransferfunktionen durchgeführt

$$C_{pool} = C_{Vorrat.Aufl.} * Masse_{Aufl.}$$

+

$$\sum_{i=1}^{nHorizonte} C_{Gehalt_Horizont_i} * effektive\ Horizontmächtigkeit\ Horizont\ i * \rho_{b\ Horizont\ i}$$

Lagerungsdichte
Feinboden

Horizontmächtigkeit um **Grobskelettanteil reduziert**

Schätzparameter im Gelände

Pedotransferfunktionen:

Schätzung der Lagerungsdichte von Mineralböden (Kay, 1997):

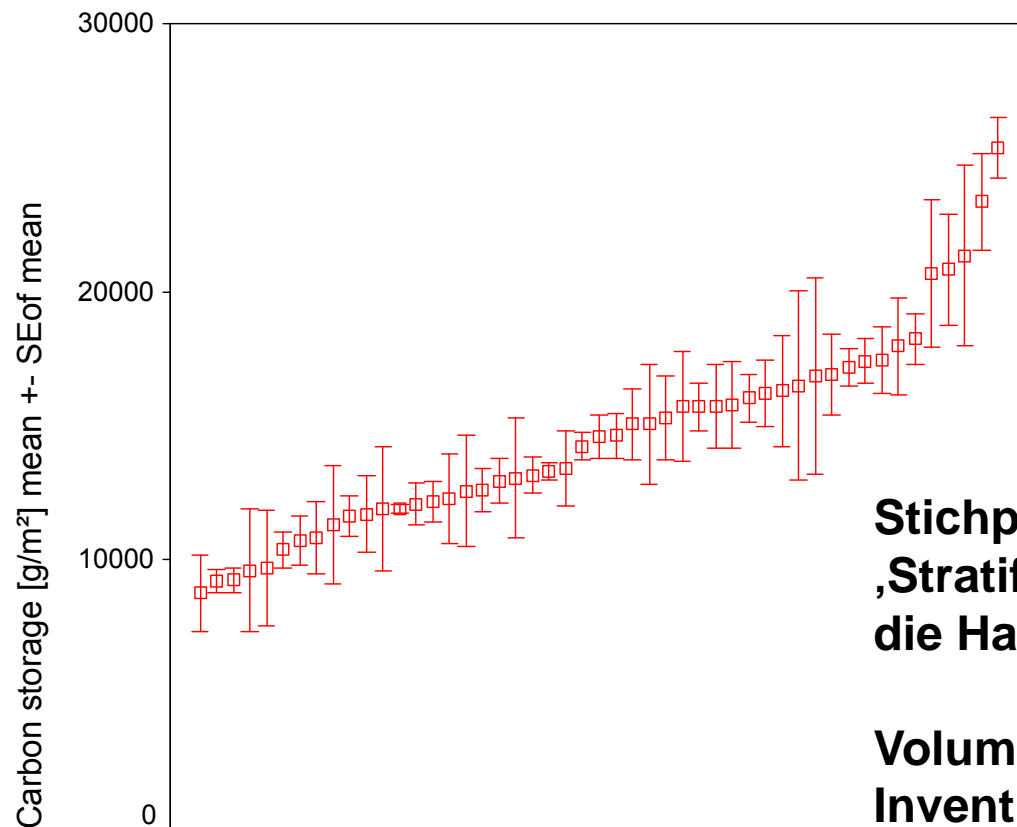
$$\rho_b = \frac{100}{\frac{\text{Humusgehalt} [\%]}{\rho_{b\text{Humus}}} + \frac{100 - (\text{Humusgehalt} [\%])}{\rho_{b\text{Mineralboden}}}}$$

$$C \rightarrow \text{Humus } f = 1.96$$

$$\rho_{b\text{Humus}} = 0.224$$

$$\rho_{b\text{Mineralboden} < 2\text{mm_ohne_Humus}} = 1.4$$

Beispiel: Bodenkohlenstoff in einer 600 ha Testregion im Böhmerwald (Österreich)



**Stichprobendesign:
,Stratifizierte Zufallsstichprobe‘ für
die Hauptstandortstypen**

**Volumetrische Probenahme auf 50
Inventurflächen (5 Humusrahmen á
900 cm² and 5 Profile a 40 cm² bis 50
cm Tiefe auf jeder Fläche)**

Schätzungen gut, Variabilität hoch

Bestimmung der Vorräte ✓

Änderung der Vorräte:

Vorratsänderung = Vorrat t1 – Vorrat t0

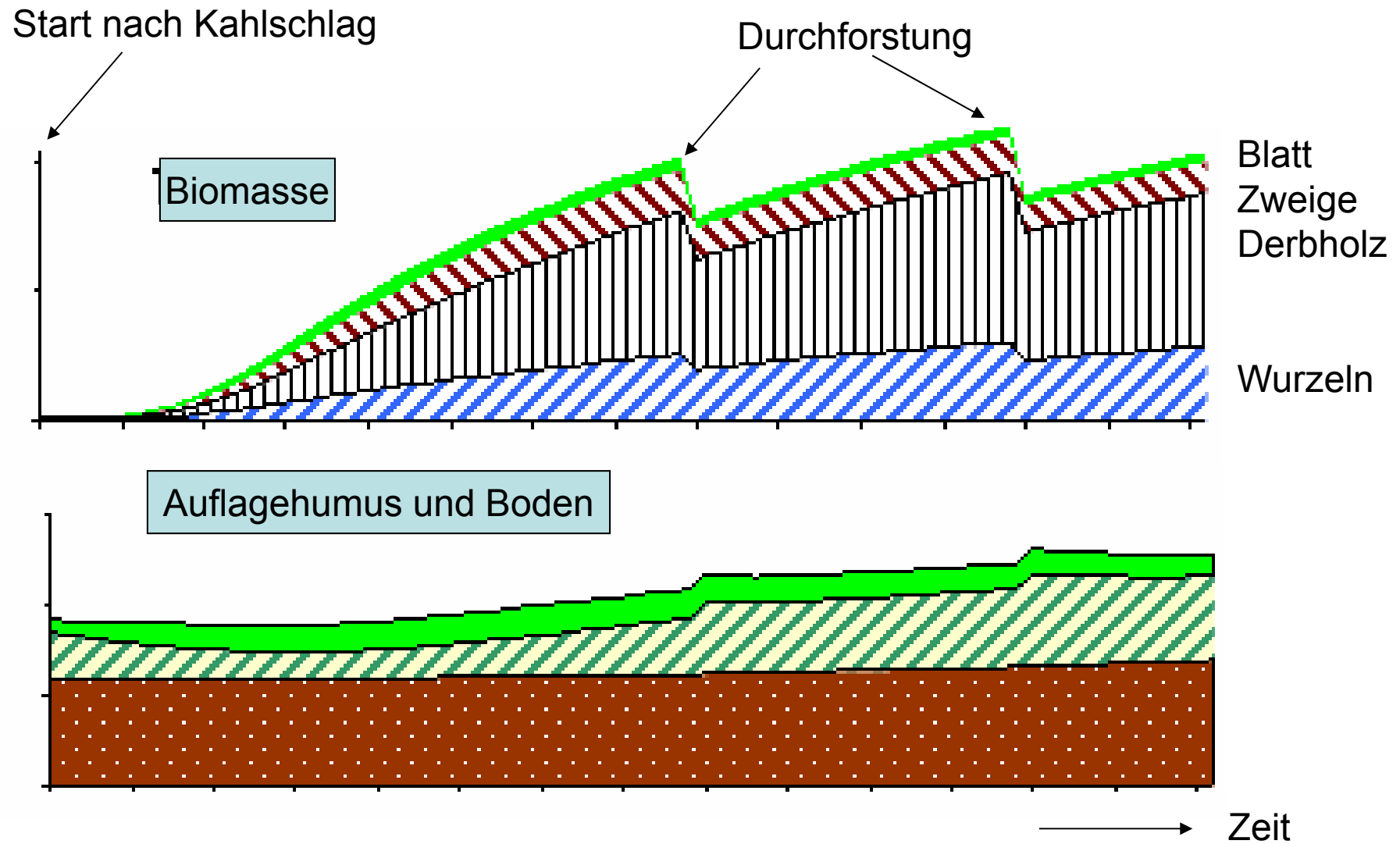
e.g. wiederholte Inventuren

+ Integrieren über lange Zeiträume

- Ein langer Zeitraum in einem Waldökosystem

**...Eucalyptus: Umtriebszeit 7 Jahre, Kiefernplantage
30 Jahre, Österreichische Wälder 100 Jahre....**

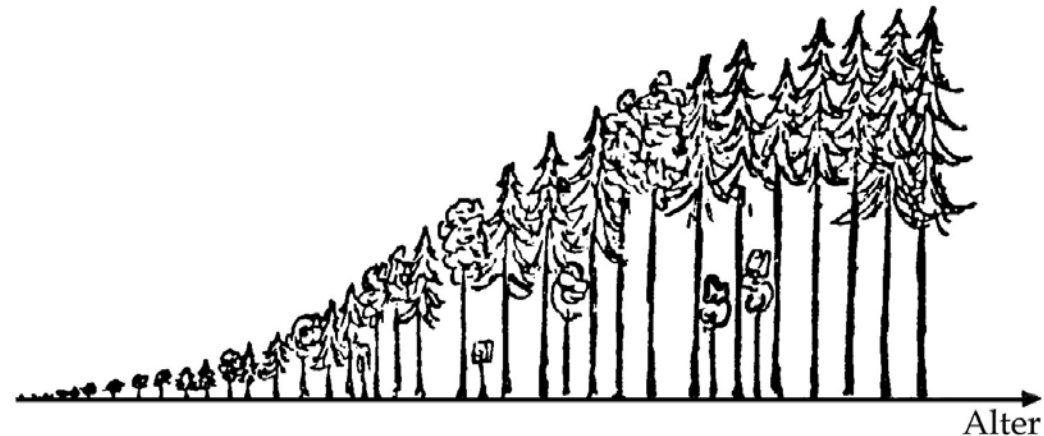
C-Dynamik in einem Wirtschaftswald



Bestimmung der Speicheränderungen: Messung in regelmäßigen Abständen über die Umtriebszeit oder?

Chronosequenz (Pseudo- oder falsche Zeitreihe, bei Biomasseerhebung auch als **Wuchsreihe** bezeichnet):

Beobachtung einer Fläche über viele Jahre (Perioden) wird durch die Beobachtung vieler Flächen unterschiedlichen Alters zum gleichen Zeitpunkt ersetzt

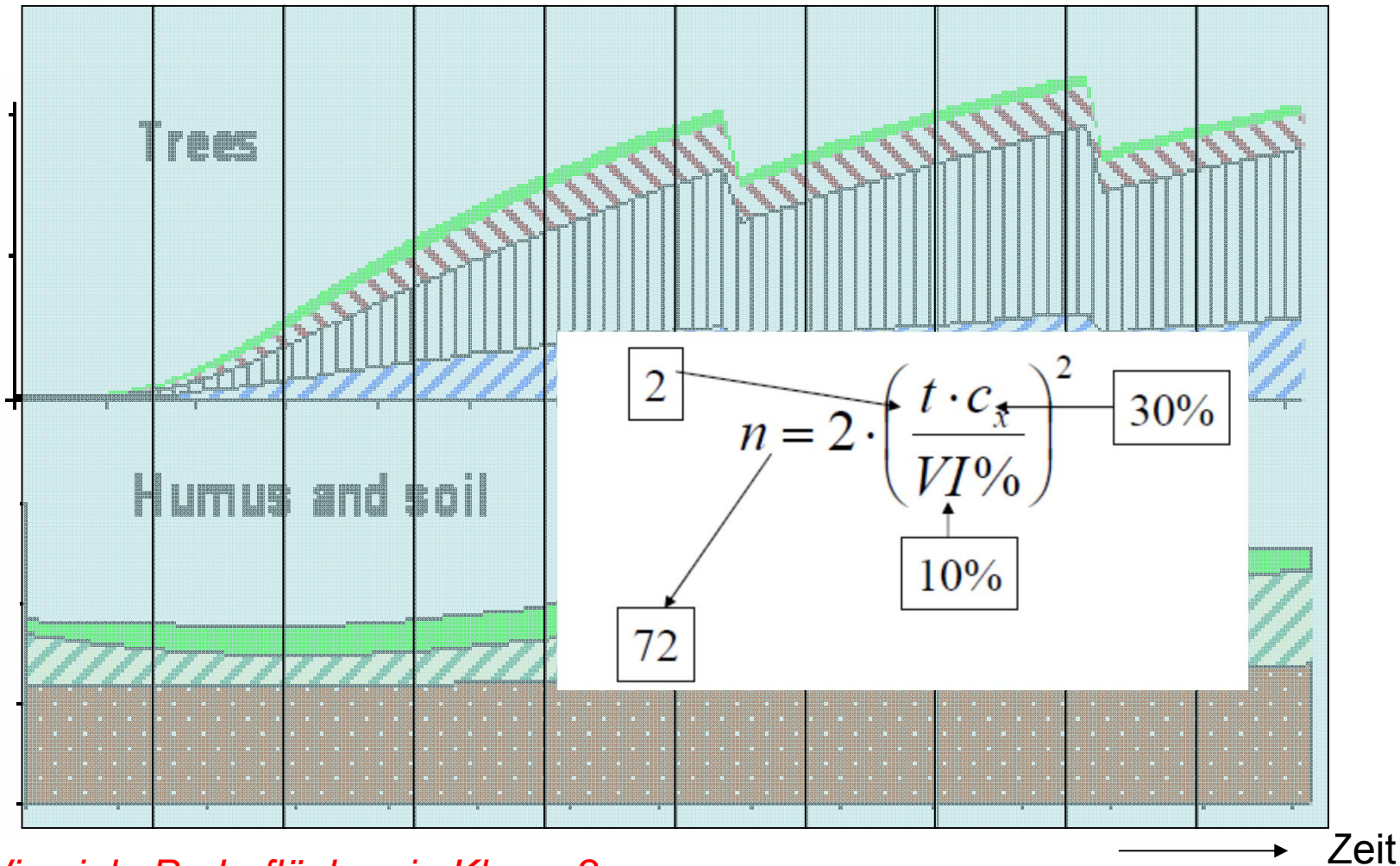


Annahmen:

- Die Wachstumsgrößen einer Probefläche hatten n Jahre davor die gleiche Größe, wie jene der n -Jahre jüngeren Probeflächen
- ähnliche Standortbedingungen (auf Fläche und über Zeit)
- gleiche Behandlung (e.g. ein Bestand im Alter 100 hatte vor 90 Jahren die gleiche Behandlung wie ein heute 10-jähriger Bestand)

Chronosequenz - Auswahl von Probeflächen:

Einteilung in Altersklassen (z.B. bei 100 Jahren Umtriebszeit 10 Klassen)



Wie viele Probeflächen je Klasse?

Wenn die Unterschiede zwischen den Altersklassen signifikant sein sollen kommt man auf enorm hohe Stichprobenanzahlen (ca. 70 je Klasse)

Chronosequenz - Auswahl von Probeflächen für Biomassemodelle

Wie viele Probeflächen je Klasse?

So viele dass die Beziehungen

$Oberhöhe = f(\text{Alter})$

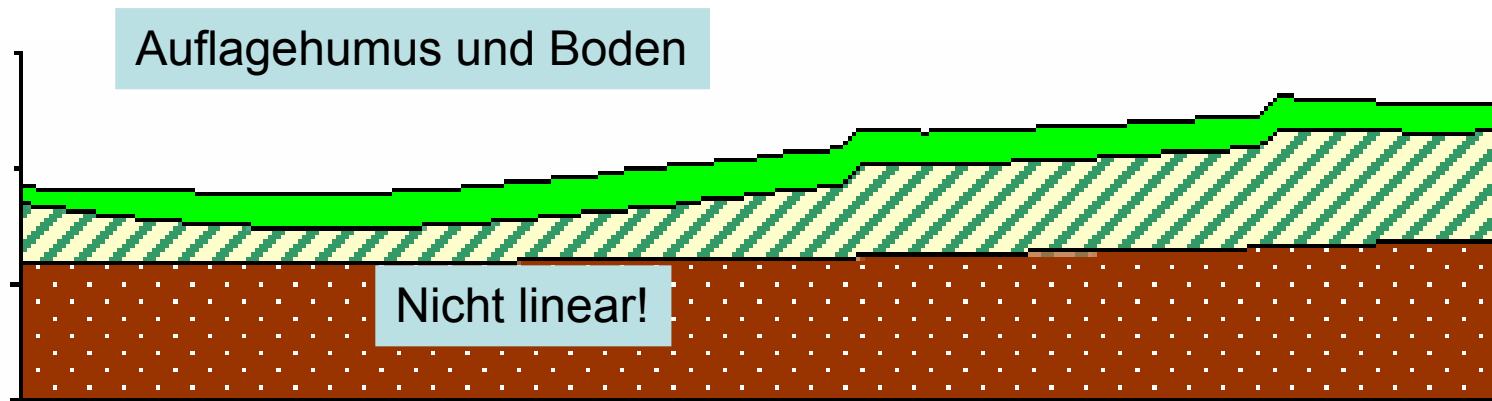
$N \cdot ha^{-1} = f(\text{Oberhöhe})$

$V \cdot ha^{-1} = f(\text{Oberhöhe})$

mittels Regression angepasst werden können

→ *Es genügen meist 3 bis 5 Probeflächen je Altersklasse*

→ *Ähnliches gilt für Boden-C-Vorrat = f (Alter der Probefläche)*



Chronosequenz – *Gesamtwuchsleistung über die Zeit?*

$$V_{Gesamt, Alter=t} = V_t + \sum^t V_{ausgeschieden}$$

Durchforstung, Mortalität: Unbekannt bei temporären Probeflächen!

Simple Annahme:

mittleres $v_{ausgeschieden} \sim 0.5$ mittleres $v_{verbleibend}$

Besser:

mittleres $v_{ausgeschieden} \sim k$.mittleres $v_{verbleibend}$

$$k = \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^{\frac{\ln \frac{N^2}{3000}}{c \cdot \ln V}}$$

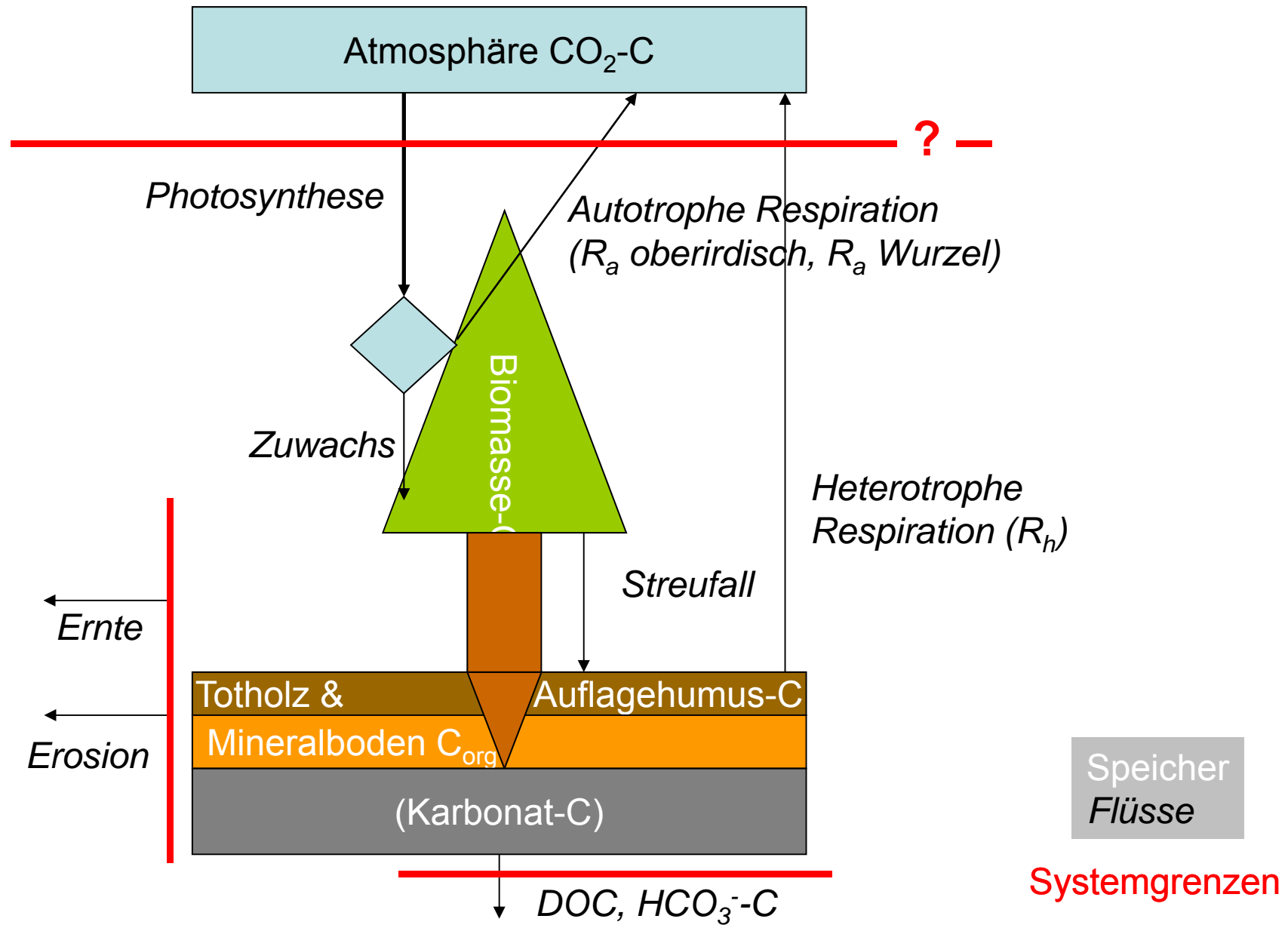
V ... Volumen am Zeitpunkt 2

N... Stammzahl verbleibend

ΔN ... Abnahme der Stammzahl zwischen Zeitpunkt 1 und 2

c... Faktor zwischen 1 (schwache Niederdurchforstung) und 7 (starke Hochdurchforstung)

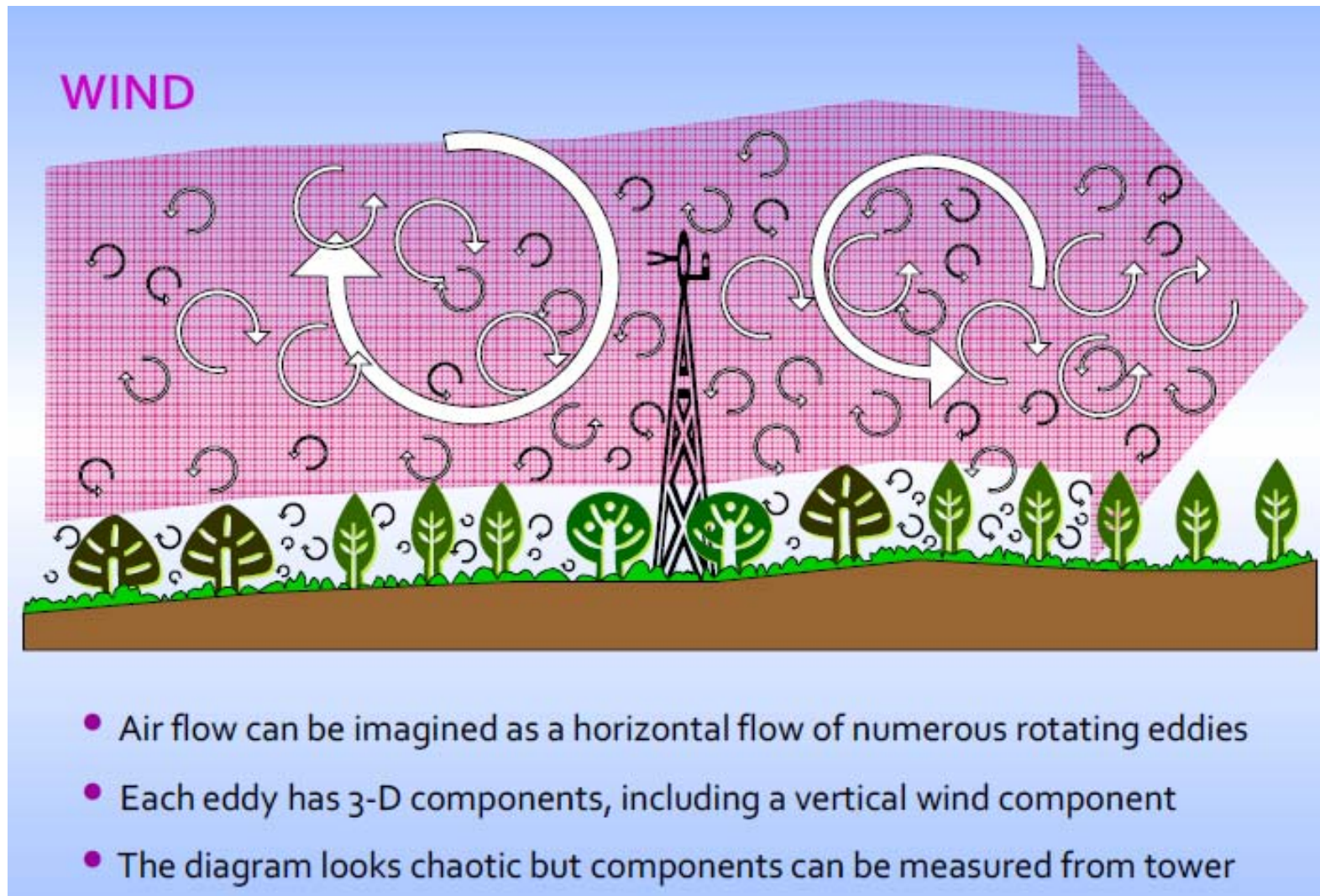
Der Kohlenstoffhaushalt von Ökosystemen



CO₂-Flüsse Atmosphäre/Ökosysteme

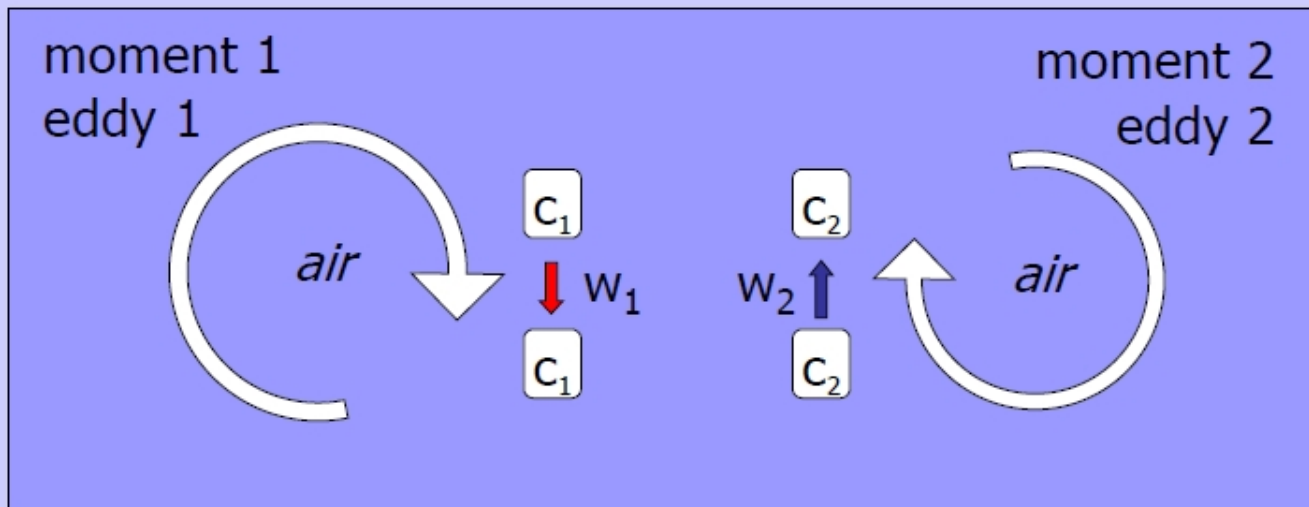


Die Messung turbulenter Flüsse in der atmosphärischen Grenzschicht mit der 'Eddy Covariance method'



Gilt für Gase (Wasserdampf, CO₂), Wärme...

Source: Burba & Anderson: Brief Guide To Eddy Covariance Measurements



- At moment 1, on the tower, eddy 1 moves air parcel c_1 downward with the speed w_1
- At moment 2, on the tower, eddy 2 moves air parcel c_2 upward with the speed w_2
- Each parcel has instantaneous concentration, temperature, humidity
- If we know these and vertical wind speed – we could compute the flux



Recording 3 d windspeed with a sonic anemometer and CO_2 and water vapour concentration at a rate of **10 Hz**

Measuring turbulent fluxes using the Eddy Covariance method

$$wh_{cov} = \overline{w'h'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i h_i - \overline{w} \overline{h} = \overline{(w - \overline{w}) * (h - \overline{h})}$$



$$\overline{w} = -0.5 \text{ m.s}^{-1}$$
$$\overline{h} = -7.5 \text{ g.m}^{-3}$$

mean wind direction

$$\text{Eddy 1: } (1 - (-0.5)) * (8 - 7.5) = 0.75 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

1 m/s,
8 g/m³

-2 m/s,
7 g/m³

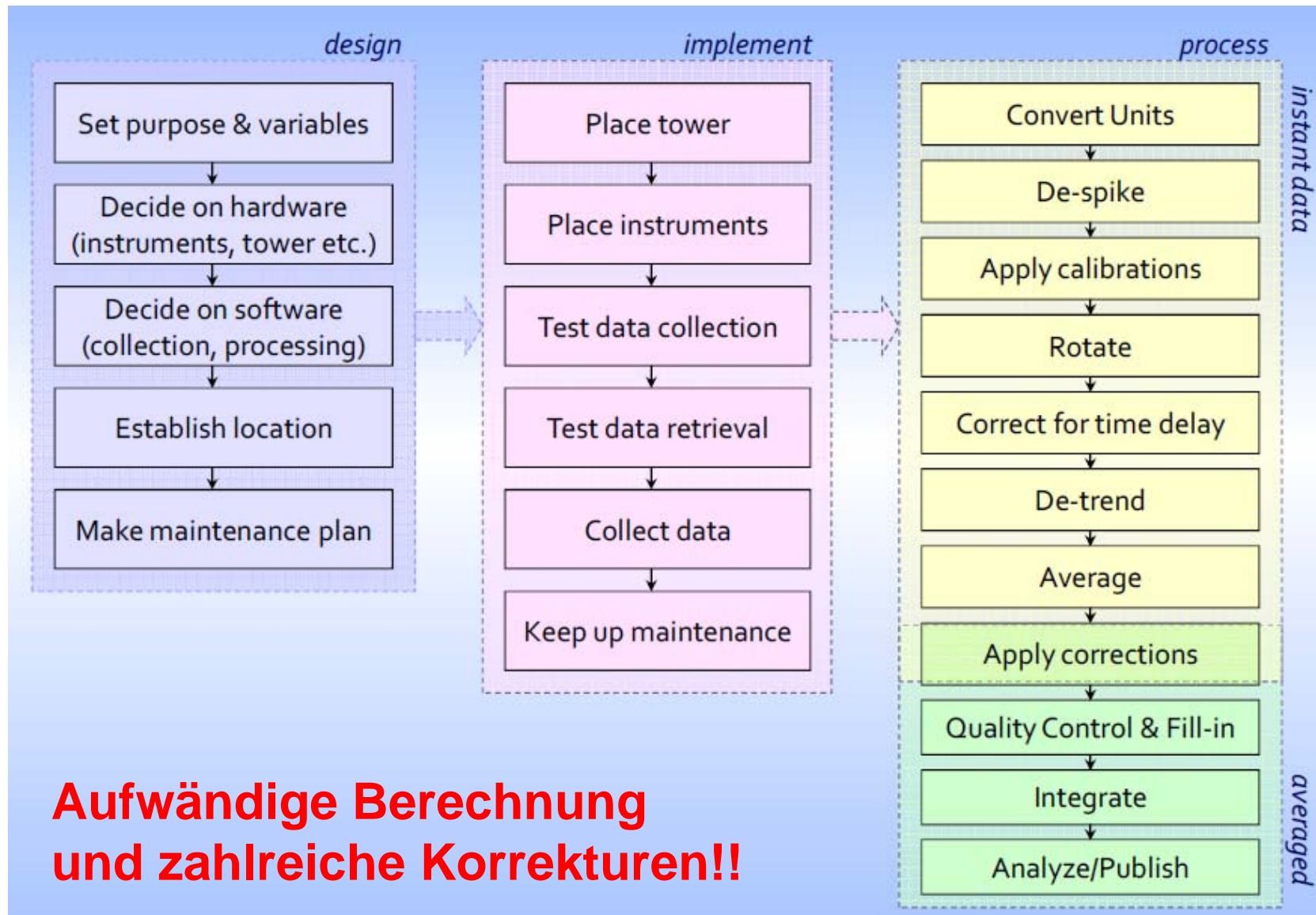
$$\text{Eddy 2: } (-2 - (-0.5)) * (7 - 7.5) = 0.75 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

Beispiel: Wasserdampffluss (Verdunstung)

(10Hz)

$$\frac{1}{2} * (0.75 + 0.75) \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$
$$= 0.75 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Eddy Covariance – typical workflow



EC method – data correction

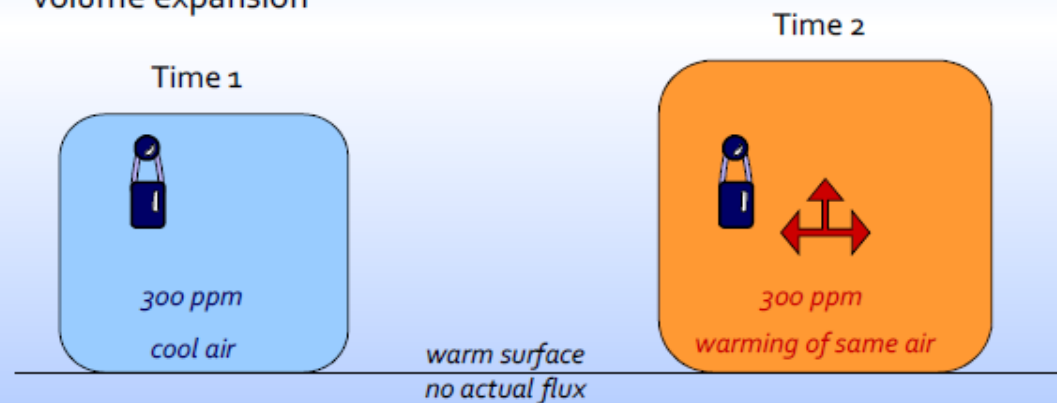
Procedures	Affected fluxes	Effect	Range
Spike removal	all	depends	0-15%
Time delay	mostly closed path	increases flux	5-15%
Coordinate rotation	all	depends	0-25%
Frequency response corrections	all	increase flux	5-30%
Webb-Pearman-Leuning correction	H ₂ O, CO ₂ , CH ₄	depends	0-50%
Sonic temperature correction	sensible heat	depends	0-10%
Band-broadening correction for NDIR	mostly CO ₂	depends	0-5%
Spectroscopic effects for LASERs	any gas	depends	0-30%
Oxygen correction	some H ₂ O	depends	0-10%

Korrekturen können hohen Anteil am Gesamtfluss ausmachen

Source: Burba & Anderson: Brief Guide To Eddy Covariance Measurements

Webb-Pearman-Leuning correction

- Compensates for the effects of fluctuations of temperature (thermal expansion) and water vapor (dilution) on measured fluctuations in CO₂, H₂O, and other gases.
- One way to understand this process is by imagining a surface with actual zero flux and with warming air of constant gas concentration
- As a result of the warming, the instrument measures flux because of volume expansion



Source: Burba & Anderson: Brief Guide To Eddy Covariance Measurements

Adopted from Baldocchi, 2006

Oberfläche ohne Fluss

Volumenausdehnung bei Erwärmung führt zu ‚scheinbaren‘ Fluss der durch das Instrument gemessen wird

CO₂

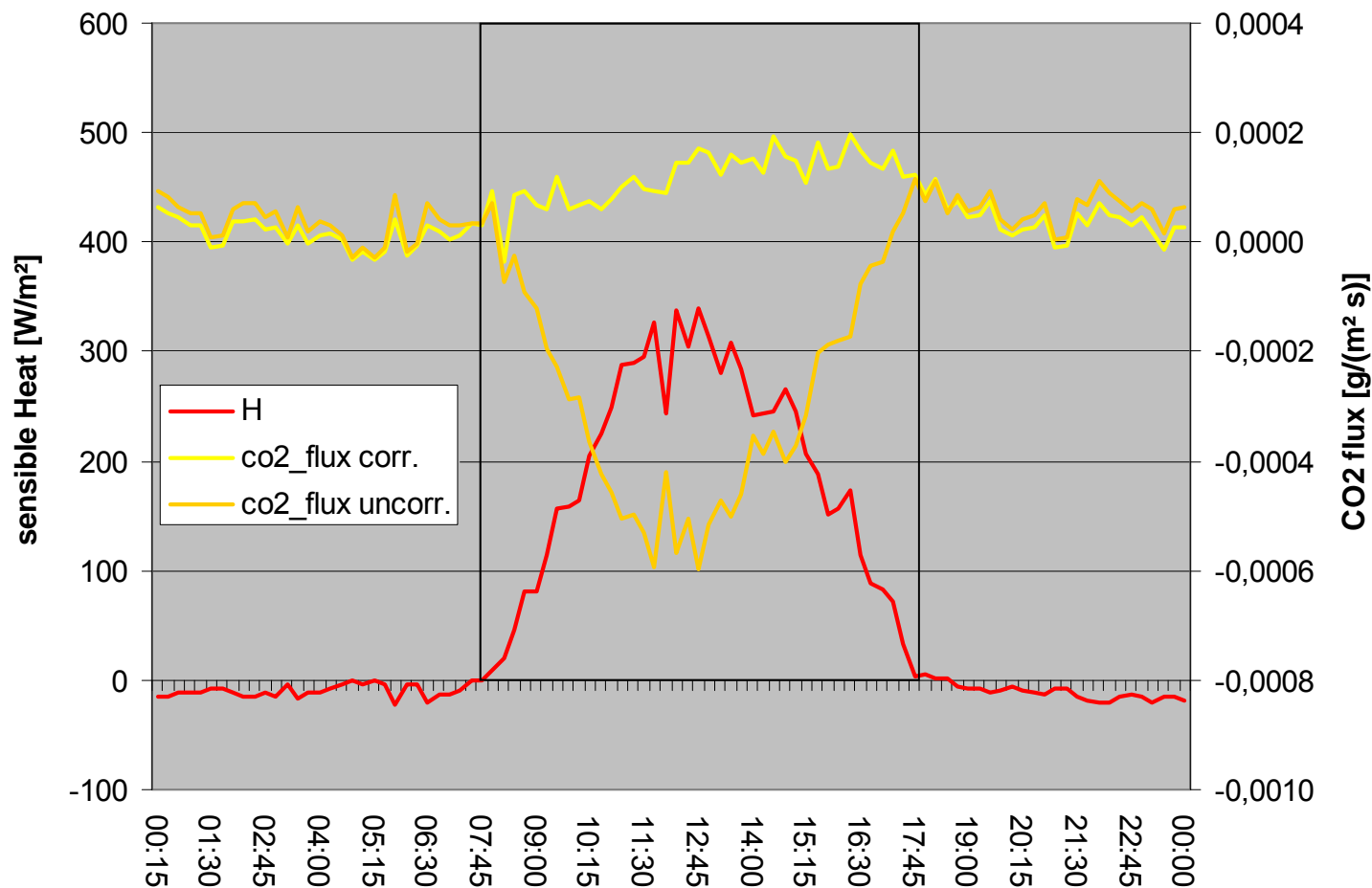
Wasserdampf

$$F_{ct} = F_{co} + \underbrace{1.6077 \frac{E_t}{\rho_d}}_{\text{Water Flux Term (water dilution)}} \underbrace{\frac{q_c}{1 + 1.6077 \frac{\rho_v}{\rho_d}}}_{\text{Heat Flux Term (thermal expansion)}} + \frac{S_z}{\rho C_p T_a} \frac{q_c}{\rho_d}$$

$$E_t = \underbrace{(1 + 1.6077 \frac{\rho_v}{\rho_d}) E_o}_{\text{Water Flux Term (water dilution)}} + \underbrace{(1 + 1.6077 \frac{\rho_v}{\rho_d}) \frac{S_z}{\rho C_p T_a} \frac{\rho_v}{\rho_d}}_{\text{Heat Flux Term (thermal expansion)}}$$

WPL Korrektur – Senke wird zu Quelle

Über einer Windwurflläche am Sonnhang ist der **unkorrigierte CO₂-Fluss** untertags dem sensiblen Wärmestrom H gegengleich. Nach Korrektur um den offensichtlich hohen Einfluss von H wird die scheinbare **Senke zu einer Quelle**



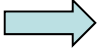
Kontrolle der Plausibilität der Ergebnisse über die Energiebilanz

Energy balance:

$$R_n = G + J + \Phi + H + LE$$

$$H/LE = \beta \dots \text{Bowen ratio}$$

R_n Nettostrahlung / *Net radiation*
 G Bodenwärmestrom / *Ground flux*
 J Heat flux into stand biomass and air
 Φ Photosynthetic flux
 H Sensibler Wärmestrom / *Sensible heat flux*
 LE Latenter Wärmestrom / *Latent heat flux*

Der latente Wärmestrom LE (Energieverbrauch für den Phasenübergang bei Verdunstung) lässt sich aus der Eddy-Kovarianzmessung berechnen (Wasserdamffluss) 

Ebenso die Erwärmung der Luft (sensibler Wärmestrom)

Der Übergang von der flüssigen bzw. festen Phase zur Gasphase benötigt die Zufuhr von ENERGIE

Für Wasser:

Verdampfungswärme (flüssig \leftrightarrow gasförmig): L_v

2496.7 [J*g⁻¹] bei 0°C; Abnahme von 2.266 [J*g⁻¹] pro Grad Temperaturanstieg

Schmelzenergie (flüssig \leftrightarrow fest): L_{Sch}

333.1 [J*g⁻¹]

Sublimationsenergie (fest \leftrightarrow gasförmig): $L_{Sub} = L_v + L_{Sch}$

2829.8 [J*g⁻¹]

Die beim obigen Phasenübergang aufgenommene oder abgegebene Wärmemenge wird als **latente (verborgene) **Wärme** bezeichnet. Die Aufnahme oder Abgabe dieser Wärme führt zu keiner Temperaturänderung!**

EC method – conversion to energy fluxes

$$wh_{\text{cov}} = \overline{w'h'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i h_i - \overline{w} \overline{h} = \overline{(w - \overline{w}) * (h - \overline{h})}$$

$$ET = \overline{w'h'}$$

w....vertical wind speed [m^*s^{-1}]

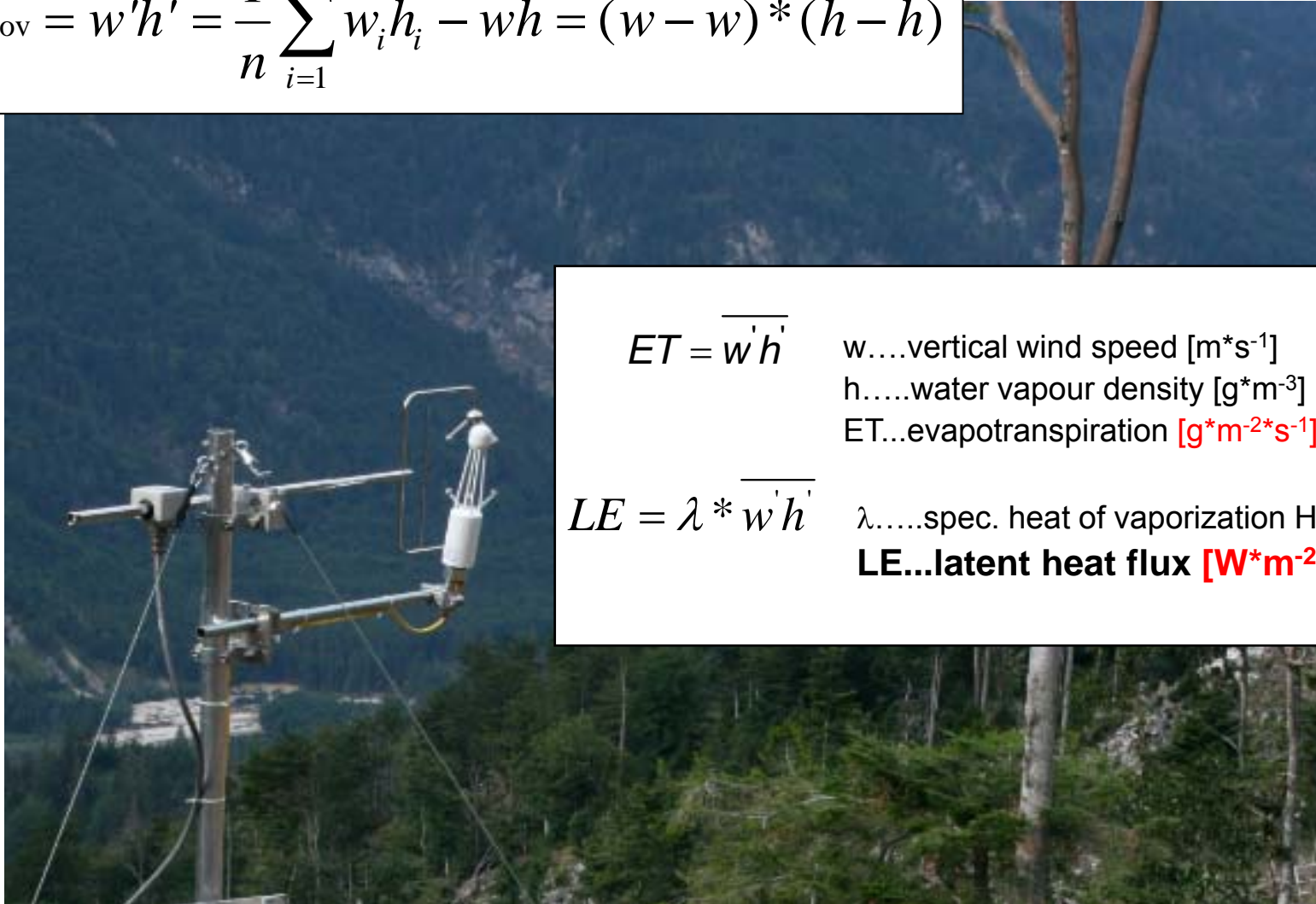
h....water vapour density [g^*m^{-3}]

ET...evapotranspiration [$\text{g}^*\text{m}^{-2}^*\text{s}^{-1}$]

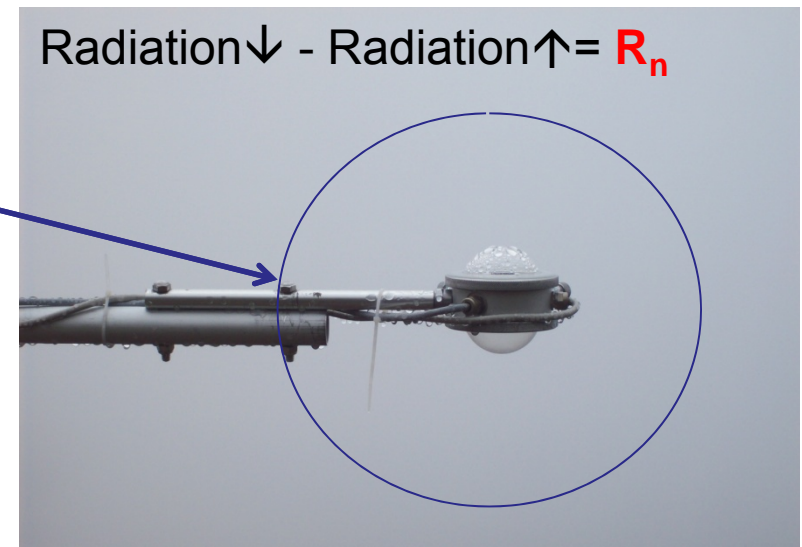
$$LE = \lambda * \overline{w'h'}$$

λspec. heat of vaporization H_2O [J^*g^{-1}]

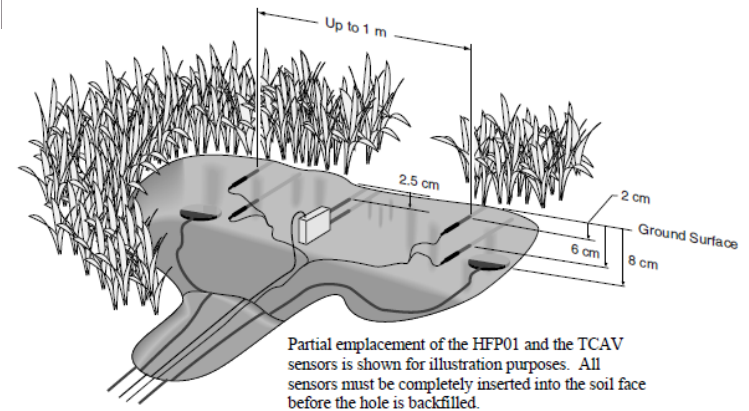
LE...latent heat flux [W^*m^{-2}]



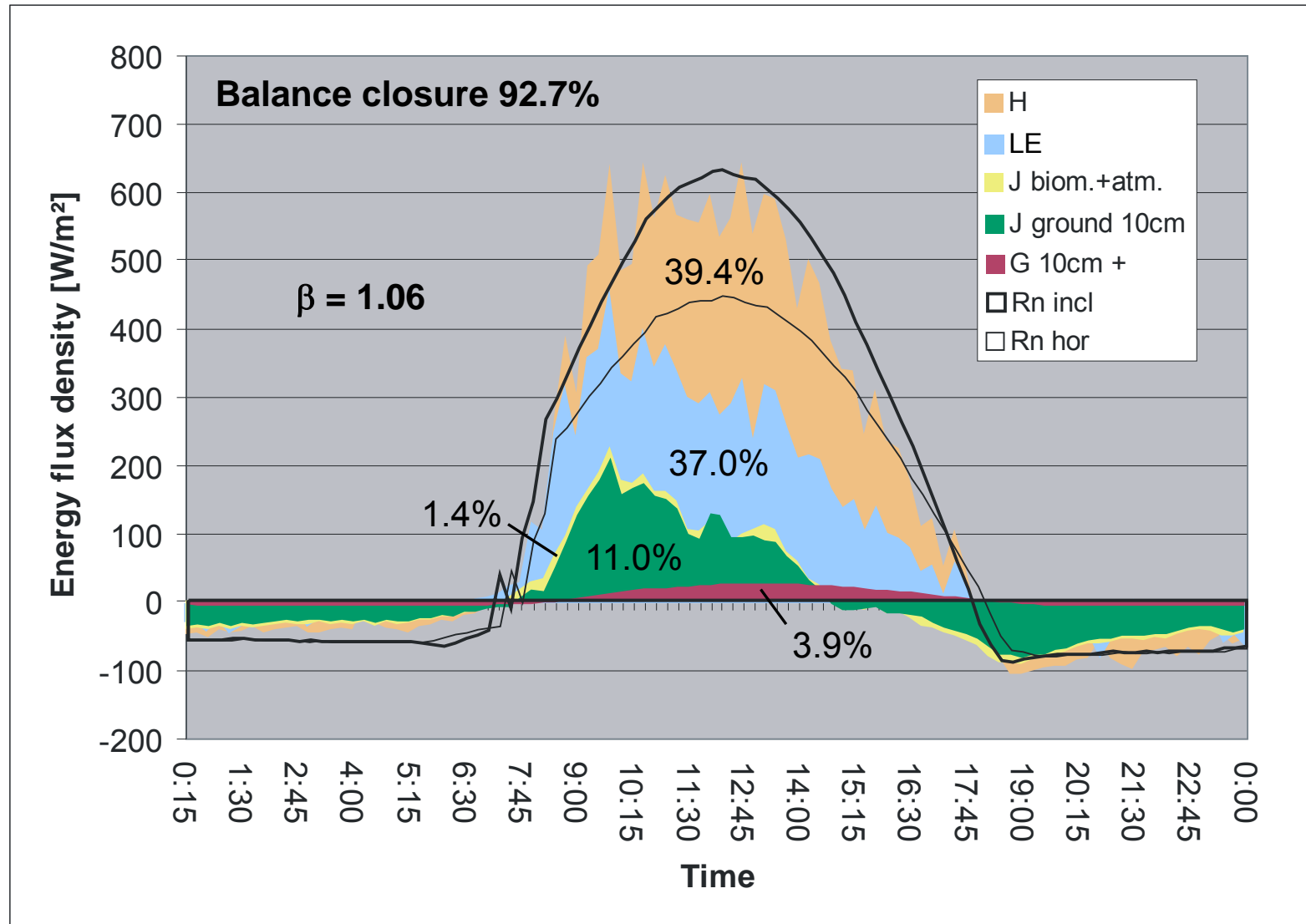
Nettostrahlung, Bodenwärmestrom und Bestandeswärmestrom lassen sich messen



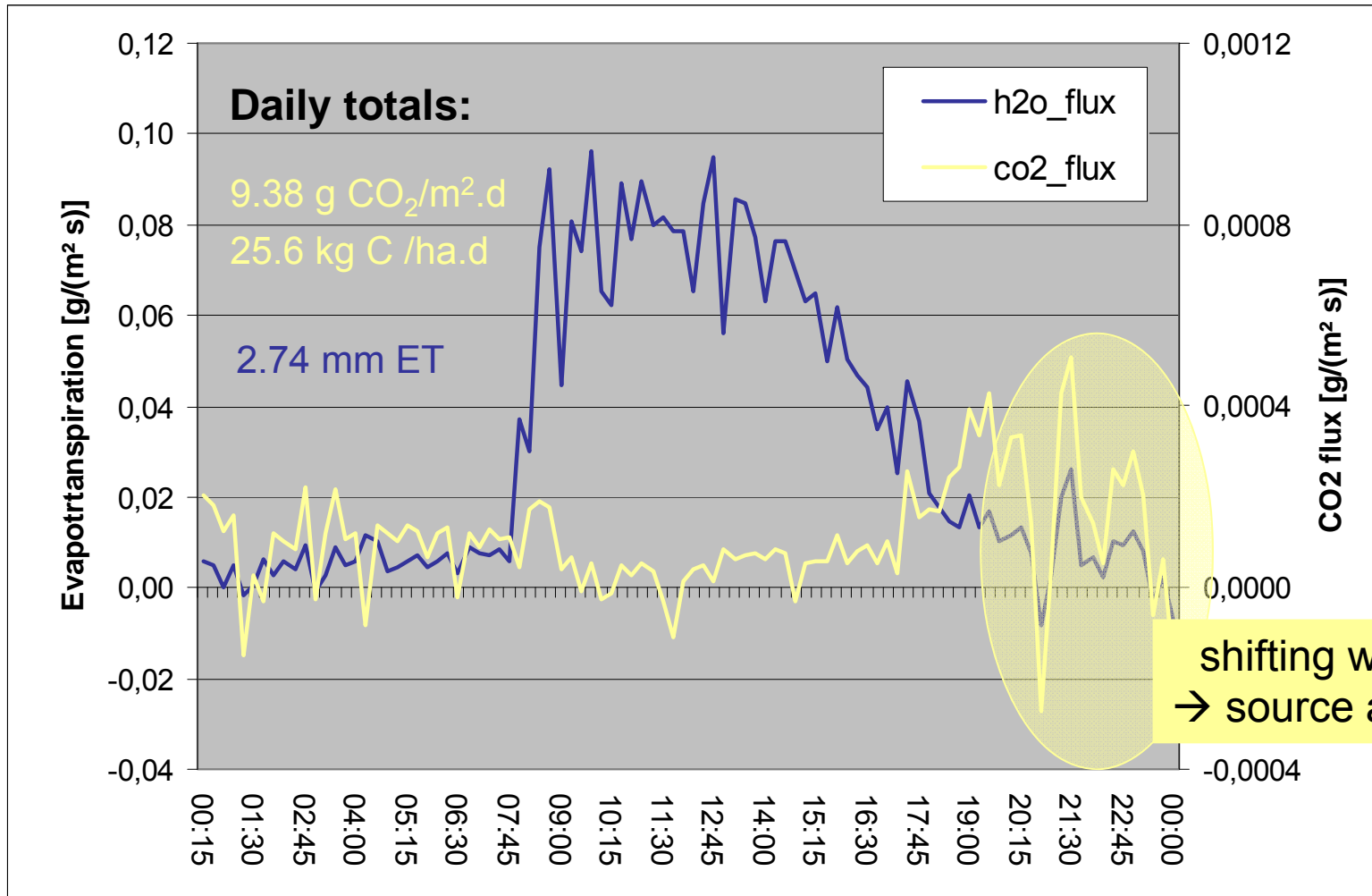
Weighted averages for G , J and R_n based on mapping data



Energy fluxes on 26th of August 2011

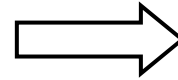


Water and CO₂ fluxes for 26th of August 2011



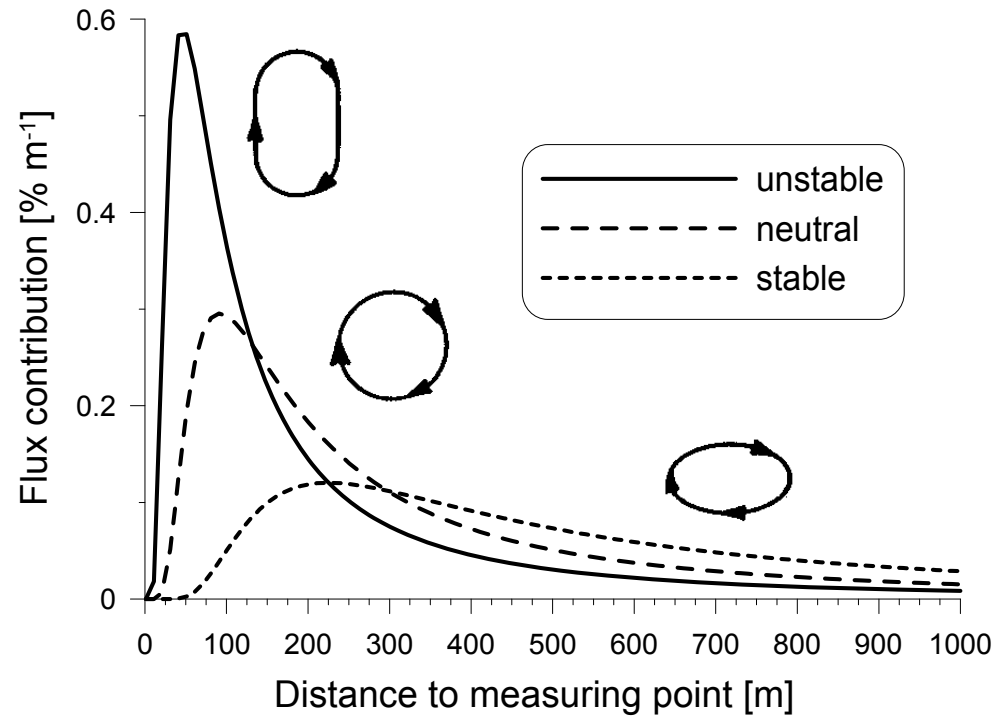
Einschränkungen für Eddy-Messungen

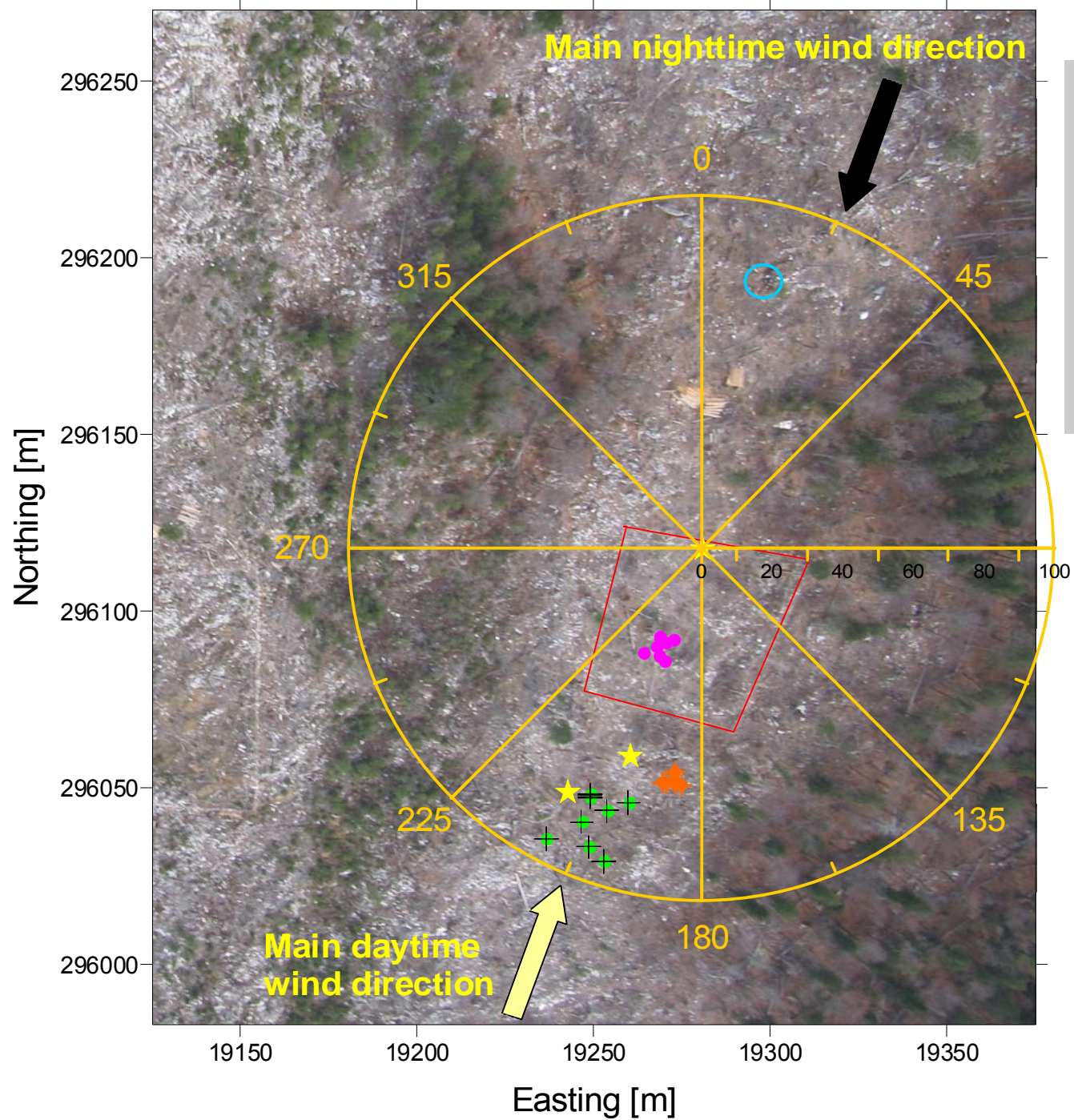
Lage und Größe der Quellfläche sind variabel und hängen ab von:



Homogene Umgebung nötig (Landbedeckung)

- Windgeschwindigkeit
- Messhöhe und Bestandeshöhe
- Stratifizierung der Atmosphäre
- Windrichtung





- ★ Meteorological devices
- Permanent CO2 cuvettes
- Mini watershed
- Origin of peak fluxes
- Distance of 90% flux contribution

Woher kommt das CO₂

Beispiel: Windwurffläche
am Sonnhang

20. September 2010

Die Messung interner Flüsse:

**1. Photosynthese: Beobachtungseinheit: Blatt
Zeit: Minuten!**

**→ Wertvolle Information über Reaktion auf
Umweltbedingungen (e.g. Licht, CO₂)**

**2. Autotrophe Respiration → Blatt, Stamm: Messung über Küvetten
(Blatt: Nachtmessung)**

3. Autotrophe + Heterotrophe Respiration Boden+Wurzel

**Wie trenne ich beide? Z.B. Unterbrechung des
Phloemflusses Blatt → Wurzel
oder ‚Trenching‘ (Ausschluss von Wurzeln aus
definiertem Bodenvolumen)**

Quantifizierung der **Bodenrespiration** (Mayer)

a. Hohe zeitliche Auflösung: 6 Küvetten



b. Hohe räumliche Auflösung:



Closed Chamber Systeme:

Über kurze Intervalle wird der CO₂-Anstieg in einer Küvette die am Boden aufgesetzt wird mit einem Infrarot-Gasanalytator gemessen

A photograph of a winter landscape. In the foreground, there are snow-covered evergreen trees and branches. The background shows a valley with a forest of evergreen trees, surrounded by mountains under a blue sky with some clouds. The text "Muito obrigado por sua atenção !" is overlaid in the center of the image.

Muito obrigado por sua atenção !