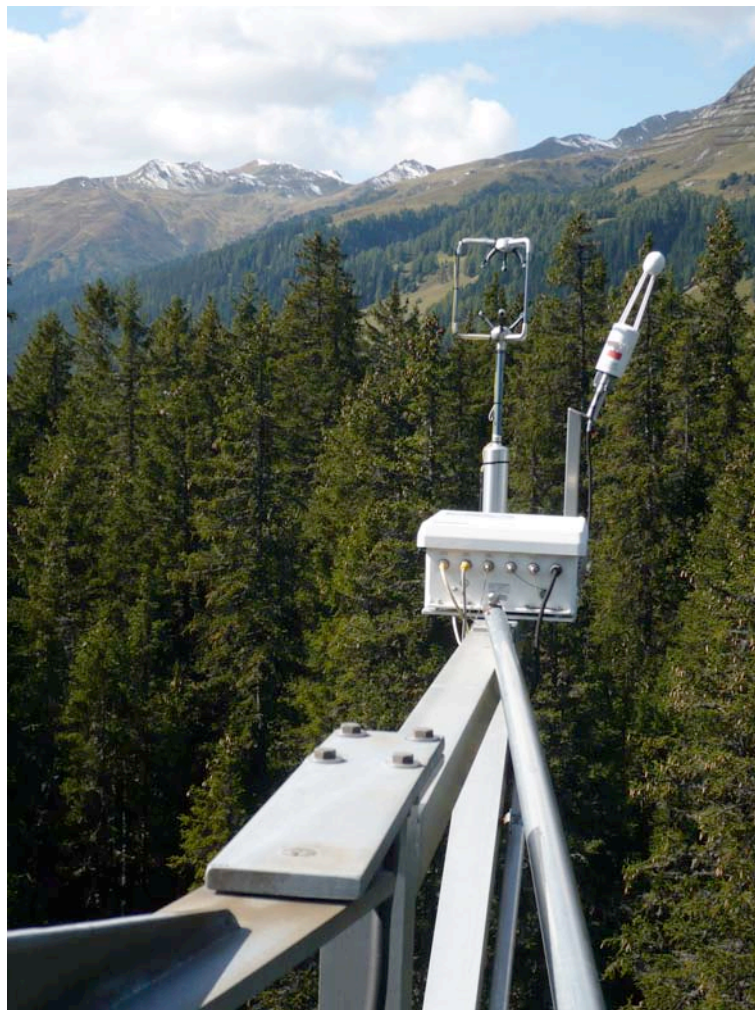


**Schlussbericht:** V1.15, 30. September 2009

# **Einfluss des Klimas auf Zuwachs**

## **- Validierung mit EC-Messungen**

*Roman Zweifel, Sophia Etzold und Werner Eugster*



## **Einfluss des Klimas auf Zuwachs - Validierung mit EC-Messungen**

**Projektleitung:** PD Dr. Werner Eugster, ETH Zurich, Institute of Plant Sciences.  
[werner.eugster@ipw.agrl.ethz.ch](mailto:werner.eugster@ipw.agrl.ethz.ch)

**Projektteam:** Sophia Etzold, ETH Zurich, Institute of Plant Sciences.  
[sophia.etzold@ipw.agrl.ethz.ch](mailto:sophia.etzold@ipw.agrl.ethz.ch)

Dr. Roman Zweifel, Zweifel Consulting Hombrechtikon / WSL Birmensdorf, FE Waldökosystemprozesse.  
[roman.zweifel@natkon.ch](mailto:roman.zweifel@natkon.ch)

**Vertrag:** 06.0091.PZ /I153-2518

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Ausgangslage &amp; Problemstellung</b>	<b>4</b>
<b>2. Die wichtigsten Fragen und Antworten</b>	<b>4</b>
2.1. Wie entwickelten sich die Netto-Ökosystem-Produktivität, die Ökosystem-Respiration und der jährliche Stammradiuszuwachs (Holz und Rinde) über die untersuchten Jahre in Davos und an der Lägeren?	4
2.2. In welchem Zusammenhang stehen EC- und DR-Messungen?	6
2.3. Inwiefern eignen sich Punktdendrometer- und EC-Messungen für eine Quantifizierung der jährlichen CO <sub>2</sub> -Senkenwirkung von Wäldern?	7
2.4. Welchen Informationsunterschied besteht zwischen jährlichen Stammradiuszuwachsdaten (RSI) und holzanatomisch bestimmten Jahringbreiten (RW)?	8
2.5. Wie wirkt sich das Klima auf das Wachstum der Bäume und die CO <sub>2</sub> -Senkenwirkung von Wäldern aus?	8
2.6. Eignen sich die Klimakorrekturfaktoren aus dem vereinfachten Biome-BGC-Modell, um aus den 5-Jahres-LFI-Daten jährliche CO <sub>2</sub> -Senken zu berechnen?	10
2.7. Was könnte die grosse Abweichung des Biome-BGC-Modells zu den Messdaten verursacht haben?	10
2.8. Was ist aus Sicht der Autoren der gangbarste Weg zu brauchbaren jährlichen CO <sub>2</sub> -Senken-Angaben für die Schweizer Wälder?	11
<b>3. Hintergründe und weitere Erklärungen</b>	<b>12</b>
3.1. Untersuchungsstandorte	12
3.2. Datenqualität	13
3.3. Stammradiusmessungen und ihre Differenzierungen	14
3.4. Die Eddy-Kovarianz Methode	16
3.5. Die wichtigsten CO <sub>2</sub> -Senken und Quellen im Wald	17
3.6. Klima-NEP-Modell von Eugster-Etzold	18
3.7. Nomenklatur	20
3.8. Referenzliste	20

## 1. Ausgangslage & Problemstellung

Für die Budgetierung des nationalen Treibhausgasinventars im Rahmen der UNO-Klima-Rahmenkonvention (UNFCCC) muss der Bund Veränderungen im Kohlenstoffvorrat des Waldes abschätzen. Die Veränderung an lebender Biomasse wird aus dem Zuwachs an lebender Biomasse und dem Verlust durch Ernte und Mortalität berechnet. Der Zuwachs wird stark durch die Jahreswitterung beeinflusst. Dies wird berücksichtigt, indem der mittlere LFI-Zuwachs zwischen zwei Inventaren (1985, 1995, 2005) mit Klimakorrekturfaktoren gewichtet wird, um die jährlichen Zuwachsraten zu berechnen. Diese Klimakorrekturfaktoren werden vom BAFU mit einer vereinfachten Form des Models Biome-BGC (Schmid *et al.*, 2006) berechnet. Das Anwenden der Klimakorrekturfaktoren zur Berechnung des jährlichen Zuwachses hat einen entscheidenden Einfluss auf die geschätzte jährliche Senkenwirkung eines Waldes.

Diese Studie evaluiert diese klimakorrigierten Zuwachsraten mit Feldmessungen an den Standorten Davos und Lägeren und nimmt Stellung zu deren Qualität und Aussagekraft. Als Grundlage für die Analysen wurden Messungen mit der Eddy-Kovarianz (EC) Methode (Davos: 11 Jahre, Lägeren: 4 Jahre) und mit Punktdendrometern (DR) (Davos: 10 Jahre, Lägeren: 3 Jahre) verwendet, sowie die entsprechenden Meteodaten zur Interpretation der Klimaabhängigkeit herangezogen. EC-Messungen liefern detaillierte und kontinuierliche Informationen über den CO<sub>2</sub>-Austausch einer bestimmten Vegetation. Kombiniert mit meteorologischen Daten (Temperatur, Einstrahlung, Niederschlag usw.) können jährliche Schwankungen in den EC-Daten interpretiert und erklärt werden. Mit Punktdendrometern stehen zudem zeitlich hoch aufgelöste Informationen zur Schwankung der Stammdurchmesser repräsentativer Bäume zur Verfügung, die einen direkten Bezug zum mittleren LFI-Zuwachs erlauben. Gleichzeitig ermöglichen sie einen Einblick in die Prozesse, die zum jährlichen Stammzuwachs (Holz und Rinde) führen. Die Kombination zwischen EC-Flussmessungen – die den Nettozuwachs am genauesten repräsentieren – und Punktdendrometerdaten – welche den Bezug zur oberirdischen Biomasse herstellen, die auch im LFI langfristig erfasst wird – ergibt somit die bestmögliche Basis zur Abschätzung der interannuellen Variabilität der CO<sub>2</sub>-Senkenwirkung von Wäldern. Die Daten stammen aus verschiedenen Quellen und Institutionen: ETHZ (Eddy Kovarianz, Dendrometer, Meteo), WSL Birmensdorf (Dendrometer, Jahrringe, Meteo), NABEL (Meteo).

## 2. Die wichtigsten Fragen und Antworten

### **2.1. Wie entwickelten sich die Netto-Ökosystem-Produktivität, die Ökosystem-Respiration und der jährliche Stammradiuszuwachs (Holz und Rinde) über die untersuchten Jahre in Davos und an der Lägeren?**

Die jährliche Netto-Ökosystem-Produktivität (*NEP*, positive Werte bedeuten eine C-Senke) gemäss EC-Messungen bewegte sich zwischen 55 und 240 (Mittel: 147) g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> in Davos (1997-2008) und zwischen 285 und 460 (Mittel: 366) g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> an der Lägeren (2005-2008). Dies entspricht durchschnittlichen radialen Holzzuwächsen pro Baum (Holz und Rinde, *RSI*) und Jahr zwischen 0.8 und 1.7 mm in Davos und zwischen 2.5 und 3.1 mm an der Lägeren (Abbildung 1). Daraus lässt sich ableiten, dass ein jährlicher Holzzuwachs von 1 mm einem *NEP* von ca. 120 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> in Davos und ca. 130 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> an der Lägeren entspricht und dass die grössere Senkenleistung der Lägeren auf ein grösseres Baumwachstum zurückzuführen ist.

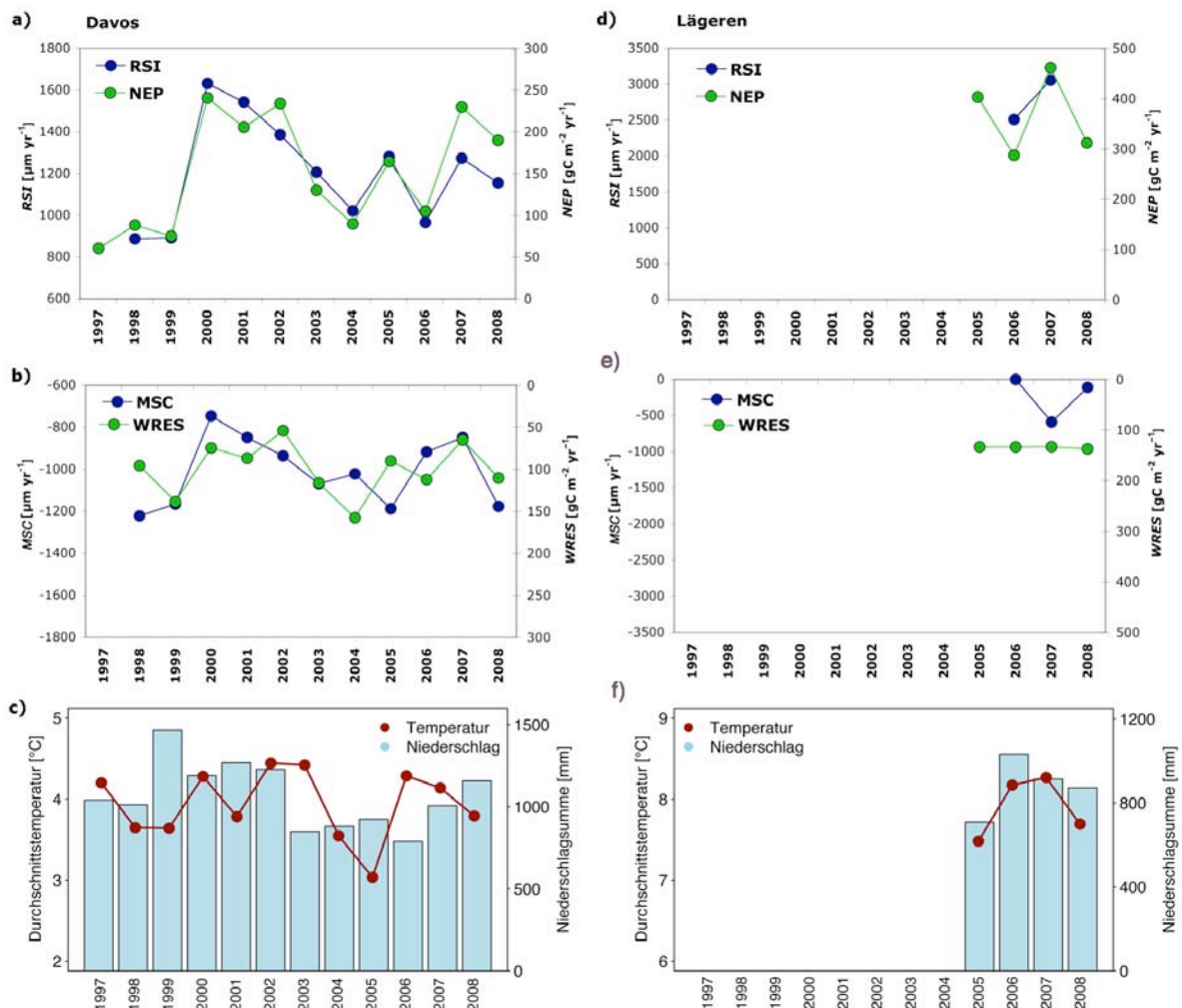
Die Schätzung der mittleren Jahreszuwachsrate des oberirdischen C-Vorrats (Baumstämme inkl. Zweige), rein aus den *RSI*-Daten berechnet, lagen mit 140-150 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> in Davos (1998-2008) und mit 400-450 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> an der Lägeren (2006-2007) etwas höher, durchaus aber noch in derselben Grössenordnung. Unsere Zahlen von Davos passen zudem auch gut mit einem aus dem LWF-Biomasse-Inventar errechneten Durchschnittswert von 120 bis 130 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> zusammen (1988-2006, Matthias Dobbertin, WSL).

Die klimabedingten Fluktuationen zwischen den einzelnen Jahren sind an beiden Standorten beachtlich gross. An der Lägeren fällt zudem auf, dass die aufsummierte Winterrespiration (*WRES*) praktisch konstante Werte zwischen 133 und 138 (Mittel: 134) g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> (2005-2008) liefert, in Davos (1997-2008) aber zwischen 55 und 160 (Mittel: 100) g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> variiert (Abbildung 1). Im Widerspruch zu den kon-

stanten Winterrespirationsdaten der EC-Messungen an der Lägeren stehen allerdings die um bis zu 40% variierenden Bodenrespirationwerte der Jahre 2006 bis 2008 (Messwerte aus den Monaten Januar bis März, Rühr 2009). Hierbei ist aber zu beachten, dass sich das *WRES* als Kulminationspunkt des *NEP* über den gesamten Winter und das gesamte Ökosystem definiert, während die Bodenrespirationsdaten nur drei Monate und ein Ökosystem-Kompartiment, den Boden, umfasst.

Eine Modellierung der Boden-C-Sequestrierung für Davos ergab im Mittel (1988-2008) ca.  $5\text{--}35 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  (positive Werte bedeuten eine C-Senke, Rühr 2009). Vorbehaltlich der Unsicherheiten in den Schätzungen, entspricht dies in etwa der Differenz zwischen dem mittleren *NEP* der EC-Messungen und dem LWF-Biomasse-Inventar. Für die Lägeren wurde eine Boden-C-Sequestrierung von ca.  $-10$  bis  $+15 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  für die Jahre 2005 bis 2008 und von ca.  $-15$  bis  $+25 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  für die Jahre 1988-2008 berechnet (Rühr 2009), also etwa gleich Null. Dies bestätigt die Ergebnisse aus *RSI* und *NEP*, die den Unterschied zwischen dem *NEP* der beiden Standorte vor allem auf das grössere Baumwachstum an der Lägeren zurückführt.

Die grössten C-Senken (*NEP*) wurden in Davos in den Jahren 2000 bis 2002 sowie im Jahr 2007 gemessen, die kleinsten in den Jahren 1997 bis 1999 (Untersuchungsperiode 1997-2008). Das hohe *NEP*

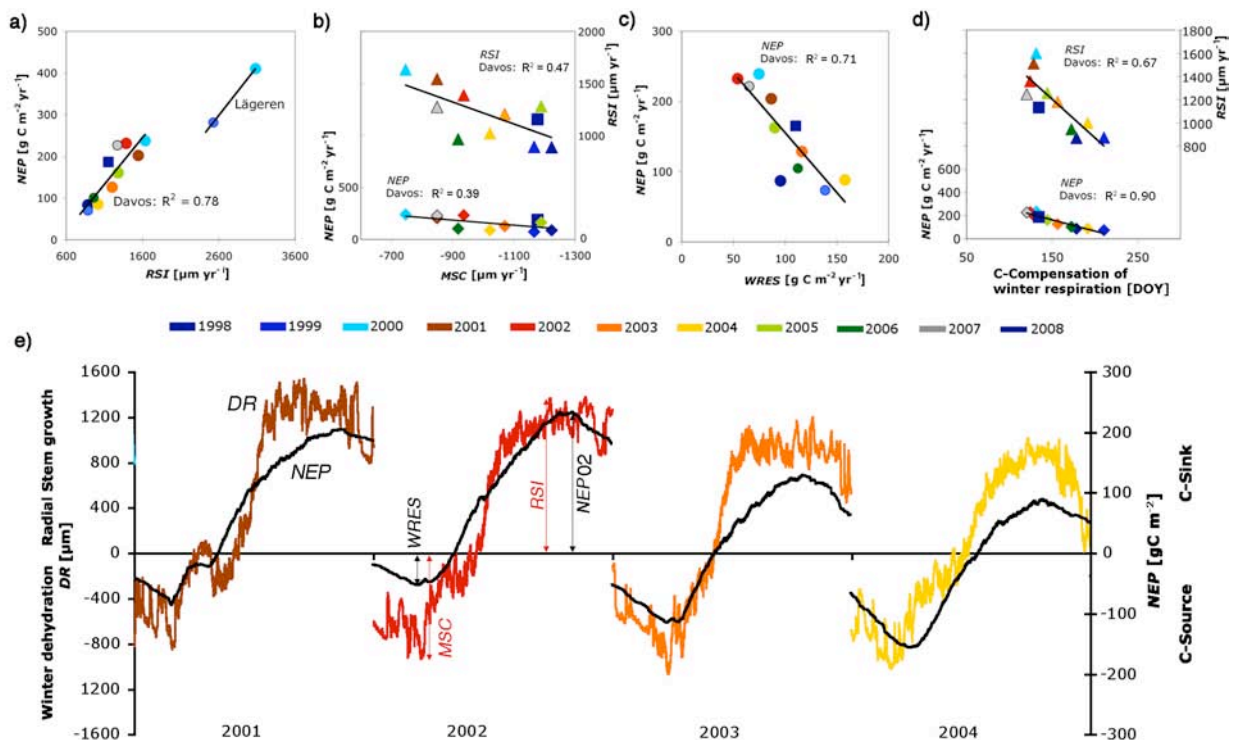


**Abbildung 1.** Die wichtigsten jährlichen C-Haushalt-Kenngrößen sowie die entsprechenden Temperatur- und Niederschlagswerte für die beiden untersuchten Waldstandorte Davos (a bis c) und Lägeren (d bis f). Jährliche Netto-Ökosystem-Leistung des Waldes (*NEP*), Brutto-Winterrespiration des Waldes (*WRES*), radialer Stammzuwachs (Holz und Rinde) (*RSI*) und maximale Stammschrumpfung im Winter (*MSC*).

des Jahres 2007, sowohl in Davos als auch an der Lägeren, deckt sich mit Studien von anderen europäischen Waldstandorten. Das extrem warme Frühjahr 2007 führte demnach zu aussergewöhnlich hohen Assimilationsraten in Wäldern unterschiedlicher Höhenstufen und Baumartenzusammensetzungen (Delpierre *et al.*, 2009). Nur wenig unter dem Mittel (bezüglich *NEP* und *RSI*) lag das als Hitzejahr in die Klimageschichtsbücher eingegangene Jahr 2003 in Davos. Dies macht sehr deutlich wie unterschiedlich Wälder der subalpinen Stufe im Vergleich mit Wäldern aus dem Mittelland auf Klimaschwankungen reagieren können (Jolly *et al.*, 2005). In weiten Teilen des Mittellandes war das Jahr 2003 ein sehr schlechtes Jahr bezüglich *RSI* und *NEP* (Ciais *et al.*, 2005).

## 2.2. In welchem Zusammenhang stehen EC- und DR-Messungen?

In Davos wurde eine sehr enge Korrelation zwischen dem jährlichen *NEP* des Waldökosystems und dem *RSI* (Holz und Rinde) der Fichten gemessen (Abbildung 2a). Für diesen Standort erklärt das *RSI* mehr als 78% der Variation der jährlichen  $\text{CO}_2$ -Senkenwirkung. Der parallele Verlauf von aufsummierten Stammradiusänderungen (*DR*) und aufsummierten *NEP* werden dabei nicht nur in einer jährlichen Auflösung sichtbar, sondern wurden bis hin zu einer stündlichen Auflösung gefunden (Abbildung 2e). Dieser enge Zusammenhang überlässt dem Boden und anderen  $\text{CO}_2$ -relevanten Ökosystemteilen (z.B. Unterholz, Bodenvegetation, Fruchtbildung, etc.) eine nur sehr kleine Eigendynamik. Das bedeutet nicht, dass diese Teile nicht relevant zum *NEP* beitragen, aber sie tun das gemäss unseren Analysen immer proportional zum gemessenen *DR*. Oder in anderen Worten, wenn wir wissen, wie stark sich die Stammradien der Bäume in Davos verändern (positiv oder negativ), wissen wir auch, was das gesamte Waldökosystem als  $\text{CO}_2$ -Senke/Quelle leistet, wobei der Sockelbeitrag von Bodenrespiration und Bo-



**Abbildung 2.** Beziehungen zwischen den Stammradiusänderungen (*DR*) von Bäumen und der Netto-Ökosystem-Leistung (*NEP*) des Waldes. **a)** *NEP* in Abhängigkeit des radialen Stammzuwachses (Holz und Rinde) (*RSI*) für Davos und Lägeren. Positive *NEP* bedeuten eine C-Senke, negative eine C-Quelle. **b)** *NEP* und *RSI* in Abhängigkeit der maximalen Stammschrumpfung im Winter (*MSC*). **c)** *NEP* in Abhängigkeit der maximal aufsummierten Brutto-Winterrespiration (*WRES*). **d)** *NEP* und *RSI* in Abhängigkeit des Zeitpunkts im Jahr (*DOY*), an dem der C-Verlust durch *WRES* wieder kompensiert ist (C-Nullpunkt). **e)** Zeitlicher Verlauf von aufsummierten *NEP* und *DR* am Beispiel der Jahre 2001-2004 in Davos. Positive *DR* bedeuten ein Ausdehnen des Stammes, negative *DR* bedeuten ein schrumpfen des Stammes.

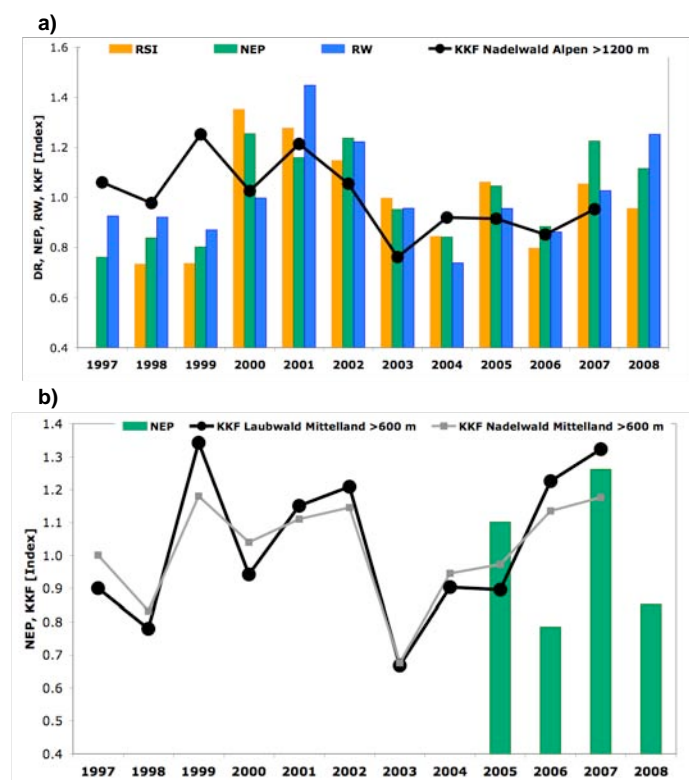


denvegetations-Netto-Assimilation darin enthalten ist. Namentlich die maximale Stammschrumpfung im Winter hat einen beachtlichen Erklärungsgehalt für das *NEP* der kommenden Vegetationsperiode (Abbildung 2b), was den Dendrometermessungen schon Ende Winter eine gewisse Vorhersagekraft für die kommende Saison gibt. Noch besser wird das *NEP* eines Jahres aber durch die Winter-Respiration (*WRES*) vorweggenommen (Abbildung 2c): je kleiner *WRES* ist, desto grösser ist das folgende *NEP*. Vor allem der Zeitpunkt, wann der winterliche Respirationsverlust wieder kompensiert ist, hat eine sehr hohe Erklärungskraft für das jährliche *NEP*: je früher die Kompensation erfolgt, desto grösser wird das *NEP* und desto grösser wird auch das *RSI* der kommenden Saison (Abbildung 2d).

Leider können diese Schlussfolgerungen aus Davos aus Mangel an relevanten Daten noch für keinen anderen Standort bestätigt resp. relativiert werden (an der Lägeren sind zur Zeit nur zwei relevante *DR*-Jahre verfügbar). Es bleibt daher weiterhin eine offene Frage, ob das jährliche *RSI* auch in anderen Waldtypen so eng mit dem *NEP* verknüpft ist. Es ist vorstellbar, dass Atmungs- und Assimilationsprozesse anderer Boden- und Unterholztypen als derjenigen im Fichtenwald von Davos diese Korrelation auf einer jährlichen Auflösung stark verzerren könnten.

### 2.3. Inwiefern eignen sich Punktdendrometer- und EC-Messungen für eine Quantifizierung der jährlichen CO<sub>2</sub>-Senkenwirkung von Wäldern?

Beide Messmethoden liefern automatisiert gemessene Daten in einer sehr hohen zeitlichen Auflösung, was diese nicht nur für eine jährliche (Abbildung 2a), sondern auch für eine saisonale oder monatliche Auflösung der CO<sub>2</sub>-Senkenwirkung qualifiziert (Abbildung 2e). Dendrometerdaten repräsentieren neben dem Wasserhaushalts-Zustand der Bäume (Schwellen und Schrumpfen der Rinde je nach Wasserangebot und Transpirationsleistung) das Wachstum von Holz- und Rindenzellen sowie das Absterben der Zweiten (siehe auch Abschnitt 3.3).



**Abbildung 3.** Vergleich der Klimakorrekturfaktoren (*KKF*) mit Indizes für die jährliche Netto-Ökosystem-Leistung des Waldes (*NEP*, grössere Werte bedeuten eine grössere C-Senke), dem radialen Stammzuwachs mittels Dendrometer (*RSI*) und den holzanatomisch bestimmten Jahrringbreiten (*RW*) für **a)** Davos und **b)** die Lägeren. Die Korrelationskoeffizienten adj.  $R^2$  für *KKF* vs. *NEP* = 0.02, für *KKF* vs. *RSI* = 0.03 und für *KKF* vs. *RW* = 0.23 sind alle sehr klein (nur Daten Davos).

Die EC-Messungen erfassen den integrierten CO<sub>2</sub>-Austausch zwischen Waldökosystem und Atmosphäre und zeigen damit, wann und unter welchen Bedingungen ein Wald als C-Senke resp. als C-Quelle agiert. Der Vergleich zu baumring-basierten Biomassezuwächsen (Jahrringanalysen) in Davos legte zudem offen, dass unsere beiden dynamischen Messungen einen anderen Informationsgehalt bezüglich C-Austausch eines Waldes beinhalten als das, was als Holzbiomasse mittels Dendrologie untersucht werden kann (Abbildung 3).

#### **2.4. Welchen Informationsunterschied besteht zwischen jährlichen Stammradiuszuwachsdaten (RSI) und holzanatomisch bestimmten Jahrringbreiten (RW)?**

*RSI* und *RW* liefern auf einer jährlichen Skala letztlich Wachstum (Abbildung 3) aber mit einem ganz entscheidenden Unterschied: während die holzanatomisch bestimmte Jahrringbreite nur das Holz erfasst, umfasst das *RSI* auch Änderungen in der Rindendicke (Phloemzellen werden jährlich neu gebildet, sterben aber nach 1-3 Jahren wieder ab). Da die Rindendicke ein relevanter C-Speicher zu sein scheint und sich von Jahr zu Jahr verändert (Gricar & Cufar, 2008), macht das den kleinen aber entscheidenden Unterschied zwischen *RSI* und *RW* aus, insbesondere dann, wenn diese Grössen mit dem jährlichen *NEP* verglichen werden. Der Korrelationskoeffizient zwischen *NEP* und den beiden Wachstumsgrössen macht die Sachlage deutlich: das *RSI* (adj.  $R^2 = 0.78$ ) ist viel besser korreliert zum *NEP* als das *RW* (adj.  $R^2 = 0.39$ ). Wir vermuten zudem, dass die Rindendicke weitere jährlich schwankende C-Reserven des Baumes wie die Blattmasse, das Wurzelwachstum, die Fruchtproduktion und die entsprechenden Schwankungen in der Respiration repräsentiert. Solche kurzzeitigen bauminternen C-Senken/Quellen würden damit nicht nur die Diskrepanz von *NEP* zu *RW* erklären, sondern müssten – zu Ende gedacht – sogar dahingehend interpretiert werden, dass der reine Holzzuwachs unter einer Zeitperiode von 5 Jahren gar nicht C-Senken-relevant ist, weil die kurzzeitigen C-Senken und Quellen den C-Holz-Anteil zu stark überlagern.

Gerade für eine zeitliche Auflösung der C-Senken von einem Jahr oder darunter scheint der nicht-Holzbasierte Teil der Stammradiusänderungen eine entscheidende Rolle zu spielen. Dazu gehört auch, dass die frostbedingten Schrumpfungen der Rinde im Winter einen hohen Erklärungsgrad für die folgende Wachstums- und Netto-Ökosystem-Leistung des Waldes in Davos haben (Abbildung 2). Damit dokumentieren die Dendrometer-Wachstumsinformationen die wichtigsten C-Senken in einem Wald – über kurze Zeiträume – weit besser als blosse Holzzuwachsdaten.

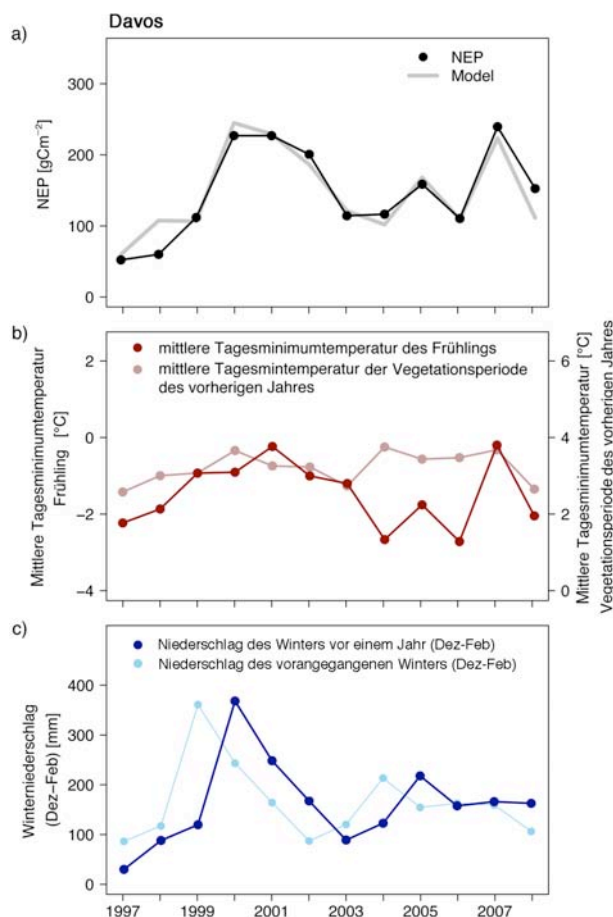
#### **2.5. Wie wirkt sich das Klima auf das Wachstum der Bäume und die CO<sub>2</sub>-Senkenwirkung von Wäldern aus?**

Bäume und ihr Gedeihen sind natürlicherweise von den mikroklimatischen Bedingungen abhängig. Allerdings wird auch mit unseren Daten deutlich, dass sich Wachstum aus einer Reaktion auf die klimatischen Bedingungen der Gegenwart sowie aus den physiologischen Voraussetzungen – die von klimatischen Bedingungen aus der Vergangenheit determiniert wurden – zusammensetzt (Zweifel *et al.*, 2006). Die Abhängigkeit von „gespeicherten“ Klimabedingungen aus dem/den Vorjahr(en) wird verständlich, wenn man weiss, dass die Blattanlagen für dieses Jahr, noch vor Ende des Vorjahres in den Knospen vollständig vorgebildet werden und dass gewisse Baumarten Holzzellen bilden, bevor sie ihre Blätter entfaltet haben. Damit werden wichtige Ausprägungen eines Jahres wie die maximale Blattmasse und die dazugehörige Menge an Leitelemente weitgehend schon im Vorjahr festgelegt. Zudem stammen immer nur ca. 50% des Kohlenstoffs für die diesjährige Holz- und Blattmassebildung aus der gleichjährigen Assimilationsperiode, die andere Hälfte stammt aus bauminternen C-Speichern der Vorjahre (Hoch *et al.*, 2003). Ein gutes Klima-Wachstumsmodell muss deshalb zwangsläufig Klimabedingungen des vorangegangenen Jahres (oder der vergangenen Jahre) berücksichtigen, um brauchbare Resultate zu liefern. Diese Erkenntnis ist in den Dendrowissenschaften schon lange Schulbuchwissen (Schweingruber, 1993), in den heutigen Klima-Wachstumsmodellen aber noch kaum umgesetzt.

In Davos konnte das Wachstum des laufenden Jahres durch die Temperatur während der Vegetationsperiode des Vorjahres, der Temperatur von März bis Mai des aktuellen Jahres und den Winterniederschlägen von Dezember bis Februar der zwei vorangegangenen Winter erklärt werden (Abbildung 4). Ähnliche Untersuchungen deuten v.a. an trockeneren Standorten aber auch z.B. an der Lägeren auf



einen sehr grossen Einfluss der Niederschläge während der Holzwachstumsperiode hin (Zweifel *et al.*, 2006). Auf der Lägeren weist das jährliche Wachstum eine sehr hohe Korrelation zu den Frühlingstemperaturen ( $\text{adj. } R^2=0.94$ ) und den Sommerniederschlägen ( $\text{adj. } R^2=0.93$ ) auf. Zudem kann die interannuelle Variation der Assimilationsleistung und damit auch von *NEP* zum grossen Teil durch phänologische Prozesse erklärt werden. Besonders wichtig ist hierbei der Start der Vegetationsperiode, der eng mit dem Zeitpunkt der C-Kompensation der Winterrespiration zusammenhängen dürfte (Tabelle 1, Abbildung 2d). Je früher der Frühling beginnt, desto kleiner ist das *WRES*, desto eher ist es kompensiert und desto grösser wird das *NEP* (Abbildung 2c). Diese Prozesse hängen wiederum von den vorhergegangenen Winterbedingungen ab, weil Bäume physiologisch erst wieder aktiv werden, wenn ihre (Frost-) temperaturbedingte Winterschrumpfung der Rinde (*MSC*) wieder ausgeglichen ist (Abbildung 2b). Dazu braucht es neben warmen Temperaturen auch eine grosse Wasserverfügbarkeit, die gemäss unseren Analysen hauptsächlich durch die Winterniederschläge (Dez-Feb) bereitgestellt werden (Abbildung 4). In diesen Monaten fällt der Niederschlag in Davos praktisch ausschliesslich als Schnee, was dieses Wasser erst zur Schneeschmelze im Frühling verfügbar macht. Die herausragende Bedeutung der klimatischen Frühlingsbedingungen insbesondere bei Laub- und Mischwäldern, deckt sich auch mit anderen, kürzlich erschienenen Studien (Ahrends *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2009; Granier & Tardieu, 2009). Im Gegensatz dazu weisen Jahreswerte von Temperatur, Niederschlag und Strahlung nur geringe Zusammenhänge mit dem jährlichen Wachstum auf (Tabelle 1).



**Abbildung 4.** *NEP*-Modell aus Klimavariablen für Davos. **a)** Netto-Ökosystem-Leistung (*NEP*) für die Jahre 1997-2008, EC-Messung (schwarz) und Modell (grau). Das Modell berechnet *NEP* ( $\text{adj. } R^2=0.82$ ,  $p=0.002$ ) hauptsächlich aus Klimavariablen des Frühlings, sowie aus Variablen die retrospektiv sind: **b)** Mittlere Tagesminimumtemperatur des Frühlings (März bis Mai) des aktuellen Jahres und mittlere Tagesminimumtemperatur der vorherigen Vegetationsperiode. **c)** Niederschlagssumme des vorangegangenen Winters (Dezember bis Februar) und des Winters vor einem Jahr. Details zu diesem Modell finden sich im Abschnitt 3.6.

## **2.6. Eignen sich die Klimakorrekturfaktoren aus dem vereinfachten Biome-BGC-Modell, um aus den 10-Jahres-LFI-Daten jährliche CO<sub>2</sub>-Senken zu berechnen?**

Zwischen den jährlichen Klimakorrekturfaktoren (*KKF*) einerseits und den gemessenen *NEP* (Eddy-Kovarianz) sowie den *RSI* (Dendrometer) andererseits gibt es kaum Übereinstimmungen für die beiden untersuchten Standorte (Abbildung 3). Weder die Polung der Abweichungen vom Mittelwert noch die entsprechenden Amplituden zeigen Parallelen zwischen Modell- und Messdaten. Wenn man den durch zwei unabhängige Methoden bestimmten Messdaten (*NEP* und *RSI*) glauben schenkt (und davon gehen wir aus), eignet sich die vom BAFU verwendete vereinfachte Form des Biome-BGC Modells nicht, um die 10-Jahres-Auflösung der LFI-Daten in eine jährliche Auflösung umzurechnen. Ob das Original-Biome-BGC-Modell (ohne Zusatzmessungen für die Parameterisierung) bessere Resultate liefern könnte, wurde nicht untersucht, erscheint aber ob den grossen Differenzen zu den Resultaten des vereinfachten Modells zumindest zweifelhaft.

## **2.7. Was könnte die grosse Abweichung des Biome-BGC-Modells zu den Messdaten verursacht haben?**

Wir haben die Berechnungsgrundlagen für die Klimakorrekturfaktoren (*KKF*) nicht im Detail untersucht und stützen unsere nachfolgende Interpretation deshalb auf generelle Überlegungen zum Ansatz des Biome-BGC Modells. Die fehlende Retrospektive bezüglich klimatischen Bedingungen dürfte ein erhebliches Fehlerpotential innerhalb des Biome-BGC-Modells beinhalten. Sinnigerweise verbessert sich die Korrelation zwischen dem *KKF* und den entsprechenden EC- und Dendrometer-Messungen für Davos erheblich, wenn das *KKF* um ‚+ 1 Jahr‘ verschoben wird (das adj.  $R^2$  in Davos steigt von 0.02 auf 0.30). Ein weiterer Punkt dürfte die unterschiedliche Gewichtung von verschiedenen Jahreszeiten auf das *NEP* sein, wobei vor allem das Winter- und Frühlingswetter einen besonders grossen Einfluss auf die *NEP*- Jahresleistung zu haben scheint, während die Jahres- oder Vegetationsmittelwerte (die ja für die *KKF*-Berechnungen verwendet werden) nur geringe Korrelationen zum *NEP* aufweisen. Darüber hinaus variieren die Einflussfaktoren zwischen den beiden Standorten sehr. So ist das *NEP* an der Lägeren z.B. durch den Sommerniederschlag limitiert, während in Davos eher der Winterniederschlag Einfluss auf das jährliche Wachstum zu haben scheint.

Abweichungen zwischen dem lokalen Klima und dem klimatischen Mittelwert, der aus mehreren Messstation der jeweiligen *KKF*-Stufe berechnet und für das Biome-BGC-Modell verwendet wird, könnten eine weitere Ursache für Unstimmigkeiten zwischen gemessenen und modellierten Werten darstellen. So liegen die Temperaturen in Davos konstant etwa 4 °C tiefer als der Mittelwert aus 10 Stationen der entsprechenden *KKF*-Stufe. Während der Temperaturverlauf in Davos sehr gut mit dem mittleren Verlauf übereinstimmt sowohl als Monatsmittel (adj.  $R^2 = 0.98$ ,  $p < 0.001$ ), als Jahresmittel (adj.  $R^2 = 0.91$ ,  $p < 0.001$ ) als auch als Mittel über die Vegetationsperiode (adj.  $R^2 = 0.91$ ,  $p < 0.001$ ), zeigt die Niederschlagsverteilung räumlich bedingte Unterschiede (Monatssummen: adj.  $R^2 = 0.55$ ,  $p < 0.001$ ; Jahressummen: adj.  $R^2 = 0.74$ ,  $p < 0.001$ ; Vegetationsperiode: adj.  $R^2 = 0.62$ ,  $p < 0.001$ ). Aber auch wenn solche kleinräumigen Wetterunterschiede einen Einfluss auf das *NEP* ausüben, kann damit allein nicht die grosse Abweichung der modellierten zu den gemessenen Werten erklärt werden. Dafür sind die überregionalen Wettertrends, wie beispielsweise der Hitzesommer 2003, zu ausgeprägt. Viel wichtiger erscheint uns die Auswahl der relevanten (retrospektiven) Klimavariablen, die das Modell speisen.

Weitere Fehlerquellen könnten das Nicht-Berücksichtigen von mikroklimatischen Variationen eines Bestandes gegenüber den meteorologischen Mittelwerten sein, das Fehlen von artspezifischen Reaktionen und generell das fehlende Wissen über Wachstums- und Respirations-Prozesse unter natürlichen Bedingungen (die EC-Messungen im Seehornwald Davos sind weltweit wohl die einzigen, die permanent mit ökophysiologischen Messmethoden über eine so lange Zeitdauer kombiniert wurden). Zudem könnte die Vereinfachung des Original-Biome-BGC-Modells ebenfalls zu den schlechten Resultaten beigetragen haben. Dem ist allerdings entgegenzuhalten, dass auch andere Modelle nicht in der Lage waren, die Davos-Daten adäquat zu simulieren. Das LPJ-GUESS Modell, das Dr. Annett Wolf und ihr Doktorand Hanspeter Portner für den Standort Davos getestet haben, erwies sich ebenfalls als unzulänglich, und auch da könnte ein systemischer Fehler im Modellansatz zu Grunde liegen.

## **2.8. Was ist aus Sicht der Autoren der gangbarste Weg zu brauchbaren jährlichen CO<sub>2</sub>-Senken-Angaben für die Schweizer Wälder?**

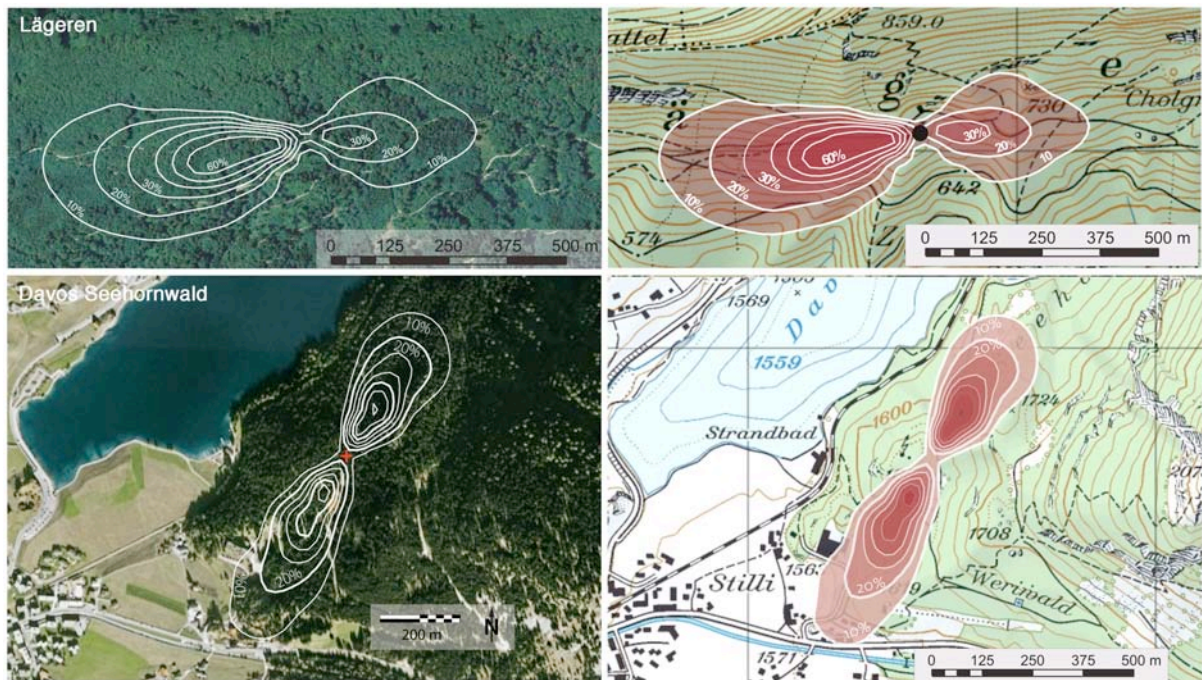
Qualitativ die besten Daten bezüglich des CO<sub>2</sub>-Austauschs von Wäldern sind zweifelsohne mit den aufwändigen EC-Messungen zu erreichen. Automatisierte Dendrometer für eine kontinuierliche Aufzeichnung von Stammradien scheinen aber eine sehr gute Alternative zu sein. Sie sind vergleichsweise günstig, technisch zuverlässig und lassen sich sehr gut als Proxy für die C-Senken-Schwankungen nutzen. Wie oben ausgeführt, weisen diese Daten eine sehr grosse Korrelation zu den *NEP*-Messungen auf. Diese Korrelation ist v.a. auch sehr viel grösser als zwischen den EC-Daten und den Holzzuwächsen aus Jahrringanalysen.

Zuverlässige Modellansätze, die ohne zusätzliche Messungen auskämen, sind uns hingegen keine bekannt. Für den Messstandort Davos existiert zwar ein einfacher Modellansatz (general linear model, Abbildung 4), der mit hoher Genauigkeit die jährliche Netto-Ökosystem-Leistung aus (z.T. retrospektiven) Klimadaten berechnet. Allerdings ist dieser statistische Modellansatz absolut ungeeignet, um C-Senken an Standorten ohne entsprechende Messungen zu schätzen. Zudem gelten statistische Modelle als problematisch bei Anwendungen, die ausserhalb des Erfahrungsbereichs des Modells liegen, was im Zusammenhang mit Klimaänderungen durchaus wahrscheinlicher wird.

### 3. Hintergründe und weitere Erklärungen

#### 3.1. Untersuchungsstandorte

Unsere beiden Untersuchungsstandorte repräsentieren zwei typische Waldökosysteme der Schweiz (Abbildung 5): der Buchen-Mischwald auf der Lägeren als Vertreter der montanen Stufe (KKF: Mittel-land > 600 m) und der Fichtenwald in Davos als typische Vegetation der alpinen Stufe (KKF: Alpen Ost > 1200 m). Beide Standorte sind Teil des Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) des BAFU und der EMPA seit 1986, die Eddy-Kovarianz-Messungen laufen in Davos seit 1997 und auf der Lägeren seit 2004.



**Abbildung 5.** ‚Footprint‘-Karten der Forschungsstationen Lägeren und Davos Seehornwald.

**Lägeren:** Die Lägeren (AG/ZH, 47°28'42.0" N, 8°21'51.8" E), nordwestlich von Zürich, bildet den östlichsten Ausläufer des Faltenjuras. Sie erstreckt sich über eine Länge von 11 km in west-östlicher Richtung und weist eine Breite von etwa 1.5 km auf. Der höchste Punkt liegt bei 866 m. Die Untersuchungsfläche befindet sich an der südlichen, relativ steilen Flanke (im Durchschnitt 24° Neigung) der Lägerenkette auf einer Höhe von 682 m. Der ‚Footprint‘ der Eddy-Kovarianz-Messungen (die Fläche, die für die Messungen repräsentativ ist) erstreckt sich, der Hauptwindrichtung von West nach Ost folgend, entlang des Lägeren-Grates auf ca. 1 km Länge und 300 m Breite (Abbildung 5). Mit 8.5°C Jahresdurchschnittstemperatur und 970 mm mittlerem Jahresniederschlag liegt die Lägeren nahe dem schweizerischen Mittel. Die Vegetation bildet einen produktiven Laub-Mischwald mit einer hohen Diversität an Baumarten, sowie einer breiten Alters- und Stammdurchmesserverteilung. Insgesamt sind dreizehn verschiedene Baumarten vertreten, mit der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) als dominanten Laubbaum und der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) und der Weisstanne (*Abies alba* Mill.) als dominante Nadelbäume. Im Frühling erreicht der Bärlauch (*Allium ursinum* L.) fast komplette Bodendeckung. Eine Bestandsaufnahme im Winter 2005/2006 ergab für die Buchen mit einem Stammdurchmesser > 8 cm ein Alter zwischen 52 und 155 Jahren, für die Fichten zwischen 105 und 185 Jahren. Die mittlere Baumhöhe beträgt knapp 25 m, die Kronenobergrenze liegt im Mittel bei 30-40 m und der LAI variiert zwischen 1.7 (Winter) und 5.5 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> (Messungen aus den Jahren 2006 und 2007). Der Lägeren-Wald wird nach FSC-Standards (ein Nachhaltigkeitslabel für die Waldbewirtschaftung) bewirtschaftet, seit 1998 sind zudem ca. 10 ha, z.T. innerhalb des ‚footprints‘, ganz unter Schutz gestellt.

**Davos:** Der Davoser Seehornwald (GR, 46°48'55.2" N, 9°51'21.3" E) liegt auf 1639 m ü.M., eingerahmt vom Davoser See auf der nordwestlichen Seite und dem Seehorn auf südöstlicher Seite (Abbildung 5). Laut den ‚footprint‘-Berechnungen nach Kljun *et al.* (2004) sind die Eddy-Kovarianz-Messungen vor allem durch die Fichten dominiert mit marginalem Einfluss der Bebauungszone der Stadt Davos am äussersten südwestlichen Rand der ‚footprint‘-Fläche (Abbildung 5). Seit den 1990er Jahren wird der Seehornwald als ökophysiologische Versuchsfläche genutzt (NFP14+) und seit 2006 ist die Fläche auch Teil des LWF (langfristige Waldökosystem-Forschungsfläche) der WSL.

Das relativ kühle Klima in Davos mit 4° C Jahresdurchschnittstemperatur und 1060 mm Jahresniederschlag ist typisch für die subalpine Stufe der Alpen. Die beiden überwiegenden Bodentypen sind nach der ‚World Reference Base of Soil Resources‘ (IUSS Working Group WRB 2007) als Rendzina, Podsol und Kambisol klassifiziert. Der Davoser Wald ist stark von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) dominiert, mit nur vereinzelt Lärchen (*Larix decidua* Miller). Das Alter der Fichten variiert zwischen 200 und 390 Jahre (WSL, 2009), die maximale Baumhöhe beträgt 25 m und der LAI ist ca. 9 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>. Der lückenhafte Unterwuchs besteht hauptsächlich aus Zwergsträuchern der Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus* L.) und der Gebirgs-Moorbeere (*Vaccinium gaultherioides* L.), sowie aus Moosmatten (v.a. *Sphagnum* sp. Ehrh.). Der Seehornwald wird nachhaltig im Plenterbetrieb bewirtschaftet. Die Kernzone der Untersuchungsfläche wird nicht forstwirtschaftlich genutzt. Für eine dokumentierte Periode über die letzten 21 Jahre wurden nur 7 von den 500 Fichten in einer 0.6 ha grossen Fläche entfernt. Die meisten davon nach einem schweren Sturm im Jahr 1990. 2006 wurde eine 1750 m<sup>2</sup> grosse Waldfläche im nordöstlichen ‚footprint‘ gerodet.

Weitere Informationen zu den beiden Standorten finden sich im Bericht von Rühr (2009).

### 3.2. Datenqualität

Die verwendeten Daten umfassen Meteo-, Eddy Kovarianz (EC)- und Dendrometer-Daten (DR) der zwei Untersuchungsstandorte Davos Seehornwald und Lägeren. In Davos existieren fast lückenlose Messreihen aller Messgrössen ab 1998. EC-Messungen wurden anfangs des Jahres 1997 begonnen. Ende 2005 wurde die ‚closed-path‘ EC-Messanlage durch eine ‚open-path‘ Technik ersetzt. Diese Umstellung hat nach bisherigen Erkenntnissen zwar keinen grundsätzlichen ‚Datenknick‘ verursacht, könnte im Detail (z.B. auf einer höher aufgelösten Zeitskala) aber Unterschiede in der Datenqualität verursacht haben. Bei der ‚open-path‘ Methode musste eine noch wenig etablierte Korrektur (die so genannte ‚Burba correction‘) angewendet werden, was zur Folge haben kann, dass die hier präsentierten EC-Daten ab 2006 später noch geringfügige Veränderungen erfahren könnten. Dann nämlich, wenn neue Erkenntnisse eine Verbesserung dieser Korrektur-Methodik bringen und damit eine Neuberechnung der EC-Daten nach sich zögen.

Im Oktober 2006 wurde zudem vom Forstamt Davos (ohne Absprache mit uns) eine ca. 25 x 70 m (1750 m<sup>2</sup>) grosse Fläche im ‚footprint‘ der EC-Anlage gerodet. Die Rodungsfläche hatte ein geschätztes statistisches Gewicht von ca. 30 % auf die EC-Messungen. Eine Analyse wie stark sich dieses Ereignis auf die folgenden Jahre auswirkte wurde bisher noch nicht gemacht, es gibt (erstaunlicherweise) aber Hinweise darauf, dass das NEP in den Jahren 2007 und 2008 deshalb eher zugenommen hat. Ebenfalls im Jahr 2006 wurde ein Teil der 12 Punktdendrometer durch neue Modelle ersetzt. Dabei fielen gewisse Bäume aus dem Monitoring-Programm heraus und andere wurden neu hinzugenommen. Da aber immer ein Teil der alten Geräte und Bäume durchgehend (bis heute) betrieben wurden, konnten die Stammradiusänderungs-Daten von Davos problemlos homogenisiert werden. Im Jahr 2008 herrschte auf Grund des Baus einer neuen Lawingalerie der Rhätischen Bahn während des ganzen Sommers ein sehr dichter Lastwagenverkehr durch den Seehornwald. Nach einer Winterpause setzte sich der Lastwagenverkehr im Sommer 2009 fort und wurde im Juli 2009 abgeschlossen. Beeinflusst wurden v.a. die EC-Messungen, die während den Verkehrszeiten höhere Messschwankung aufwiesen. Grundsätzlich ist aber davon auszugehen, dass zwar die Variabilität der gemessenen CO<sub>2</sub>-Flüsse auf Halbstundenbasis zugenommen hat, dass aber der Nettoeffekt auf die Jahressumme nicht massgeblich verfälscht wurde.

Die holzanatomischen Jahrringbreiten-Messungen im Seehornwald wurden an 10 Stammscheiben aus der oben beschriebenen Rodungsfläche (Herbst 2006) gemacht, sowie an 5 Bohrkernen die im Som-

mer 2009 genommen wurden. Die beiden Datensätze wurden homogenisiert und für die Bestimmung des jährlichen Holzzuwachses (*RW*) verwendet.

An der Lägeren konnten wir auf sehr gute Meteo (NABEL)- und EC-Daten ab dem Jahr 2005 zurückgreifen. Dendrometer-Daten sind ab dem Jahr 2006 vorhanden. Allerdings enthalten diese Daten z.T. grössere Datenlücken. Eine erste Serie von 10 Dendrometern lieferte Daten (mit Unterbrüchen) bis zum November 2007, eine zweite Serie von 10 Dendrometern wurde im Mai 2008 gestartet. Das Fehlen einer gemeinsamen Messperiode der beiden Dendrometerserien macht zum jetzigen Zeitpunkt eine Homogenisierung der ersten beiden Jahre mit dem dritten Jahr unmöglich. Die beiden Dendrometer-Datensätze mussten als zwei gesonderte Messreihen betrachtet werden und dies limitiert selbstredend die Aussagekraft der *DR*-Daten von der Lägeren beträchtlich. Die gemachten Aussagen bezüglich des Standorts Lägeren beziehen sich daher fast ausschliesslich auf die vierjährige EC-Messserie.

### 3.3. Stammradiusmessungen und ihre Differenzierungen

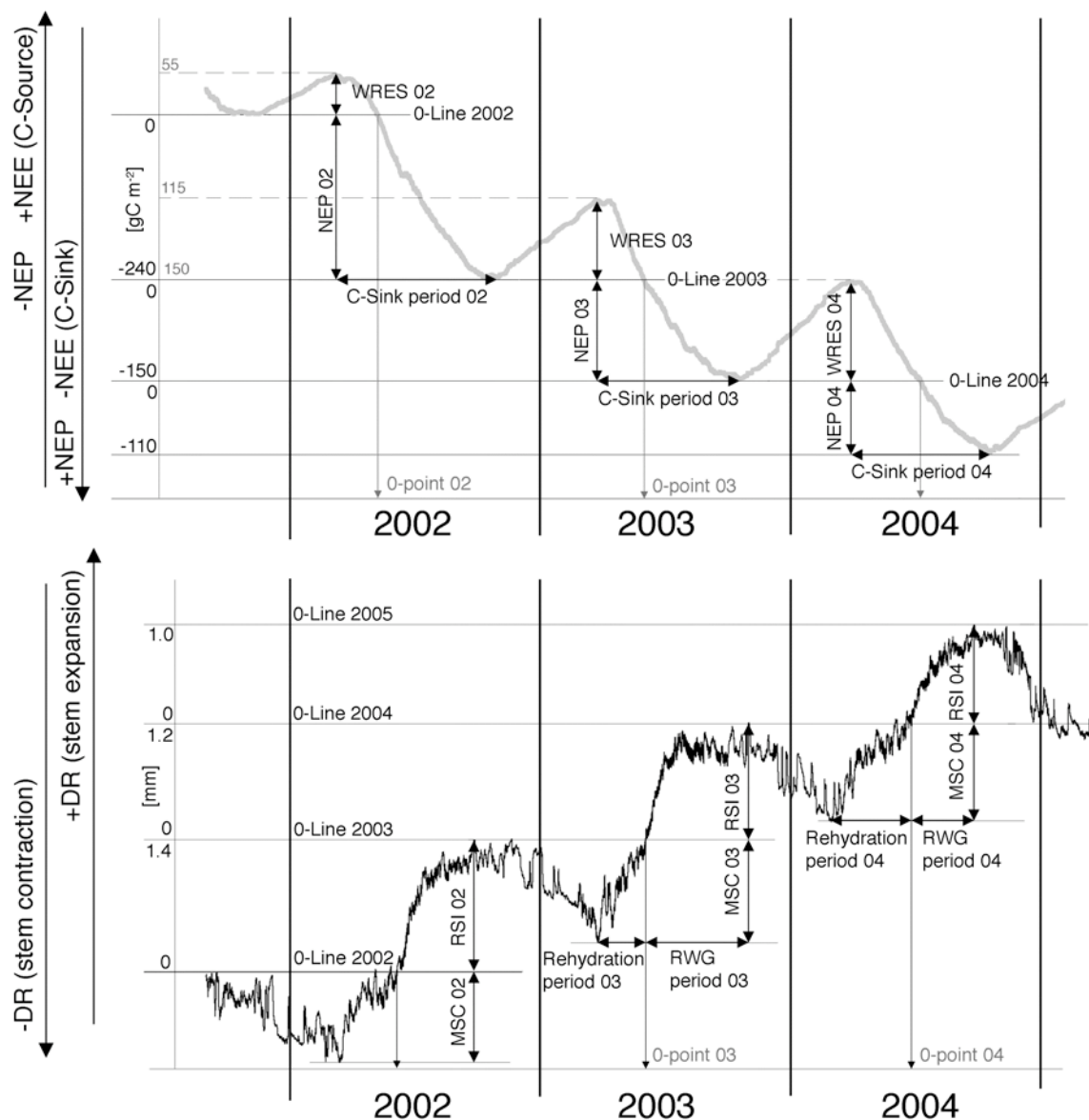
Punktdendrometer messen die Stammradiusänderungen (*DR*) von Baumstämmen. Diese Stammradiusänderungen integrieren verschiedene Prozesse die sich überlagern und die je nach Betrachtungszeitraum stärker zu Tage treten und die man mit etwas Fachwissen unterscheiden kann (Zweifel *et al.*, 2001; Daudet *et al.*, 2005; Zweifel *et al.*, 2007; Turcotte *et al.*, 2009):

Wenn der Stammradius grösser wird, geschieht das auf Grund (1) der Quellung der Rinde, (2) des Wachstums von Xylem- (Holz) Zellen und/oder (3) auf Grund der Bildung von Phloem- (Rinden) Zellen. Schrumpft der Stammradius geschieht dies (4) auf Grund des Wasserentzugs aus der Rinde und/oder (5) weil Phloemzellen absterben. Normalerweise schrumpfen die Stämme tagsüber und dehnen sich nachts wieder aus. Der Grund dafür liegt im Wasserhaushalt der Pflanzen: Wird dem Baum Wasser über die Blätter entzogen (Transpiration), wird dieser Wasserbedarf neben dem Nachfluss aus den Wurzeln auch aus den internen Wasserspeichern gedeckt. Ein solcher Wasserspeicher befindet sich in der Rinde und bei dessen Entleerung schrumpft der Stamm. Nachts oder bei Regen werden diese Speicher wieder gefüllt und der Stamm dehnt sich aus. Dieser Wasserhaushalts-Komponente überlagert ist das kambiale Wachstum des Stammes, was eine zeitlich hochaufgelöste Aufzeichnung des Holzwachstums über die Jahre erlaubt. Die Differenzierung der Stammradiusmessungen in die verschiedenen Fraktionen (1-5) lässt sich nicht für jede beliebige Zeitperiode gleich exakt bestimmen. Im Grundsatz gilt, je kürzer die Betrachtungsperiode, desto grösser ist der Wasserhaushaltsanteil an *DR* und je länger die Betrachtungsperiode, desto gewichtiger wirken sich die Wachstumsprozesse aus. Je nach Baumart und Standort verschieben sich die Gewichte dieser beiden *DR*-Komponenten ebenfalls: Bäume und Standorte mit grossem Wachstum verkleinern den Einfluss des Baumwasserhaushalts, Bäume und Standorte mit kleinem Wachstum vergrössern ihn.

Ein spezielles Phänomen tritt im Winter auf, wenn die Baumstämmen gefrieren. Ab Minustemperaturen von ca. -5°C gefriert zuerst das Wasser in den Leitelementen des Holzes nicht aber in der Rinde (Zweifel & Häsler, 2000; Mayr *et al.*, 2007). Dieser Zustand von Eis im Holz und gleichzeitig noch ungefrorenem Wasser in der Rinde führt zu einer sehr schnellen Entwässerung der Rinde, was zu Stammschrumpfungen (*MSC*) führen, die über 10x grösser sind und schneller ablaufen (ca. 0.2 mm/Tag) als das was man üblicherweise an Veränderung an einem Sommertag misst (ca. 0.02 mm/Tag). Das gegenteilige Phänomen einer rasanten Stammausdehnung tritt auf, wenn die Stämme wieder tauen. Diese frostbedingte Rindenentwässerung wird als Mechanismus zum Schutz vor Frostschäden verstanden. Offensichtlich richtet gefrierendes Wasser im Holz (tote Xylemzellen) keine Schäden an, ganz im Gegensatz zur Eisbildung in lebenden Rindenzellen. Das Ausmass dieser frostbedingten Schrumpfungen der Baumstämmen bestimmt massgeblich die Wachstums- und Assimilationsleistung der Bäume in der darauf folgenden Vegetationsperiode. Die erst rudimentär verstandenen Zusammenhänge deuten darauf hin, dass ein strenger (kalter) Winter zu einer grösseren Entwässerung der Bäume aber auch zu einer grösseren Respiration führt, was zusammen mehr Substanz (u.a. Kohlenstoff) und Zeit erfordert bis die Bäume diese Defizite wieder geschlossen haben. Die Folge ist ein späterer Zeitpunkt ab wann das Holzwachstum einsetzt und auch ab wann das Waldökosystem die Schwelle zur C-Senke nach Kompensation der Winterrespiration überschreitet. Damit verbunden ist dann eine kleinere Netto-



Ökosystem-Leistung im entsprechenden Jahr (Abbildung 2 und Abbildung 6).



**Abbildung 6.** Aufbereitung der Netto-Ökosystem-Austauschraten (*NEE*) aus den Eddy Kovarianz-, und der Stammradiusänderungen (*DR*)-Messungen für die Datenanalyse. *NEP<sub>Jahr</sub>*: aufsummierte Netto-Ökosystem-Leistung des Waldes pro Jahr (positive Werte entsprechen einer C-Senke, negative einer C-Quelle,  $NEP = -NEE$ ), *WRES*: aufsummierte Winterrespiration, *RSI*: radiales Holzwachstum, *MSC*: maximale Stammschrumpfung im Winter, 0-Linien für *NEP* und *DR*. Die Periode vom minimalen *DR* im Winter bis zum 0-Punkt (Schnittpunkt der *DR*-Kurve mit der 0-Linie) wird als Rehydrationsperiode bezeichnet, die Periode vom 0-Punkt bis zum maximalen *DR* (97.5% des Maximums) ist die Holzwachstumsperiode (*RWG*-Periode). Entsprechend wird der Zeitpunkt an dem die *NEP*-Kurve die 0-Linie schneidet als 0-Punkt (Winterrespirations-Kompensations-Punkt) und die Periode zwischen dem Maximum und dem Minimum der aufsummierten *NEP*-Kurve als die C-Senken-Periode eines Jahres bezeichnet. Das Datum des *NEP*-0-Punkts und des *DR*-0-Punkts sind nicht identisch, liegen aber meistens nur wenige Tage auseinander.

Um das eigentliche Holzwachstum vom wasserbedingten Quellen der Rinde zu unterscheiden wird die Nulllinie des jeweils laufenden Jahres auf das Summenmaximum des vorangegangenen Jahres festgelegt (Abbildung 6). Damit verbunden ist die Annahme, dass schrumpfende Stämme nie an Holzvolumen verlieren, sondern sich immer nur wassergehaltsbedingt oder dann als Folge von absterbenden Rindenzellen zusammenziehen. Die *DR*-Nulllinie entspricht damit dem Stammradiuszustand, an welchem

fehlendes Wasser des Winters vollständig ersetzt wurde und folglich grössere Radian mit Holzwachstum gleichzusetzen sind. Änderungen in der Anzahl Rindenzellen können mit diesem Ansatz nicht erfasst werden, werden aber integrativ in der Summenkurve übers Jahr berücksichtigt. Diese Art der Definition der Nulllinie verhindert grosse zufällige Verfälschungen von *RSI* auf Grund der sehr schnellen, frost-induzierten Winterschrumpfungen der Stämme und erklärt, warum die Summenkurve von *DR* am 1. Tag des Jahres nicht bei Null beginnt.

Um die Summenkurven der EC-Messungen mit den *DR*-Daten vergleichen zu können, wurde die Nulllinie für die *NEP* jedes Jahres so gewählt, dass sie dem Minimum der Summenkurve des vorangegangenen Jahres entspricht (Abbildung 6). Damit lässt sich das *WRES* quantifizieren und das *NEP* wird erst dann positiv dargestellt – und der Wald damit zur C-Senke – wenn der C-Verlust des Winters kompensiert ist. Mit dieser Definition des *NEP*, an dem die Summenkurve am 1. Januar nicht bei Null beginnt, sind die Daten direkt mit den Stammradiusdaten und den entsprechenden innerjährlichen Ausdehnungs- und Schrumpfungs-Differenzierungen zu vergleichen.

### 3.4. Die Eddy-Kovarianz Methode

Die Messung des Gasaustausches auf Ökosystem-Ebene mit traditionellen Methoden, wie den Kammer-Messungen mit nachfolgender Skalierung auf die Ökosystem-Ebene ist problematisch, da die Messmethodik grosse Variationen aufweist (wenige Punktmessungen, selektiver Charakter der Kammernmessungen, etc.; Baldocchi, 2003). Die Repräsentativität von Biomasseinventare als Mass für den jährlichen Gasaustausch eines Ökosystems ist abhängig von der zeitlichen Auflösung mit denen diese durchgeführt werden. Ausserdem decken sie kurzfristige bauminterne C-Senken und Quellen nicht ab, was aber vor allem für Zeiträume unter 5 Jahren relevant zu sein scheint (siehe Kapitel 2.4). Die einzige direkte und zeitlich hochaufgelöste Messung des Gasaustausches zwischen Atmosphäre und Biosphäre auf Ökosystem-Ebene wird mit der Eddy-Kovarianz-Methode ermöglicht. ‚Eddy‘ ist das englische Wort für Wirbel oder Strudel, bezeichnet in der Atmosphäre also Turbulenzelemente, die beim Austausch von Energie und Luftmassen eine wichtige Rolle spielen. Oberhalb der Vegetation werden im hochfrequenten Bereich (20 Hz) die Windgeschwindigkeiten im 3-dimensionalen Raum mittels eines 3-D-Ultraschall-Anemometers und die Konzentrationen eines Gases (in unserem Fall  $\text{CO}_2$ ) mittels eines Infrarot-Gasanalysators (IRGA) gemessen. Aus der Kovarianz der vertikalen Windgeschwindigkeiten und der Gaskonzentrationen über ein bestimmtes Zeitintervall (z.B. 30 min) lässt sich dann der mittlere Gasaustausch berechnen.

Es gibt zwei unterschiedliche Typen von IRGAs: den ‚closed path‘ und den ‚open path‘. Der ‚closed-path‘ IRGA (in Davos verwendet von 1997 bis 2005) ist ein geschlossenes System, bei dem die Luft von einer externen Pumpe angesaugt wird. Die Luft wird dabei in das Gehäuse-Innere am optischen Pfad des IRGA vorbei geleitet, wo sie gemessen wird. Das hat den Vorteil, dass auch bei schlechten Wetterbedingungen, wie bei Regen und Nebel, die Messungen brauchbare Ergebnisse liefern. Allerdings hat man durch die Weiterleitung der Luft mit Druckdifferenzen und Zeitverzögerungen zu kämpfen. Beim ‚open-path‘ IRGA hingegen (in Davos ab 2005 und an der Lägeren seit Messbeginn im Jahr 2004 verwendet), bei dem der optische Pfad praktisch frei liegt und die Luft direkt und zeitgleich mit den Winddaten gemessen wird, hat man durch eine Verschmutzung bei schlechten Wetterbedingungen einen viel grösseren Datenausfall. Zudem weisen die Daten eine grössere Streuung auf und es müssen nachträglich diverse Korrekturen (Burba-Korrektur, etc.) appliziert werden, was zu weiteren Unsicherheiten führt (Järvi *et al.*, 2009).

Ein bezüglich Datenqualität kritischer Punkt ist das Filtern der Daten und Wiederauffüllen der Messlücken. Mittlerweile existieren zahlreiche unterschiedliche Ansätze, die einen grossen Einfluss auf das Endergebnis (z.B. die Jahressummen) haben (z.B. Falge *et al.*, 2001). EC-Messungen funktionieren am besten über homogenem, flachem Grund und bei guten Turbulenzbedingungen. Vor allem während der Nacht gibt es aber häufig Perioden mit stabiler Schichtung der Atmosphäre, ungenügender Turbulenz und erheblicher Advektion, was die EC-Messungen verfälscht und womit vor allem die nächtlichen Respiationsflüsse oftmals unterschätzt werden. Studien an unseren beiden Messstandorten haben ergeben, dass die EC-Messungen an der Lägeren vor allem durch horizontale Advektion durch Kaltluftabfluss beeinflusst werden, während in Davos Advektion nur eine marginale Rolle spielt. Weitere Analy-

### 3.5. Die wichtigsten CO<sub>2</sub>-Senken und Quellen im Wald

Das Diagramm zeigt den Kohlenstoffkreislauf in einem Ökosystem mit einem Baum. Die Luft ist in zwei Bereiche unterteilt: links grün für Photosynthese und rechts rot für Atmung. Ein grüner Pfeil zeigt den Netto-CO<sub>2</sub>-Austausch nach unten, ein roter nach oben. Verschiedene Atmungsarten sind markiert: Blattatmung, Stammatmung und Wurzelatmung. Die unterirdische Atmung umfasst die Atmung von Mikroben und SOM. Die oberirdische Atmung umfasst die Atmung der Pflanze und der Streu. Die Photosynthese führt zur Speicherung von Kohlenstoff im Baum und zur Verteilung an andere Teile des Ökosystems.

Vor allem die Baumrespiration, die immerhin 30-70% zur Gesamtrespiration beiträgt, ist noch relativ schlecht verstanden. Bäume können schätzungsweise bis zu 50% des durch Photosynthese gebundenen CO<sub>2</sub> über Respiration der Blätter, dem Stamm und den Wurzeln wieder frei setzen. Generell unterscheidet man zwischen Unterhalts- und Wachstumsrespiration. Erstere dient zur Aufrechterhaltung von Ionen- und Metabolitengradienten, Transportprozessen und physiologischen Anpassungen an sich ändernde Umweltbedingungen. Sie findet das ganze Jahr statt und ist stark temperaturabhängig. Zweitere, die Wachstumsrespiration, ist die Folge von metabolischen Prozessen zur Bildung von neuem Gewebe und findet nur während der Wachstumsphase eines Baumes statt. Jüngste Studien belegen, dass die Baumrespiration auch stark durch den Safffluss, also die Wasserverfügbarkeit und die Transpirationsleistung des Baumes beeinflusst wird (Saveyn *et al.*, 2008). Ausserdem wird der CO<sub>2</sub>-Refixierung durch Rindenphotosynthese neuerdings eine grosse Bedeutung im CO<sub>2</sub>-Kreislauf der Bäume beigemessen (Teskey *et al.*, 2008). Nähere Informationen über die Bodenrespiration und ihre Diffe-

renzierungen sind im Bericht Rühr (2009) zu finden.

### 3.6. Klima-NEP-Modell von Eugster-Etzold

Das *NEP* von Davos der Jahre 1997 bis 2008 lässt sich mit einem einfachen linearen Modell beschreiben:

$$NEP = 41.8 * (Tmin.MAM) + 0.34 (Psum. DJF-1) - 0.21*(Psum.DJF) + 46.8* (Tmin.Grow-1) + 44.9$$

mit *Tmin.XXX* als durchschnittliche Tagesminimumtemperaturen der drei Monate *XXX*, *Psum* = Niederschlagssumme, (-1) = vorheriges Jahr, *XXX*: *MAM* = März bis Mai, *DJF* = Dezember vorheriges Jahr bis Februar aktuelles Jahr, *Grow* = Vegetationsperiode. In Tabelle 1 sind Korrelationen von *NEP* mit verschiedenen Klimavariablen gelistet, in Abbildung 4 die gemessenen und modellierten *NEP*-Werte, sowie die erklärenden Klimavariablen dargestellt. Das Modell erklärt 82% (adj.  $R^2$ ,  $p=0.002$ ) der Varianz von 1997 bis 2008, wobei die Frühlingstemperatur kombiniert mit dem Niederschlag des vorherigen Winters vor einem Jahr den grössten Varianzanteil erklärt (76%), der Niederschlag des vorangegangenen Winters und die Minimumtemperatur der vergangenen Vegetationsperiode das Modell nur noch geringfügig verbessern. Schliesst man das Jahr 1998 aus, steigt adj.  $R^2$  auf 0.89,  $p=0.001$ . Gemessen an den Modellberechnungen wurde in diesem Jahr vergleichsweise wenig Kohlenstoff aufgenommen. Jedoch decken sich die *NEP*-Jahressummen aus den EC-Messungen gut mit den Dendrometer-Messungen (Abbildung 2a). Allerdings bleibt das *NEP* im Verhältnis zur Winterrespiration sehr niedrig (Abbildung 2c). Während die Klimabedingungen im Frühling und Sommer 1998 durchschnittlich waren, war der Herbst extrem kalt, nass und sonnenarm, was zumindest die Diskrepanz zwischen Modell (das sich ja überwiegend auf Frühlings- und Winterdaten stützt) und den direkten Messungen erklären könnte.

Für die Lägeren konnte eine Anwendung des Davos-Modells aufgrund der wenigen Datenpunkte ( $n=4$ ) nicht geprüft werden und auch das Formulieren eines für diesen Standort spezifischen Modells ist aus demselben Grund wenig sinnvoll. Mit Blick auf die Einzelkorrelationen zwischen dem *NEP* und den Klimavariablen (Tabelle 1) ist allerdings zu erwarten, dass das Davos-Modell für die Lägeren nicht greift. An der Lägeren sind die Klimabedingungen der Sommermonate viel ausschlaggebender als die des Winters, trotzdem erwarten wir auch für diesen Standort, dass nur ein Modellansatz der auch retrospektive Klimavariablen berücksichtigt zum Erfolg führt.

**Tabelle 1.** Ergebnisse für Korrelationen zwischen *NEP* und Klimavariablen für Davos und Lägeren.  
 (-1): vorheriges Jahr, (*DJF*): Dezember vorheriges Jahr bis Februar aktuelles Jahr, (*MAM*): März bis Mai aktuelles Jahr, (*JJA*): Juli bis August aktuelles Jahr, (*SOM*): September-Oktober aktuelles Jahr.

			NEP Davos		NEP Lägeren	
			adj. R <sup>2</sup>	p	adj. R <sup>2</sup>	p
<b>Vegetationsperiode</b> Länge			0.23	0.07	0.22	0.31
<b>Vegetationsperiode</b> Start			-	-	0.59	0.15
<b>Kompensationstag</b> (ab.1.1.)			<b>0.61</b>	<b>0.07*</b>	<b>0.87</b>	<b>0.04*</b>
<b>Kompensationstag</b> (ab NEP <sub>min</sub> des Jahres -1)			<b>0.69</b>	<b>&lt;0.001***</b>	<b>0.88</b>	<b>0.04*</b>
<b>Temperatur</b>	Vegetationsperiode-1	Min	<b>0.22</b>	<b>0.07*</b>	0.08	0.38
		Mittel	0.07	0.21	0.32	0.26
		Max	0.00	0.35	0.45	0.20
	(DJF)	Min	-0.06	0.57	0.22	0.31
		Mittel	-0.06	0.58	0.12	0.36
		Max	-0.09	0.80	0.04	0.40
	(MAM)	Min	<b>0.48</b>	<b>0.01*</b>	<b>0.94</b>	<b>0.02*</b>
		Mittel	<b>0.36</b>	<b>0.02*</b>	<b>0.93</b>	<b>0.02*</b>
		Max	<b>0.22</b>	<b>0.07*</b>	<b>0.91</b>	<b>0.03*</b>
	(JJA)	Min	-0.05	0.52	0.57	0.16
		Mittel	-0.09	0.73	<b>0.72</b>	<b>0.10</b>
		Max	-0.09	0.81	<b>0.69</b>	<b>0.11</b>
	(SON)	Min	-0.08	0.67	0.23	0.30
		Mittel	-0.04	0.48	0.25	0.29
		Max	-0.02	0.40	0.28	0.28
	(Jahr)	Min	-0.02	0.39	0.46	0.84
		Mittel	-0.08	0.66	0.48	0.88
		Max	-0.10	0.92	0.49	0.93
	(JJA -1)	Min	-0.01	0.86	0.31	0.26
		Mittel	-0.01	0.91	0.29	0.28
		Max	-0.09	0.82	0.29	0.28
<b>Niederschlag</b>	(DJF)	Summe	0.09	0.74	-0.27	0.60
	(MAM)	Summe	-0.07	0.59	0.38	0.23
	(JJA)	Summe	-0.01	0.37	<b>0.93</b>	<b>0.02*</b>
	(SON)	Summe	-0.02	0.39	<b>0.70</b>	<b>0.10</b>
	(Jahr)	Summe	0.01	0.32	-0.34	0.67
	(JJA-1)	Summe	-0.09	0.77	0.20	0.32
	(DJF-1)	Summe	<b>0.58</b>	<b>0.002**</b>	-0.38	0.72
<b>Globalstrahlung</b>	(DJF)	Mittel	<b>0.26</b>	<b>0.05*</b>	-0.39	0.73
	(MAM)	Mittel	-0.03	0.43	<b>0.87</b>	<b>0.04*</b>
	(JJA)	Mittel	-0.07	0.61	<b>0.79</b>	<b>0.07*</b>
	(SON)	Mittel	-0.02	0.38	-0.44	0.80
	(Jahr)	Mittel	-0.03	0.42	<b>0.88</b>	<b>0.04*</b>
	(MAM-1)	Mittel	<b>0.55</b>	<b>0.01*</b>	-0.25	0.58
	(DJF-1)	Mittel	<b>0.48</b>	<b>0.01*</b>	0.71	0.25

### 3.7. Nomenklatur

Bezeichnung	Kürzel	Einheit
Eddy-Kovarianz (Eddy Covariance)	EC	[ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]
Kohlenstoff-Senke	C-Senke	[gC m <sup>-2</sup> ]
Kohlenstoff-Quelle	C-Quelle	[gC m <sup>-2</sup> ]
Netto-Ökosystem-CO <sub>2</sub> -Austausch Wald-Atmosphäre (Net Ecosystem carbon Exchange)	NEE	[gC m <sup>-2</sup> ]
Netto-Ökosystem-Leistung (Net Ecosystem Productivity) NEP = -NEE	NEP	[gC m <sup>-2</sup> ]
Maximale Winter-Respirations-Leistung = Kulminationspunkt des NEP (maximum Winter Respiration)	WRES	[gC m <sup>-2</sup> ]
Stammradiusänderungen aufsummiert	DR	[ $\mu\text{m}$ ] oder [mm]
Radiales Holzwachstum = jährliches DR (Radial Stem Increment)	RSI	[ $\mu\text{m}$ ] oder [mm]
Max. Winterschrumpfung des Stammes (Maximum Stem Contraction in winter)	MSC	[ $\mu\text{m}$ ] oder [mm]
Jahrringbreite (Annual Ring Width)	RW	[ $\mu\text{m}$ ] oder [mm]

### 3.8. Referenzliste

- Ahrends HE, Etzold S, Kutsch WL, Stoeckli R, Bruegger R, Jeanneret F, Wanner H, Buchmann N, Eugster W. 2009. Tree phenology and carbon dioxide fluxes: use of digital photography for process-based interpretation at the ecosystem scale. *Climate Research* **39**: 261-274.
- Baldocchi DD. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future *Global Change Biology* **9**(4): 479-492.
- Chen B, Andrewblack T, Coops NC, Krishan P, Jassal R, Brümmer C, Nesic Z. 2009. Seasonal controls on interannual variability in carbon dioxide exchange of a near-end-of rotation Douglas-fir stand in the Pacific Northwest, 1997-2006. *Global Change Biology* **15**: 1962-1981.
- Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogee J, Allard V, Aubinet M, Buchmann N, Bernhofer C, Carrara A, Chevallier F, De Noblet N, Friend AD, Friedlingstein P, Grunwald T, Heinesch B, Keronen P, Knohl A, Krinner G, Loustau D, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Ourcival JM, Papale D, Pilegaard K, Rambal S, Seufert G, Soussana JF, Sanz MJ, Schulze ED, Vesala T, Valentini R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* **437**(7058): 529-533.
- Daudet FA, Ameglio T, Cochard H, Archilla O, Lacointe A. 2005. Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. *Journal of Experimental Botany* **56**(409): 135-144.
- Delpierre N, Soudani K, Francois C, Kostner B, Pontailier JY, Nikinmaa E, Misson L, Aubinet M, Bernhofer C, Granier A, Grunwald T, Heinesch B, Longdoz B, Ourcival JM, Rambal S, Vesala T, Dufrene E. 2009. Exceptional carbon uptake in European forests during the warm spring of 2007: a data-model analysis. *Global Change Biology* **15**(6): 1455-1474.
- Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grunwald T, Hollinger D, Jensen NO, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai CT, Law BE, Meyers T, Moncrieff H, Moors E, Munger JW, Pilegaard K, Rannik U, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange *Agricultural and Forest Meteorology* **107**(1): 43-69.
- Granier C, Tardieu F. 2009. Multi-scale phenotyping of leaf expansion in response to environmental changes: the whole is more than the sum of parts. *Plant Cell and Environment* **32**(9): 1175-1184.
- Gricar J, Cufar K. 2008. Seasonal dynamics of phloem and xylem formation in silver fir and Norway spruce as affected by drought. *Russian Journal of Plant Physiology* **55**(4): 538-543.



- Hoch G, Richter A, Korner C. 2003.** Non-structural carbon compounds in temperate forest trees. *Plant Cell and Environment* **26**(7): 1067-1081.
- Järvi L, Mammarella I, Eugster W, Ibrom A, Siivola E, Dellwik E, Keronen P, Burba G, Vesala T. 2009.** Comparison of net CO<sub>2</sub> fluxes measured with open- and closed-path infrared gas analyzers in urban complex environment. *Boreal Environment Research* **14**.
- Jolly WM, Dobbertin M, Zimmermann NE. 2005.** Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters* DOI: 10.1029/2005GL023252.
- Kljun N, Calanca P, Rotach MW, Schmid HP. 2004.** A simple parameterisation for flux footprint predictions. *Boundary-Layer Meteorology* **112**: 503-523.
- Mayr S, Cochard H, Améglio T, Kikuta SB. 2007.** Embolism formation during freezing in the wood of *Picea abies*. *Plant Physiology* **143**: 60-67.
- Rühr NK. 2009.** Soil respiration fluxes and carbon sequestration of two mountain forests in Switzerland. Interner Bericht, Bundesamt für Umwelt BAFU. Bern. Vertrag-Nr: 04.1140.PJ / I153-2413.
- Saveyn A, Steppe K, McGuire MA, Lemeur R, Teskey RO. 2008.** Stem respiration and carbon dioxide efflux of young *Populus deltoides* trees in relation to temperature and xylem carbon dioxide concentration. *Oecologia* **154**(4): 637-649.
- Schmid S, Thurig E, Kaufmann E, Lischke H, Bugmann H. 2006.** Effect of forest management on future carbon pools and fluxes: A model comparison. *Forest Ecology and Management* **237**(1-3): 65-82.
- Schweingruber FH. 1993.** *Jahrring und Umwelt. Dendroökologie*. Birmensdorf: WSL.
- Teskey RO, Saveyn A, Steppe K, McGuire MA. 2008.** Origin, fate and significance of CO<sub>2</sub> in tree stems. *New Phytologist* **177**(1): 17-32.
- Turcotte A, Morin H, Krause C, Deslauriers A, Thibeault-Martel M. 2009.** The timing of spring re-hydration and its relation with the onset of wood formation in black spruce. *Agricultural and Forest Meteorology* **149**(9): 1403-1409.
- Zweifel R, Häsler R. 2000.** Frost-induced reversible shrinkage of bark of mature, subalpine conifers. *Agricultural and Forest Meteorology* **102**: 213-222.
- Zweifel R, Item H, Häsler R. 2001.** Link between diurnal stem radius changes and tree water relations. *Tree Physiology* **21**: 869-877.
- Zweifel R, Steppe K, Sterck FJ. 2007.** Stomatal regulation by microclimate and tree water relations: interpreting ecophysiological field data with a hydraulic plant model. *Journal of Experimental Botany* **58**(8): 2113-2131.
- Zweifel R, Zeugin F, Zimmermann L, Newbery DM. 2006.** Intra-annual radial growth and water relations of trees – implications towards a growth mechanism. *Journal of Experimental Botany* **57**(6): 1445-1459.