

Baumwachstum und erhöhte Temperaturen

Matthias Dobbertin¹ und Arnaud Giuggiola²

¹ Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

² Université Bordeaux 1, Etudiant en licence «gestion des ressources forestières»
matthias.dobbertin@wsl.ch, arnaud.giuggiola@wanadoo.fr

Weltweit sind die Temperaturen im letzten Jahrhundert um 0,6 °C angestiegen, in der Schweiz war der Anstieg noch höher. Klimamodelle sagen einen weiteren Temperaturanstieg in diesem Jahrhundert voraus. Die Temperatur ist mitentscheidend für das Baumwachstum. Dieses hat in den letzten Jahrzehnten in Mitteleuropa deutlich zugenommen. Die stattfindende Erwärmung ist wahrscheinlich einer der Gründe dafür. Allerdings können extreme warm-trockene Sommer wie im Jahr 2003 den Zuwachs in den Tieflagen erheblich reduzieren, in den Hochlagen aber ansteigen lassen. In den inneralpinen Trockentälern reagiert das Waldwachstum wahrscheinlich besonders empfindlich auf Klimawandel, da hier die Wasserverfügbarkeit das Wachstum limitiert. Wie wird das Wachstum der Schweizer Wälder auf eine weitere Temperaturerhöhung reagieren? Im Folgenden soll der Zusammenhang zwischen Temperaturanstieg und Baumzuwachs untersucht werden.

1 Einleitung

1.1 Klimaerwärmung

Zwischen 1900 und 2000 sind die Temperaturen in der Schweiz um rund 0,8 °C angestiegen (BEGERT *et al.* 2005). Der grösste Teil dieses Anstieges erfolgte in den letzten 30 Jahren (REBETEZ 2001). Zukünftige Klima-Projektionen erwarten gerade für die Sommermonate einen weiteren mehr als doppelt so hohen Anstieg bis zur Mitte dieses Jahrhunderts (FREI 2004). Gleichzeitig wird befürchtet, dass sich die Klimavariabilität erhöhen wird (SCHÄR *et al.* 2004). Hitzesommer wie der Sommer 2003 in Europa könnten bis zum Ende dieses Jahrhunderts alle vier bis fünf Jahre stattfinden. Wie sich die Niederschlagsverhältnisse entwickeln könnten, ist weniger sicher. Generell wird von einem möglichen Anstieg der Niederschläge ausgegangen. Prognosemodelle für die Schweiz erwarten jedoch nur einen Anstieg der Winterniederschläge, im Sommer wird dagegen mit einem Rückgang gerechnet (FREI 2004).

Fazit: Begrenzte Wasserverfügbarkeit könnte den positiven Effekt höherer Temperaturen auf das Baumwachstum negieren.

1.2 Ansteigender Baumzuwachs

Seit den 1990er Jahren häufen sich die Berichte, dass die Wälder in Mitteleuropa mehr an Volumen zuwachsen als früher (SPIECKER *et al.* 1996; PRETZSCH 1992). Auch für die Schweizer Wälder fanden verschiedene Studien ansteigende Holzzuwächse (KÖHL 1996; BRÄKER 1996; ZINGG 1996). Die Frage nach den Ursachen dieses angestiegenen Stammzuwachses wurde in diesen Studien nicht untersucht. Ein EU-Projekt (RECOGNITION) sollte darüber Aufschluss geben. Da Höhenzuwachs kaum durch die Bestandesdichte beeinflusst wird, wurde die zeitliche Entwicklung der vergangenen Höhenzuwächse verglichen. Auf Flächen von ICP Forests (Level II), einem europäischen Dauerbeobachtungsnetz, zeigten Fichten, Buchen und Kiefern auf dem gleichen Standort heute rund 25 Prozent mehr Höhenzuwachs als noch vor rund 40 Jahren (EFI 2002). Dies galt auch für die Buchen auf der LWF-Fläche in Othmarsingen, der einzigen an der Studie beteiligten Schweizer Fläche (DOBBERTIN 2005). Als vermeintliche Hauptursache wurden die Stickstoffeinträge gesehen. Der Einfluss der angestiegenen Temperaturen wurde eher als gering eingeschätzt, allerdings mit zunehmender Tendenz in der Zu-

kunft. HASENAUER *et al.* (1999) fanden für österreichische Inventurdaten eine Temperatur bedingte Verlängerung der Wachstumsperiode und parallel dazu einen Anstieg des Durchmesserzuwachses.

BOISVENUE und RUNNINGS (2006) untersuchten verschiedene Veröffentlichungen zur Veränderung der Produktionsleistung von Wäldern seit etwa Mitte des letzten Jahrhunderts. Von den 49 untersuchten Studien fanden drei Viertel eine erhöhte Produktivität und nur etwa 10 Prozent einen Rückgang der Produktivität. Eine andere Übersichtsstudie fand, dass sich in den letzten Jahrzehnten auf der Nordhalbkugel die Vegetationszeit um 10 bis 20 Tage verlängert hat (LINDERHOLM 2006). In den letzten 40 Jahren haben sich in Europa besonders die phänologischen Frühjahrsphasen, wie z.B. Blattentfaltung und Blüte deutlich verfrüht (MENZEL und FABIAN 1999).

Fazit: Um das Potential der zukünftigen Kohlenstoffspeicherung und Holzproduktion zu bestimmen, ist es nötig die Auswirkung des jetzigen und zukünftig erwarteten Temperaturanstiegs auf das Wachstum der Bäume zu bestimmen.

2 Temperaturen und Baumwachstum

2.1 Pflanzenwachstum

Die Höhe des Pflanzenwachstum hängt von der Photosynthese, der Atmung, der Reservestoffbildung und des Umbaus von Zuckern in Feststoffe einer Pflanze ab (LARCHER 2001; KOZLOWSKI *et al.* 1991). Bäume als langlebige Pflanzen verwenden einen hohen Anteil der durch die Photosynthese gewonnenen Assimilate für die Sprossbildung. Durch den kontinuierlichen

Aufbau der Achsen, sprich Stamm und Äste, bei relativ geringer Erhöhung der Blattmasse, verringert sich der Anteil der Blattmasse an der Gesamtmasse mit dem Alter und kann auf eins bis fünf Prozent zurück gehen (LARCHER 2001). Dadurch ist das Verhältnis von Photosyntheseleistung und Veratmung bei Bäumen besonders schlecht.

Die Temperatur wirkt sich nun verschieden auf die Photosynthese, Veratmung, und den Umbau von Zuckern und Stärke in Zellgewebe aus. Vereinfacht gilt, dass Baumwachstum Kohlendioxyd, Wasser, Mineralstoffe, Lichtenergie und günstige Temperaturen benötigt (KOZLOWSKI *et al.* 1991).

Fazit: Sind weder Kohlendioxyd, Nährstoffe, noch Wasser oder Licht limitierend, so hängt die Reservestoffbildung oder das Wachstum der Bäume je nach phänologischer Phase von der Temperatur ab.

2.2 Niedrige Temperaturen

Die Beziehung zwischen Stammzuwachs und Klima ist durch die Jahrringforschung äusserst intensiv erforscht und beschrieben worden (FRITTS 1976; SCHWEINGRUBER 1996). Besonders der Einfluss des Wasserhaushaltes und der Einfluss der Temperatur an der nördlichen Verbreitungsgrenze auf den Stammzuwachs wurden eingehend beschrieben. Die Beziehung zwischen Temperatur und Jahrringbreite und Jahrringdicke konnten genutzt werden, um die Temperaturen vergangener Jahrhunderte zu rekonstruieren (ESPER *et al.* 2002; BRIFFA *et al.* 1995).

Die Baumgrenzen in hohen geographischen Breiten und in den Hochlagen der Berggebiete sind vor allem durch niedrige Temperaturen bestimmt. Dabei sind nicht nur niedrige Wintertemperaturen ausschlaggebend (LARCHER 2001), sondern auch niedrige Frühjahrs- und Sommertemperaturen (KOZLOWSKI *et al.* 1991). Niedrige Temperaturen wirken sich dabei nicht nur negativ auf die Photosyntheseleistung aus, sondern vor allem auf die Raten, mit der Reservestoffe in Wachstum umgesetzt werden (KOZLOWSKI *et al.* 1991; KÖRNER 1999).

Mehrere Studien fanden, dass bei Lufttemperaturen unter etwa 5 °C kein Stammzuwachs (LORIS 1981) oder keine Triebstreckung erfolgt (JAMES *et al.* 1994). WILPERT (1990) fand, dass Fichten in Baden-Württemberg erst dann mit dem Stammzuwachs begannen, wenn die Tagesmitteltemperaturen über mehrere Tage über 10 °C lagen. Ähnliches zeigen auch die Tannen auf der LWF-Fläche Vordemwald im Schweizer Mittelland (Abb. 2).

2.3 Bodentemperaturen

Eine sehr wichtige Rolle bei der Wachstumslimitierung spielen neben den Lufttemperaturen auch die Temperaturen im Boden (KÖRNER 1999; BALDOCCHI *et al.* 2005). Verschiedene Forschungen zeigen, dass bei Bodentemperaturen unter etwa 4 °C praktisch kein Wurzelwachstum von verschiedenen Baumarten im Alpengebiet stattfindet (TRANQUILLINI 1979; KÖRNER 1999). Andere Studien belegen, dass die Nettophotosynthese in Bäumen unterhalb von 7 °C Bodentemperatur durch diese stark negativ beeinträchtigt wird (HAVRANEK 1972) und das Streckungswachstum der Triebe trotz genügend hoher Lufttemperatur durch tiefe Bodentemperaturen limitiert ist (SCOTT *et al.* 1987). Mittels Kohlenstoff-Fluss-Messungen fanden BALDOCCHI *et al.* (2005), dass Laubwälder verschiedenster Forschungsflächen dann mit dem Wachstum (Kohlenstoffspeicherung) begannen, wenn die Bodentemperaturen den Wert der mittleren jährlichen Lufttemperaturen an einem Standort überschritten.

Der rasche Zuwachsrückgang von Bäumen an der oberen Waldgrenze, welcher nicht linear mit abnehmenden Lufttemperaturen erfolgt, lassen KÖRNER (1999) annehmen, dass nicht die Photosynthese oder Produktion von Assimilaten das Wachstum limitiert, sondern dass deren Umbau in strukturellen Kohlenstoff bei niedrigen Temperaturen gehemmt ist.

2.4 Extreme Hitze

Umgekehrt kann auch grosse Hitze zu reduziertem Wachstum durch erhöhten Energieaufwand für Atmung oder gar zu direkten Schäden führen. Nadelbäume der gemässigten und borealen Zonen können oberhalb 40 bis 50 °C, Laubbäume oberhalb 50 °C Schäden erleiden (LARCHER 2001). Optimale Photosynthese wird für viele Baumarten zwischen 25 und 30 °C angenommen, solange ausreichend Wasser verfügbar ist (LARCHER 2001). Natürlich gibt es auch hier grosse Unterschiede zwischen den Arten. Hohe Nachttemperaturen dagegen führen zu erhöhter Atmung (LARCHER 2001).

Fazit: Besonders niedrige Luft- und Bodentemperaturen, aber auch extreme Hitze limitieren das Baumwachstum im Alpenraum.

3 Baumwachstum im Jahresverlauf

3.1 Wachstums- und Vegetationsperiode

Es ist wichtig zwischen Vegetationszeit und tatsächlicher Wachstumsperiode zu unterscheiden. Die Vegetationszeit gibt die Periode an, in welcher potentiell Wachstum möglich ist. Sie wird in den gemässigten und borealen Breiten in der Regel durch das Auftreten von Spät- und Frühfrost begrenzt (LINDERHOLM 2006). Die Wachstumsperiode dagegen ist die Zeit, in der das tatsächliche Wachstum stattfindet, oder die Reservestoffe und die Knospenanlagen gebildet werden. Die klimatischen Bedingungen innerhalb der Wachstumsperiode und während der Reservestoff- oder Knospenbildung bestimmen in der Regel die Höhe des Wachstums. Die Vegetationsperiode ist nur dann wichtig, wenn sie die Reservestoffbildung, Knospenanlagen oder die Wuchsbedingungen eindeutig limitiert. Gleichfalls mag auch die Wachstumsperiode (z. B. die Zeit des Streckungswachstums der Triebe) wenig Einfluss auf die Höhe des Wachstums haben, wenn dieses durch die Reservestoffe oder die jährlich gebildeten Blattanlagen begrenzt wird.

3.2 Zeitpunkt des oberirdischen Baumwachstums

Die Wachstumsperiode ist in der Regel sehr unterschiedlich für den Stammzuwachs, die Triebstreckung, die Blattentwicklung und das Wachstum der Wurzeln. Für das Triebwachstum wichtig sind zum Beispiel die Temperaturen während der Knospenbildung, der Aufhebung der Winterruhe, des Streckungswachstums und der Auslösung der Winterruhe (KOZLOWSKI *et al.* 1991). Die Triebstreckung und das Nadel- oder Blattwachstum erfolgt in der Regel im Frühjahr. Ausgenommen sind die so genannten «Johannistriebe», welche erst später im Sommer aus neuen Knospen entstehen und die «Langtriebe» der Lärche (LARCHER 2001). Die Aktivität des Kambiums und damit der Stammzuwachs dagegen beginnt häufig vor oder gleichzeitig mit dem Austrieb der Knospen. Er dauert aber in der Regel länger als das Trieb- oder das Blatt/Nadelwachstum (SCHWEINGRUBER 1996). Bei vielen einheimischen Baumarten ist das Triblängenwachstum beschränkt, das heisst die Anzahl Blätter und Nadeln und die maximale Internodienlänge ist durch die Knospenanlage vorgegeben (Eichentyp, siehe LARCHER 2001). Andere Baumarten können kontinuierlich das ganze Jahr über weiter wachsen (Pappeltyp, dazu gehören auch Linde und Lärche).

Das Längenwachstum der Nadeln immergrüner Bäume, die sich gleichzeitig (z.B. Fichte oder Tanne) oder kurz nach der Streckung der Triebe (z.B. Kiefernarten) entwickeln, wird vor allem durch die Umweltbedingungen während oder kurz vor dem Austrieb bestimmt. Z.B. wird die Nadellänge von Kiefern im Norden Finnlands von den Temperaturen im Frühjahr, besonders durch Spätfrost, beeinträchtigt, die Triblänge aber durch die Julitemperatur des Vorjahres (MCCARROLL *et al.* 2003). Anders ist es bei den Laubbäumen oder bei der Lärche. Hier müssen zuerst Reservestoffe für die Bildung der ersten Blätter oder bei der Lärche für die Nadeln der Kurztriebe verbraucht werden. Deshalb sind hier die Bedingungen vom Vorjahr entscheidender. Ein Kahlfrass durch den Lärchenwickler führt im

Folgejahr zu deutlich kürzeren Nadeln der Lärche (HANDA *et al.* 2005). Im Wallis führt ein trockenes Frühjahr zu deutlich kürzeren Föhrennadeln (siehe Kap. 5).

BURGER (1926) untersuchte den Einfluss der Witterung auf das Triebwachstum. An warmen Tagen wuchsen die Triebe von Fichten stärker als an kühlen (siehe Abb. 1). Für die Gesamtlänge eines Triebes waren aber die Bedingungen im Vorjahr zur Zeit der Knospenbildung entscheidend. Nach

warmen Sommern folgte ein längerer Trieb, nach kühlen ein kürzerer. In Abbildung 1 wird ersichtlich, dass der Triebblängenzuwachs der Fichten in Adlisberg im Jahr 1911 mit den ansteigenden Temperaturen Anfang Mai für die Hochlagenfichten und Mitte Mai für die Tieflagenfichten begann. Beide schlossen jedoch im Hochsommer bei höchsten Temperaturen ihre Streckung ab. Selbst in der Hochlage waren die Temperaturen noch ausreichend als die Bäume die Triebstreckung beendeten.

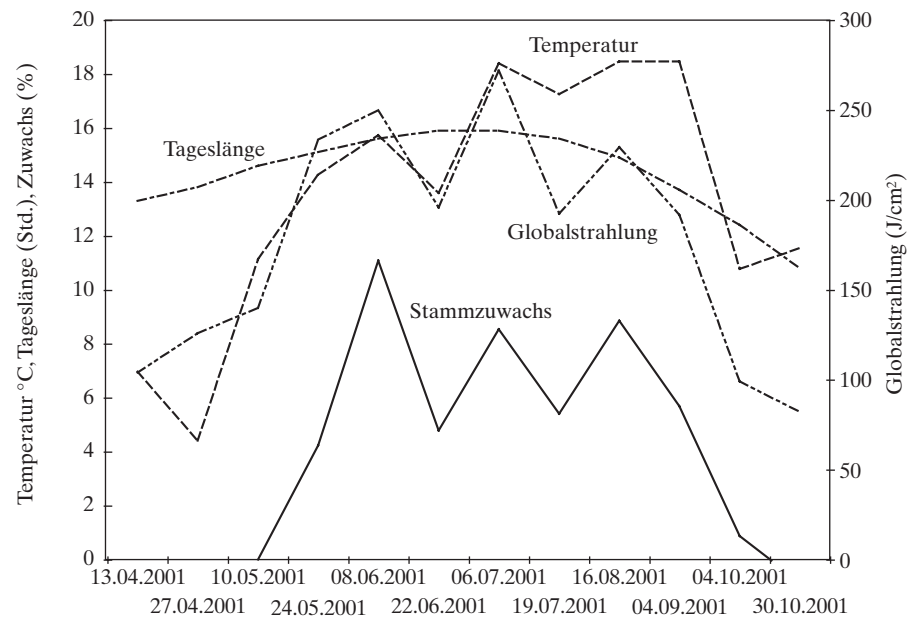


Abb. 1. Jahreszeitlicher Triebblängenzuwachs von Tieflandfichten (Winterthur, 550 m ü.M.) und Hochlandfichten (Engadin, 1800 m ü.M.) in Adlisberg auf 675 m ü.M. (2-tägliche Messungen) im Jahr 1911 und mittlere Temperaturen (nach BURGER 1926).

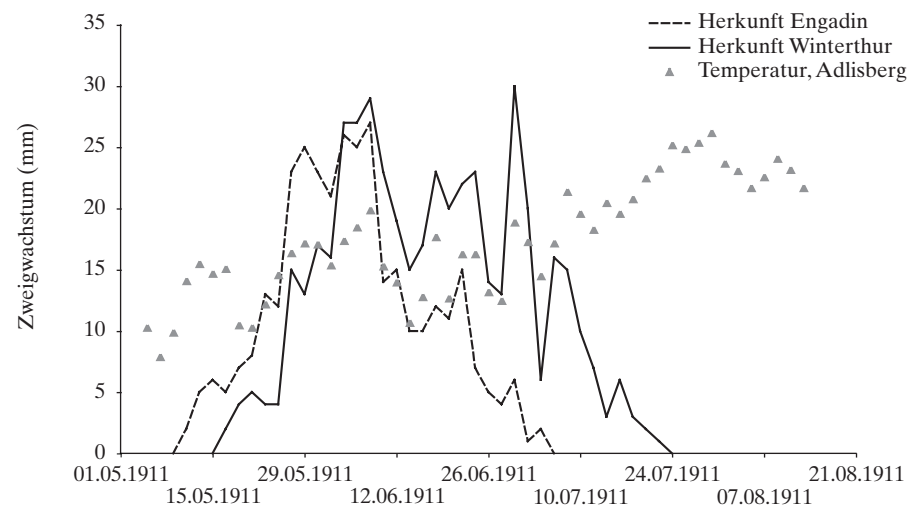


Abb. 2. Zwei- bis vierwöchiger radialer Stammzuwachs von Tannen in Vordemwald im Jahr 2001, mittlere Lufttemperatur, Globalstrahlung und Tageslängen gleicher Perioden, (Bohrkerndaten, N. Zimmermann und P. Cherubini WSL; Meteorologische Daten, G. Schneiter, WSL).

Auf der langfristigen Waldökosystemforschungsfläche (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft) Vordemwald begann der Stammzuwachs von Tannen im Jahr 2001 zwischen dem 10. und 24. Mai (Abb. 2, Daten von Mikrobohrkernen), einige Tage nach dem Anstieg der Tagesmitteltemperaturen über 10°C. Das Anschwellen des Stammes (mit elektronischen Umfangmessbändern gemessen) hatte schon gut eine Woche vorher eingesetzt. Während des feuchten Jahres 2001 erfolgte der periodische Stammzuwachs fast synchron mit der Temperatur und der Strahlung (Abb. 2). Nach dem 4. September jedoch ging der Zuwachs trotz noch ausreichend hoher Temperaturen schnell gegen Null zurück, bei allerdings rasch abfallender Strahlung.

Über das Wurzelwachstum gibt es weniger Beobachtungen und Studien als über das oberirdische Baumwachstum, und diese beziehen sich häufig auf Sämlinge oder junge Pflanzen. LEIBUNDGUT *et al.* (1963) fand an Jungpflanzen verschiedener Baumarten, dass das Wurzelwachstum von Laubbäumen nach dem Aufbrechen der Knospen im Frühjahr aber noch vor der Triebstreckung einsetzte. Bei den Nadelbäumen begann das Wurzelwachstum meist vor dem Aufbrechen der Knospen. Laubbäume zeigten deutlich ein Maximum im Frühjahr in etwa zeitgleich mit der Triebstreckung und ein zweites Maximum im Herbst. Nadelbäume dagegen zeigten nur ein Frühjahrsmaximum, wuchsen aber zum Teil noch bis in den Herbst weiter. Andere Studien zeigen, dass das Wurzelwachstum stark vom Wassergehalt des Bodens gesteuert wird. Trocknet der Boden im Sommer aus, geht auch das Wurzelwachstum zurück (MISSON *et al.* 2006).

Fazit: Die Trieblänge der meisten Baumarten in der Schweiz wird vor allem durch die Bedingungen bei der Reservestoff- und Knospenbildung im Vorjahr bestimmt. Bei immergrünen Nadelbäumen wird die Nadellänge dagegen durch die Witterung im Frühjahr bestimmt, bei Laub abwerfenden Arten vor allem durch die Witterung während der Reservestoffbildung im Vorjahr. Der Stammzuwachs in tiefen Lagen der Schweiz wird nicht durch tiefe Tempe-

raturen im Herbst begrenzt, wohl aber der Beginn durch tiefe Frühjahrstemperaturen verzögert. Auch das Wurzelwachstum hat eine jahreszeitliche Periodizität; es hängt stark von Temperatur und Bodenfeuchte ab.

4 Baumwachstum entlang Höhengradienten

Es ist schon lange bekannt, dass das Höhen- und Stammwachstum einer Baumart mit der Meereshöhe und gegen Norden abnimmt (LARCHER 2001; KOZLOWSKI *et al.* 1991). Die Frage stellt sich vor allem, welchen Anteil die abnehmenden Temperaturen und die damit kürzere Vegetationszeit haben, und welchen die Bodenbeschaffenheit oder andere Witterungsfaktoren wie Schnee oder Wind. Zudem könnte genetische Anpassung zu geringerem Wachstum entlang der Höhe oder Richtung Norden geführt haben. Vergleiche vom Baumwachstum entlang von Höhengradienten bilden eine ideale Grundlage, die Auswirkungen der Temperatur auf das Baumwachstum zu testen. Einflussfaktoren wie Baumalter und Genetik wurden durch Provenienzversuche reduziert, der unterschiedliche Standort jedoch nicht.

40jährige Fichten der Herkunft Winterthur in 500 m Meereshöhe und Engadin in 1850 m Meereshöhe zeigten eine deutliche Abnahme des Zuwachses mit der Meereshöhe (BURGER

1941). In Solothurn auf 470 m Meereshöhe betrug die mittlere Höhe der herrschenden und mitherrschenden Bäume knapp 20 m und der mittlere relative Stammzuwachs 0,4 kg Trockengewicht pro kg Trockennadelgewicht. In Bergün auf 1600 m Meereshöhe dagegen betrug die Höhe (der Stammzuwachs) im gleichen Alter nur knapp 10 m (0,3) (Abb. 3). Die Hochlagenfichte zeigte auf dem Tieflagenstandort rund 10 Prozent weniger Höhen- und relativen Stammzuwachs als die Tieflagenfichte auf demselben Standort. Dabei ist zu bedenken, dass auf dem Hochlagenstandort im Durchschnitt bis 11 Nadeljahrgänge vorhanden sind, auf dem Tieflagenstandort dagegen nur 7. In der Hochlage gab es keine gesicherten Unterschiede zwischen den Herkünften. Allerdings muss angemerkt werden, dass die Tieflagenfichte auf einem noch 300 m höher gelegenen Standort in Bergün eingegangen ist, nicht aber die Hochlagenfichte (BURGER 1941).

Bei den Nadeln waren die Unterschiede zwischen den Standorten weniger ausgeprägt. Bei der Fichte hatten die Nadeln in der Hochlage im Durchschnitt eine um 20 Prozent geringere Oberfläche (BURGER 1941). Beim Nadelgewicht gab es dagegen keine Unterschiede. Es sollte aber erwähnt werden, dass hier die verschiedenen Nadeljahrgänge gemittelt wurden und ältere Nadeljahrgänge in der Regel ein leicht erhöhtes Gewicht aufweisen.

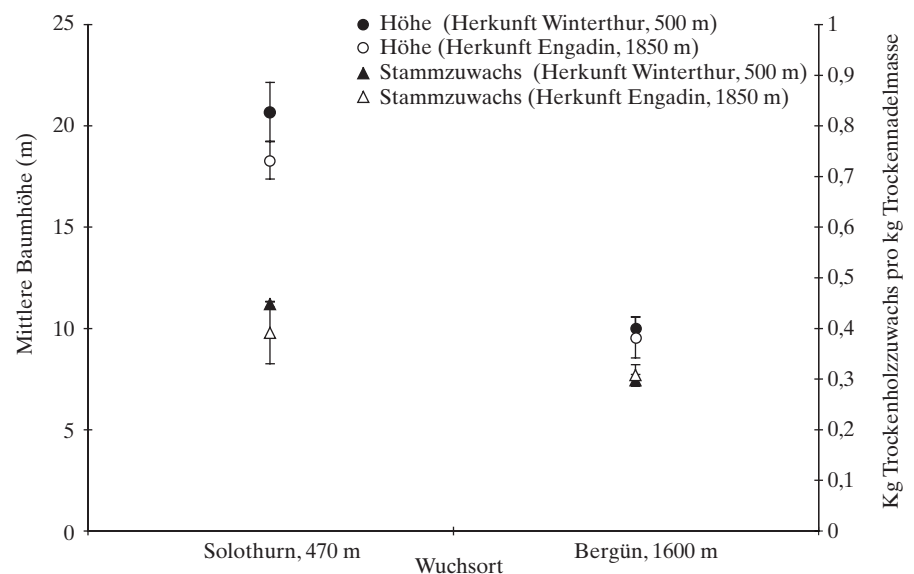


Abb. 3. Mittlere Baumhöhen und Stammzuwachs (kg Trockengewicht pro kg Trockennadelmasse) von 40jährigen Hochlagen- und Tieflagenfichten in Tieflage und Hochlage angepflanzt (mit Standardabweichung). Daten nach BURGER (1941).

Ähnliche Resultate ergaben sich aus einem Kiefernprovenienzversuch auf drei Standorten, Eglisau (430 m ü.M.), Magglingen (1040 m ü.M.) und Samedan (1930 m ü.M.). Die mittlere Baumhöhe (der relative Stammzuwachs) der herrschenden und mitherrschenden, zum Zeitpunkt der Erhebung 32 Jahre alten Bäume betrug in der Tieflage 15,3 m (1,1), auf dem mittleren Standort 11,6 m (0,8) und in der Hochlage 5,6 m (0,3, Abb. 4). Dabei war der Zuwachsrückgang zwischen Eglisau und Magglingen weniger gross als jener zwischen Magglingen und Samedan. In Samedan leisteten die Föhren nur noch ein Drittel des relativen Zuwachses der Föhren in der Tieflage.

Zwischen den Provenienzen gab es jedoch grosse Unterschiede, die bis zu 30 Prozent des Mittelwertes betrug. Auch hier wuchsen die Hochlagenkiefern oder die Herkünfte aus dem Norden Europas in der Tieflage deutlich schlechter als die Tieflagenherkünfte der Schweiz oder aus Ostpreussen. Für die Föhrennadeln nahmen sowohl das Gewicht als auch die Oberfläche aller Herkünfte mit der Höhe ab (Abb. 4). Dabei gab es jedoch erhebliche Unterschiede zwischen den Herkünften und zwischen den Bäumen.

BURGER (1926) zeigte, dass das geringere Höhenwachstum mit einer kürzeren Höhenstreckungsperiode der Hochlagenherkünfte korrelierte (Tab. 1 und 2). Während bei der Fichte die Hochlagenherkünfte früher austrieben (Tab. 1, 2, Abb. 1), trieben die Hochlagenherkünfte der Föhren und der Lärche gleichzeitig aus (Tab. 2). Tieflagenherkünfte beendeten aber ihr Wachstum deutlich später. Bei den Fichten auf dem Hochlagenstandort war die Dauer der Triebstreckung beider Herkünfte dagegen nur unwesentlich kürzer, die Trieblänge aber um ein vielfaches kleiner als in der Tieflage (Tab. 1).

Wurzelzuwachs wurde von Burger in dieser Studie nicht untersucht, jedoch fand NÄGELI (1931), dass die Fichten der Hochlagen in der Tieflage entsprechend des oberirdischen Volumens auch weniger Wurzelmasse produziert hatten als die Tieflagenherkünfte. Der Anteil der Wurzeln am Gesamtgewicht war in etwa gleich (15,8 % für die Tieflagen- und 14,0 % für die Hochlagenfichten).

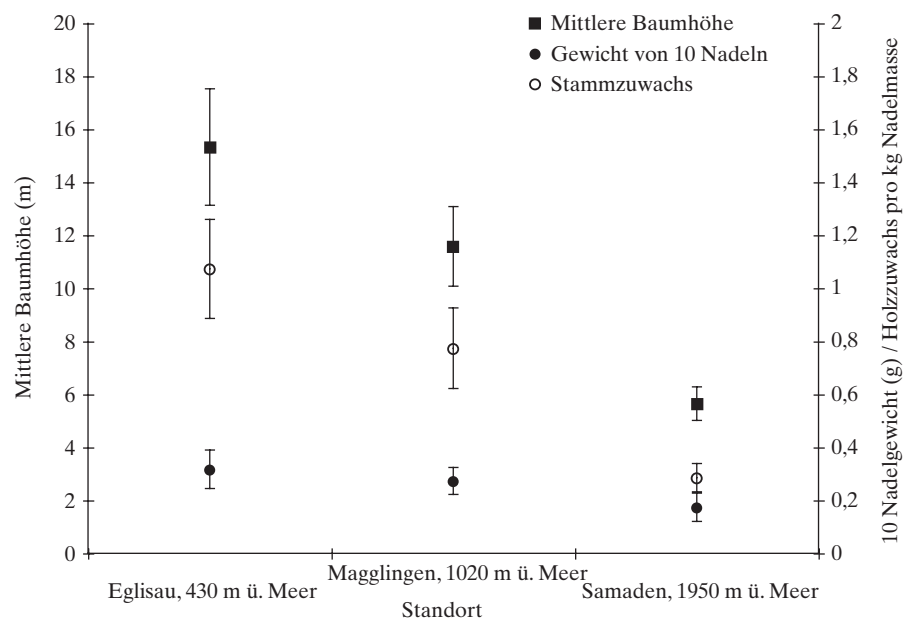


Abb. 4. Baumhöhe, Stammzuwachs (kg Trockenholz pro kg Trockennadelgewicht), und Gewicht von 10 Nadeln mit Standardabweichung von 32jährigen Föhren verschiedenster Herkünfte, angepflanzt in einer Tieflage, einer mittleren Lage und einer Hochlage; Daten nach BURGER (1941).

Tab. 1. Durchschnittlicher Beginn, Dauer und Höhe des Triebblängenzuwachses von Hochlagen und Tieflagenfichten und Herkünfte gleichen Alters, angepflanzt auf Standorten verschiedener Höhenlagen (Daten nach BURGER 1926).

Baumart, Herkunft, Höhe ü. Meer (m)	Alter (Jahre)	Zeit (Jahre)	Standort, (Höhe ü. Meer, m)	Beginn (Datum)	Dauer (Tage)	Länge (mm)
Fichte, Winterthur, 550	9-15	1907-13	Noville, 380	26. Mai	47	329
			Adlisberg, 670	28. Mai	50	374
			Stanzerberg, 1880	2. Juli	49	41
Fichte, Engadin, 1800	9-15	1907-13	Noville, 380	19. Mai	45	271
			Adlisberg, 670	20. Mai	43	258
			Stanzerberg, 1880	19. Juni	40	46

Tab. 2. Austriebszeitpunkt, Länge der Triebzuwachsperiode, Höhe des Zuwachses für Hochlagen und Tieflagenherkünfte von Föhren, Fichten und Lärchen in Adlisberg (nach BURGER 1926).

Baumart, Herkunft, (Höhe ü. Meer in m)	Alter (Jahre)	Zeit (Jahre)	Beginn (Datum)	Dauer (Tage)	Länge (mm)
Föhre, Engadin (1700 m)	12-15	1918-21	29. März	62	173
Föhre, Rigi (500 m)	11-15	1916-20	29. März	81	419
Fichte, Engadin (1800 m)	9-15	1907-13	20. Mai	43	258
Fichte, Winterthur (550 m)	9-15	1907-13	28. Mai	50	374
Lärche, Avers (1950 m)	11-13	1911-13	15. Mai	58	365
Lärche, Untervaz (1200 m)	11-13	1911-13	18. Mai	82	458

Fazit: Mit der Höhe über Meer nimmt in der Regel der Zuwachs ab. Bäume der Hochlagen und nordischer Herkunft sind anscheinend optimal an die an ihrem Wuchsort durch niedrige Temperatur vorgegebene kürzere Vegetationszeit angepasst, können sich aber nicht völlig an die besseren Bedingungen der Tieflagen oder südlichen Lagen anpassen. Das bedeutet aber auch, dass Hochlagenherkünfte auf eine Erwärmung in geringerer Masse durch Zuwachssteigerung reagieren können als Tieflagenherkünfte, die in Hochlagen transferiert wurden. Bei der Fichte führen niedrigere Temperaturen zu kurzen schweren Nadeln, bei der Föhre generell zu kleineren Nadeln.

5 Wasserhaushalt und Temperatur

5.1 Schweizer Trockentäler – Beispiel Wallis

Es gibt auch Regionen in der Schweiz, in denen nicht die Temperatur sondern das verfügbare Wasser limitierend ist, so z. B. die Tieflagen des zentralen und östlichen Wallis (REBETEZ und DOBBERTIN 2004). In den Tieflagen des Rhonetal (480–700 m ü.M.) fällt jährlich nur etwa 500 bis 600 mm Niederschlag. Bis auf 1500 m Meereshöhe steigt er auf 900 mm pro Jahr an. Wäh-

rend in den anderen Regionen ein deutlicher Rückgang der Produktivität mit der Höhe über Meer des Standortes erfolgt, kann man dies im Walliser Rhonetal nicht feststellen (Abb. 5). Die durchschnittliche Höhe herrschender und mitherrschender Föhrenaltbestände verschiedener Studien im Wallis zeigen keinen Rückgang mit der Höhe des Standortes (POUTTU und DOBBERTIN 2000; BIGLER *et al.* 2006; FOURNIER *et al.* 2006). Betrachtet man nur Föhrenbestände auf den meist steilen und flachgründigen Hanglagenstandorten, so zeigt sich sogar ein Anstieg der Baumhöhe bis etwa 1200 bis 1300 m über Meer. Der Grund dafür liegt in der Wasserversorgung, welche mit den zunehmenden Niederschlägen in der Höhe zunimmt. Tiefgründigere Böden und Böden mit höherer Wasserspeicherfähigkeit, wie sie zumeist im Talgrund vorkommen, führen zu deutlich grösseren Bestandeshöhen (RIGLING *et al.* 2002).

Neben den Niederschlägen beeinflussen auch die Temperaturen während der Vegetationszeit den Trockenstress der Bäume. Jahrringreihen von Föhren im Wallis korrelierten gut mit einem jährlichen Trockenstressindex, welcher sich aus der Differenz zwischen Niederschlag und der potentiellen Verdunstung (aus monatlichen mittleren Temperaturdaten berechnet) ergab (BIGLER *et al.* 2006). Seit dem

Sommer 2003 läuft ein Bewässerungsexperiment im Pfywald. Erste Einflüsse auf das Trieb- und Nadelwachstum wurden an sechs unbewässerten und sieben bewässerten zufällig ausgewählten Bäumen unterschiedlicher Vitalität getestet (je 2 Astproben mit je 5 Zweigproben pro Baum). Nach einem trockenen Frühjahr waren die Nadeln der bewässerten Föhren im Jahr 2004 um zwei Drittel länger und im Jahr 2005 gut ein Drittel länger als die der Unbewässerten (Abb. 6). Da die Bewässerung erst Mitte Juni 2003 begann, gab es praktisch keinen Einfluss auf die Nadellängen im Jahr 2003. Die Triebhöhen waren ebenfalls deutlich verlängert (Abb. 7). Die späte und anfangs zu niedrige Bewässerung zusammen mit dem Extremsommer 2003 führten nur zu geringen und noch nicht signifikanten Unterschieden im Folgejahr 2004. Im Jahr 2005 waren die Triebe der bewässerten Föhren dagegen doppelt so lang.

Fazit: In den Tieflagen des Wallis limitiert Wasser das Wachstum der Föhren. Ansteigende Temperaturen und dadurch erhöhter Trockenstress werden hier zu einem Rückgang von Wachstum und Vorrat führen.

5.2 Extremereignisse: Das Hitze- und Trockenjahr 2003

Das extreme Hitze- und Trockenjahr 2003 veranschaulicht eindrücklich, wie sich Trockenheit und höhere Temperaturen auf das Baumwachstum auswirken können. Im Jahr 2003 verzeichnete Zentral- und Südeuropa die höchsten je gemessenen Sommertemperaturen und eine z. T. von März bis Ende August reichende Trockenheit (LUTERBACHER *et al.* 2004). Der Sommer 2003 war in weiten Teilen der Schweiz um 4 bis 5,5°C wärmer als der langjährige Durchschnitt. Gleichzeitig waren die Niederschläge im Sommerhalbjahr (April bis September) deutlich unterdurchschnittlich.

Die Trockenheit 2003 führte, trotz einer zum Teil verlängerten Vegetationsperiode, zu einer Reduktion des Stammzuwachses in den Tieflagen der Schweiz zwischen 20 und 60 Prozent (Abb. 8). Dasselbe fanden LEUZINGER *et al.* (2005) für eine Fläche im Basler

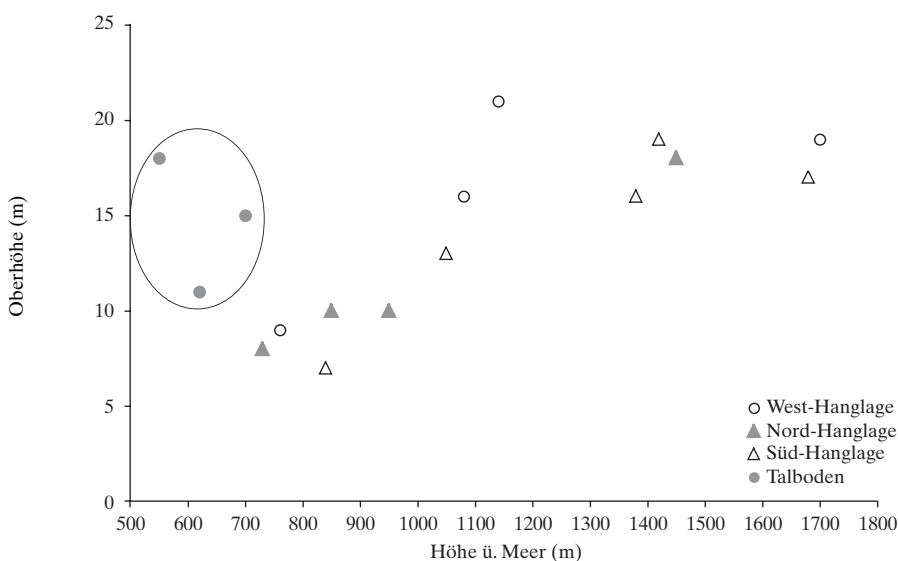


Abb. 5. Bestandesoberhöhen von mind. 85jährigen Föhren im Walliser Rhone- und Vispental, Daten von POUTTU und DOBBERTIN (2000), BIGLER *et al.* (2006), FOURNIER *et al.* (2006).

Jura und CIAIS *et al.* (2005) für verschiedene Flächen in Deutschland, Frankreich und Italien. In Baden-Württemberg wuchsen Fichten auf allen Untersuchungsflächen im Trockenjahr 2003 weniger als in den Jahren zuvor (MEINING *et al.* 2004). Dagegen wuchsen die Bäume in der Schweiz oberhalb von etwa 1200 m gleich gut oder sogar besser als in den vorangegangenen Jahren (Abb. 8, JOLLY *et al.* 2005). Satellitenbilder belegen, dass in den Hochlagen der Alpen die Vegetation im Jahr 2003 mehr Biomasse produzierte als in früheren Jahren, während in den Tieflagen die Produktion eindeutig reduziert war (JOLLY *et al.* 2005). Gleiche Ergebnisse wurden auf den langfristigen Beobachtungsflächen in Bayern gefunden (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft 2004). Die erhöhten Zuwächse in den Hochlagen können auf eine verlängerte Wachstumsperiode und durch höhere Temperaturen bedingte bessere Wachstumsbedingungen während der Stammzuwachsperiode 2003 zurückgeführt werden.

Die Fichten zeigten im Jahr 2003 vergleichsweise stärkere Zuwachsrückgänge als Buchen und Tannen (Abb. 9). Ähnliches hatte schon FLURY (1926) nach den Trockenjahren von 1917 bis 1921 beobachtet. SPIECKER (1990) fand in Analysen von langfristigen Versuchsflächen und Jahrringen, dass in warmen trockenen Jahren selbst in den Hochlagen des Schwarzwalds der Zuwachs von Fichten und Tannen reduziert ist. Auf den langfristigen Level II Flächen von ICP Forests in Zentraleuropa zeigten die Eichen weniger Zuwachsreaktionen als die Buchen; die Fichten wiesen aber die höchsten Rückgänge auf (FISCHER *et al.* 2006).

Ein Vergleich mit modellierten Trockenindexwerten auf den Schweizer LWF-Flächen zeigt eine klare Beziehung zwischen dem Zuwachs 2003 und der Wasserverfügbarkeit (DOBBERTIN und GRAF PANNATIER 2005). Auf den Flächen mit geringem Trockenstress im Sommer 2003 stieg der relative Zuwachs im Jahr 2003 linear mit der Meereshöhe an. Das belegt eindeutig, dass die limitierte Wasserverfügbarkeit in den tieferen Lagen bei steigenden Sommertemperaturen zum wachstumslimitierenden Faktor wird, während in den Lagen mit ausreichender

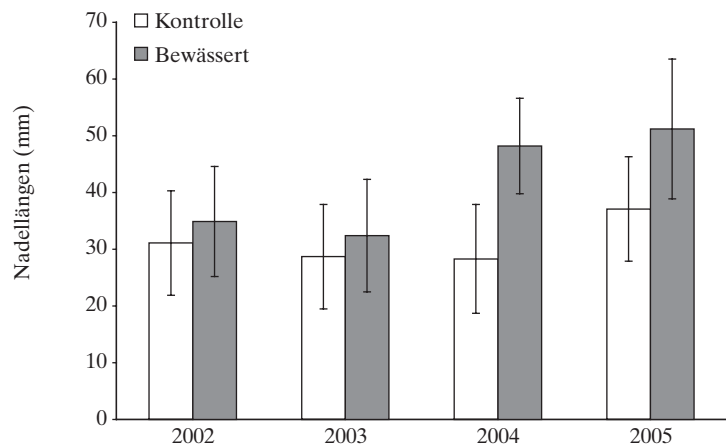


Abb. 6. Nadellängen von sechs unbewässerten und sieben bewässerten Föhren (Mittelwert von je 20 Nadeln an je 10 Trieben) und Standardabweichung. Die Bewässerung begann im Juni 2003.

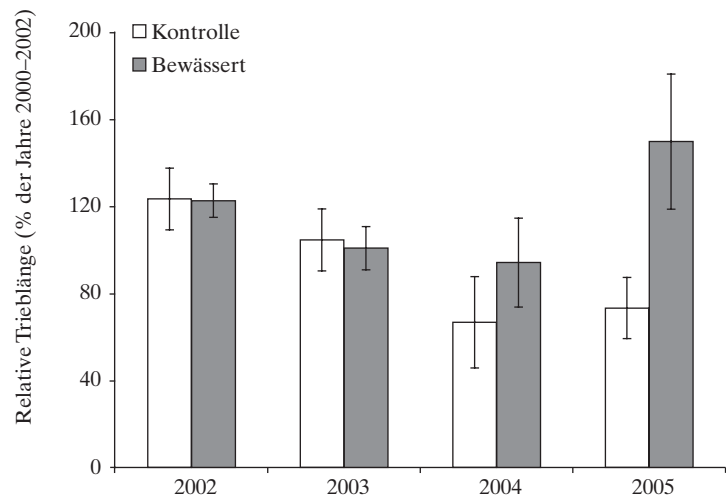


Abb. 7. Relative Triebblängen von sechs unbewässerten und sieben bewässerten Föhren (Triebblänge in Prozent des Mittelwertes der drei Jahre vor Beginn der Bewässerung am 19. Juni 2003) und Standardabweichung.

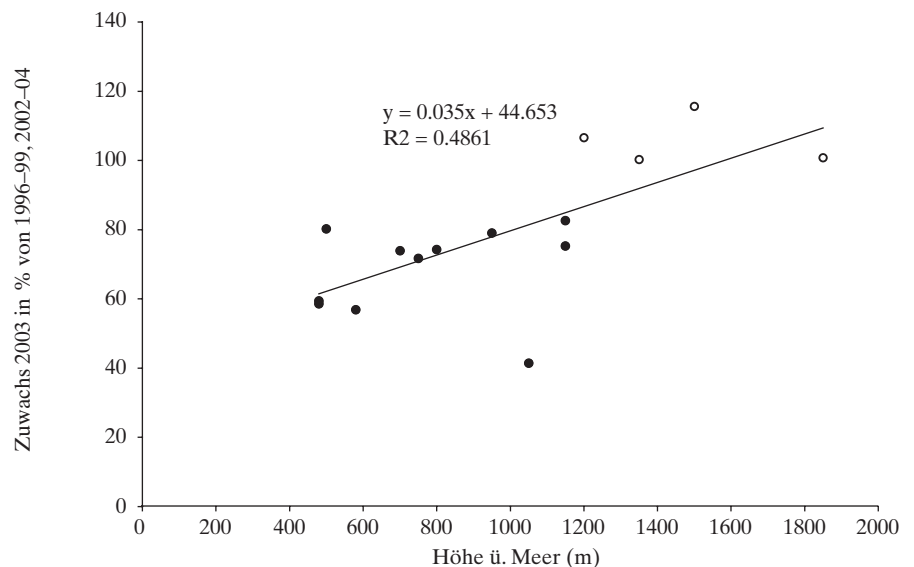


Abb. 8. Relativer Stammflächenzuwachs verschiedener Baumarten auf Schweizer LWF-Flächen im Jahr 2003 in Prozent des Zuwachses der Jahre 1996-99 und 2002-2004 mit Regressionsgerade. Ausgefüllte Kreise: signifikant reduzierter Zuwachs ($p < 0,05$); nicht ausgefüllte Kreise: nicht signifikante Unterschiede; siehe JOLLY *et al.* 2005.

Versorgung die Verlängerung der Vegetationszeit durch erhöhte Temperaturen den Zuwachs erhöhen kann.

Es muss hier aber angemerkt werden, dass diese kurzfristigen Jahreseinflüsse nur beschränkte Aussagen über die langfristige Entwicklung erlauben, und dass die beobachteten Einflüsse des Trockenjahres 2003 auf den Stammzuwachs der Bäume nicht automatisch auch auf deren Überlebenswahrscheinlichkeit Rückschlüsse zulassen. Allerdings zeigen erste Ergebnisse aus Frankreich höchste Sterberaten im Jahr nach 2003 an Fichten, mittlere an Buchen und Tannen und geringste an Eichen (NAGELEISEN und RENAUD 2006).

Fazit: Extreme warm-trockene Sommer reduzieren den Stammzuwachs in den Tieflagen erheblich, in den Hochlagen kann er dagegen ansteigen. Fichten erwiesen sich als besonders empfindlich.

6 Erwärmung und Nadelwachstum

Den Einfluss der beobachteten Erwärmung auf das Wachstum von Wäldern zu quantifizieren, ist für den Stammzuwachs und auch zum Teil für den Höhenzuwachs recht schwierig, da viele weitere Faktoren das Wachstum beeinflussen, wie die Bestandesdichte, das Baumalter, die Nährstoffversorgung, die Stickstoffeinträge, oder die ansteigenden CO₂-Gehalte, welche sich zum Teil parallel zu den Temperaturen verändert haben. Als Indikator, wie sich die momentane Temperaturerwärmung auf Bäume in den Hochlagen auswirken, können die Resultate langer Messreihen der Nadellängen im Engadin dienen.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Lärchenwickler im Oberengadin liegen seit den 1960er Jahren Messungen von Lärchennadeln verschiedener Standorte vor (BALTENSWEILER 1975). Zwei Standorte mit langen Messreihen wurden für einen Vergleich ausgewählt: Brail, auf einem in 1630 m Meereshöhe leicht ostwärts geneigten Hang gelegen, und Sils Schadenherd auf 1830 m Meereshöhe an einem steilen süd-ostwärts gelegenen Hang. An beiden Standorten wurde an 8 bis 11

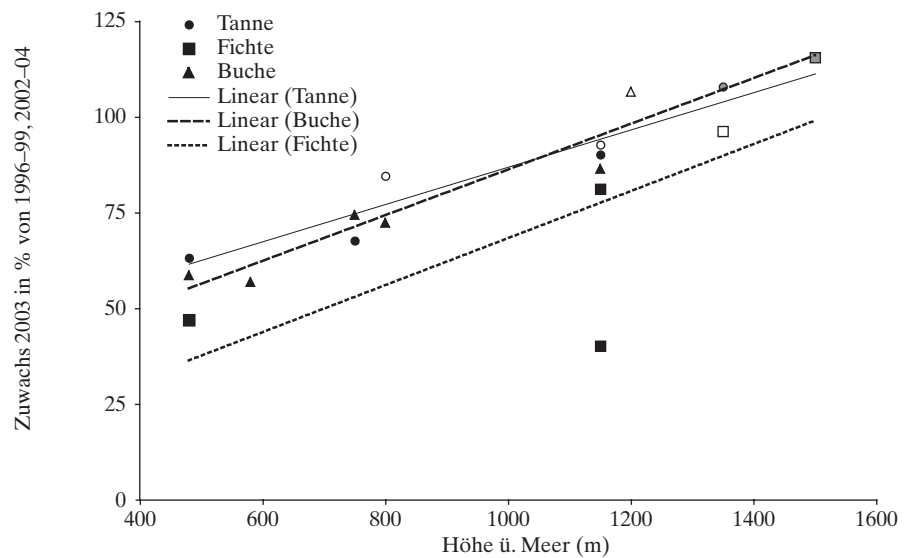


Abb. 9. Relativer Stammflächenzuwachs von Fichten, Tannen und Buchen auf Schweizer LWF-Flächen im Jahr 2003 in Prozent des Zuwachses der Jahre 1996–99 und 2002–04, mit Regressionsgerade. Schwarz ausgefüllte Kreise: signifikant reduzierter Zuwachs ($p < 0.05$, einseitiger paarweiser t-Test); grau ausgefüllte Kreise: signifikant erhöhter Zuwachs; nicht ausgefüllte Kreise: nicht signifikante Unterschiede); siehe JOLLY *et al.* 2005.

frei stehend erwachsenen Bäumen je ein unbeschädigter Ast in der unteren Krone ausgewählt. Nadellängenmessungen wurden an verschiedenen Zeitpunkten im Jahr an je 6 Nadelquirlen (Kurztrieben) und, wenn möglich, am 3. Zweijahrgang vorgenommen. Für die hier präsentierten Ergebnisse wurden die Daten pro Aufnahmezeitpunkt über alle Bäume und Nadelquirle gemittelt. Die auswertbare Datenreihe reicht von 1972 bis 2006. Es ist bekannt, dass die Nadellängen im Folgejahr nach einem Kahlfress durch den Lärchenwickler kürzer sind. Für die folgende Auswertung wurden deshalb die Jahre nach Lärchenwicklerausbrüchen weggelassen.

Das Nadelwachstum auf dieser Meereshöhe findet zwischen Mitte April bis Ende Juni statt. Die maximalen jährlichen Nadellängen schwankten zwischen 29 und 38 mm. In der Periode 1972 bis 1986 waren die maximalen Nadellängen von Brail signifikant 2,6 mm länger als jene in Sils-Maria. Die Nadellängen der Zeitperiode 1987 bis 2006 waren in Brail ähnlich lang wie in der früheren Periode, jene von Sils dagegen deutlich länger, so dass jetzt keine signifikanten Unterschiede mehr festgestellt werden können. Der Prozentanteil der Nadellänge an der späteren Gesamtnadellänge, welcher bis

zum 5. Juni eines Jahres erreicht wurde, korrelierte sehr stark mit den durchschnittlichen Temperaturen im April und Mai (Abb. 10, Pearson's Korrelationskoeffizient für Sils: 0,88 und für Brail 0,77). Anfang Juni erreichten die Nadeln in Brail in der Periode bis 1986 im Durchschnitt 78 Prozent, in Sils 52 Prozent ihrer Gesamtnadellänge. In den letzten Jahren erreichten sie zum gleichen Zeitpunkt 92 Prozent und 79 Prozent der Gesamtlänge. Die Nadelentwicklung am Standort Sils entspricht heute genau jener in Sils in den 70er und zu Beginn der 80er Jahre. Die Entwicklungsstadien der Nadeln der Lärchen im Engadin haben sich damit in den letzten 20 Jahren um 200 m in die Höhe verschoben. Die homogenisierten Daten der Meteoschweizstation Maria-Segl ergeben in dieser Zeit einen mittleren Temperaturanstieg von 1,5°C für die Monate April und Mai, was einer Höhenverschiebung um knapp über 200 m entspräche und damit die gemessenen Daten bestätigt. Die maximale Nadellänge hat sich dabei nur in Sils um etwa 10 Prozent erhöht, was weniger bedeutend ist als die Auswirkungen der in den letzten zwei Jahrzehnten beobachteten geringen Lärchenwicklerausbrüche.

Fazit: Die zeitliche Entwicklung des Nadelwachstums der Lärchen im Engadin hat sich entsprechend den Temperaturen im April und Mai seit Mitte der 1980er Jahre um gut 200 Höhenmeter nach oben verschoben, während sich die maximalen Nadellängen nur wenig erhöhten.

7 Versuch einer Prognose

Wie wird sich der prognostizierte Temperaturanstieg auf das Wachstum der Bäume in der Schweiz auswirken? Wie durch die verschiedenen Fallbeispiele belegt wurde, wird sich ein möglicher weiterer Temperaturanstieg je nach Region der Schweiz und vorkommenden Baumarten unterschiedlich auswirken. In den Hochlagen werden ansteigende Temperaturen ansteigende Zuwächse der Stämme und Baumhöhe für praktisch alle Arten bewirken. Die Temperaturen werden allerdings von den an kühlere Standorte angepassten Arten und Herkünften nicht optimal ausgenutzt werden. In den Tiefenlagen wird der Zuwachs in den warm-feuchten Jahren ebenfalls ansteigen. Doch werden hier extreme Trockensommer diesen Anstieg reduzieren oder negieren. In den inner-alpinen Trockentälern wie dem Wallis und dem Churer Rheintal wird der Zuwachs in den Tiefenlagen deutlich zurückgehen. Je nach Baumart und Niederschlagsverhältnis wird sich das Wachstumsoptimum nach oben verschieben.

8 Literatur

BALDOCCHI, D.D.; BLACK, T.A.; CURTIS, P.S.; FALGE, E.; FUENTES, J.D.; GRANIER, A.; GU, L.; KNOHL, A.; PILEGAARD, K.; SCHMID, H.P.; VALENTINI, R.; WILSON, K.; WOFSY, S.; XU, L.; YAMAMOTO, S., 2005: Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forests with soil temperature and climate data: a synthesis of FLUXNET data. *Int. J. Biometeorol.* 49, 6: 377–387.

BALTENSWEILER, W., 1975: Zur Bedeutung des grauen Lärchenwicklers (*Zeiraphera diniana* Gn.) für die Lebensgemeinschaft des Lärchen-Arvenwaldes. *Mitt. Schweiz. Entomol. Ges.* 50: 15–23.

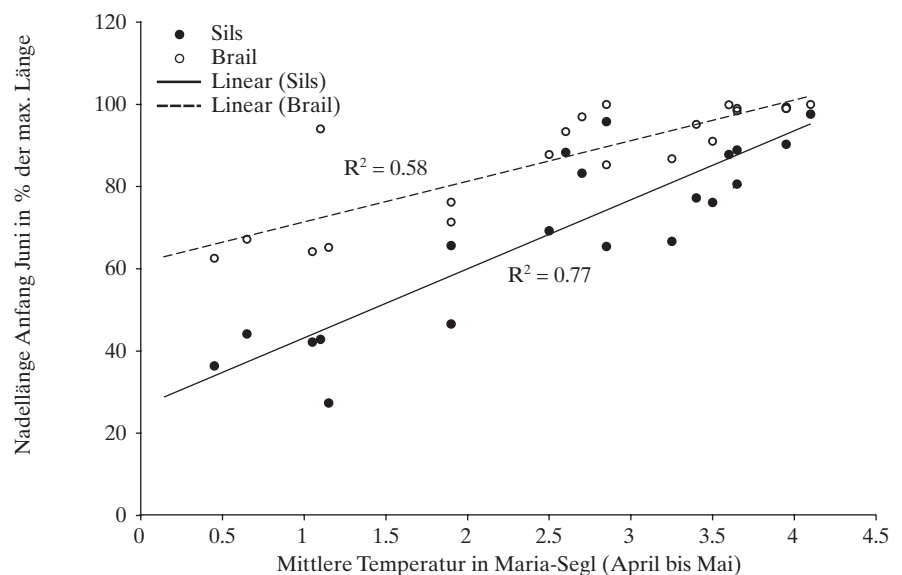


Abb. 10. Nadellängen von Lärchen Anfang Juni in Brail (1630 m ü.M.) und in Sils (1830 m ü.M.) in Prozent der maximalen Nadellängen für die Jahre von 1972 bis 2006, aufgetragen gegen die mittlere Temperatur April-Mai mit Ausgleichsgerade und Bestimmtheitsmass.

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2004: Waldzustandsbericht 2004. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF.

BEGERT, M.; SCHLEGLE, T.; KIRCHHOFER, W.; 2005: Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *Int. J. Climatol.* 25: 65–80.

BIGLER, C.; BRÄKER, O.U.; BUGMANN, H.; DOBBERTIN, M.; RIGLING, A., 2006: Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems* 9: 330–343.

BOISVENUE, C.; RUNNINGS, S.W., 2006: Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. *Glob. Chang. Biol.* 12: 862–882.

BRÄKER, O.U., 1996: Growth Trends of Swiss Forests: Tree-Ring Data. Case Study Toppwald. In: SPIECKER, H.; MIELIKÄINEN, K.; KÖHL, M.; SKOVGAARD, J.P. (eds) *Growth Trends in European Forests*. European Forest Institute Research Report No.5. Berlin, Heidelberg, Springer. 199–217.

BRIFFA, K.R.; JONES, P.D.; SCHWEINGRUBER, F.H.; SHIYATOV, S.G.; COOK, E.R., 1995: Unusual twentieth-century summer warmth in a 1,000-year temperature record from Siberia. *Nature* 376: 156–159.

BURGER, H., 1926: Untersuchungen über das Höhenwachstum verschiedener Holzarten. 1. Mitteilung. *Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch.* 14: 29–158.

BURGER, H., 1941: Holz, Blattmenge und Zuwachs V. Mitteilung. Fichten und Föhren verschiedener Herkunft auf verschiedenen Kulturorten. *Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch.* 22: 10–62.

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, A.D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GRUNWALD, T.; HEINESCH, B.; KERONEN, P.; KNOHL, A.; KRINNER, G.; LOUSTAU, D.; MANCA, G.; MATTEUCCI, G.; MIGLIETTA, F.; OURCIVAL, J.M.; PAPALE, D.; PILEGAARD, K.; RAMBAL, S.; SEUFERT, G.; SOUSSANA, J.F.; SANZ, M.J.; SCHULZE, E.D.; VESALA, T.; VALENTINI, R., 2005: Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437 (7058): 529–533.

DOBBERTIN, M., 2005: Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: A review. *Eur. J. For. Sci.* 124: 319–333.

DOBBERTIN, M.; GRAF-PANNATIER, E., 2005: Forests suffered from climatic extremes in 2003 and 2004. In: *The condition of*

- Forests in Europe. 2005 Executive Report. Geneva, UNECE. 14–16.
- EFI, 2002: Nitrogen deposition appears to be the main cause of increased forest growth in Europe. Pressemitteilung.
- ESPER, J.; COOK, E.R.; SCHWEINGRUBER, F.H., 2002: Low-Frequency Signals in Long Tree-Ring Chronologies for Reconstructing Past Temperature Variability. *Science* 295: 2250–2253.
- FISCHER, R.; DOBBERTIN, M.; GRANKE, O.; KAROLES, K.; KÖHL, M.; KRAFT, P.; MEYER, P.; MUES, V.; LORENZ, M.; NAGEL, H.-D.; SEIDLING, W., 2006: The condition of forests in Europe. 2006 Executive Report. Hamburg, UN/ECE.
- FLURY, P., 1926: Über den Einfluss von Trockenperioden auf das Bestandeswachstum. *Mitt. Schweiz. Centralanst. forstl. Versuchswes.* 14: 251–292.
- FOURNIER, N.; RIGLING, A.; DOBBERTIN, M.; GUGERLI, F., 2006: Faible différenciation génétique, à partir d'amplification aléatoire d'ADN polymorphe (RAPD), entre les types de pin sylvestre d'altitude et de plaine (*Pinus sylvestris* L.) dans les Alpes à climat continental. *Ann. For. Sci.* 63: 431–439.
- FREI, C., 2004. Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion. Zürich, Institut für Atmosphäre und Klima ETH. 8 S.
- FRITTS, H.C., 1976: Tree ring and climate. New York, Academic Press.
- HANDA, I.T.; KÖRNER, C.; HÄTTENSCHWILER, S., 2005: A test of the tree-line carbon limitation hypothesis by *in situ* CO₂ enrichment and defoliation. *Ecology* 86: 1288–1300.
- HASENAUER, H.; NEMANI, R.R.; SCHADAUER, K.; RUNNING, S.W., 1999: Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. *For. Ecol. Manage.* 122: 209–219.
- HAVRANEK, W., 1972: Über die Bedeutung der Bodentemperatur für die Photosynthese und Transpiration junger Forstpflanzen und für die Stoffproduktion an der Waldgrenze. *Angew. Bot.* 46: 101–116.
- JAMES, J.C.; GRACE, J.; HOAD, S.P., 1994: Growth and photosynthesis of *Pinus sylvestris* at its altitudinal limit in Scotland. *J. Ecol.* 82: 297–306.
- JOLLY, W.M.; DOBBERTIN, M.; ZIMMERMANN, N.E.; REICHSTEIN, M., 2005: Divergent growth responses of Alpine forests to 2003 heat wave. *Geophys. Res. Lett.* 32, 18: Art. No. L18409, DOI:10.1029/2005GL023252.
- KÖHL, M., 1996: Growth Patterns in Forests of the Canton of Berne, Switzerland, Based on Inventory Data. In: SPIECKER, H.; MIELIKÄINEN, K.; KÖHL, M.; SKOVSGAARD, J.P. (eds) *Growth Trends in European Forests*. European Forest Institute Research Report No. 5. Berlin, Heidelberg, Springer. 219–237.
- KÖRNER, C., 1999: Alpine plant life. Functional plant ecology of high mountain ecosystems. Berlin, Tokyo, Springer.
- KOZLOWSKI, T.T.; KRAMER, P.J.; PALLARDY, S.G., 1991: The physiological ecology of woody plants. San Diego, Toronto, Academic Press.
- LARCHER, W., 2001: Ökophysiologie der Pflanzen. 6. Aufl. Stuttgart, Ulmer.
- LEIBUNDGUT, H.; DAFIS, S.; RICHARD, F., 1963: Untersuchungen über das Wurzelwachstum verschiedener Baumarten. *Schweiz. Z. Forstwes.* 114: 621–646.
- LEUZINGER, S.; ZOTZ, G.; ASSHOFF, R.; KÖRNER, C., 2005: Responses of deciduous forest trees to severe drought in Central Europe. *Tree Physiol.* 25: 641–650.
- LINDERHOLM, H.W., 2006: Growing season changes in the last century. *Agric. For. Meteorol.* 137: 1–14.
- LORIS, K., 1981: Dickenwachstum von Zirbe, Fichte und Lärche an der alpinen Waldgrenze/Patscherkofel. *Ergebnisse der Dendrometermessungen 1976–79*. *Mitt. Forstl. Bundes-Vers.anst. Wien* 142: 416–446.
- LUTERBACHER, J.; DIETRICH, D.; XOPLAKI, E.; GROSJEAN, M.; WANNER, H., 2004: European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends, and Extremes Since 1500. *Science* 303: 1499–1503.
- MCCARROLL, D.; JALKANEN, R.; HICKS, S.; TUOVINEN, M.; GAGEN, M.; PAWELLEK, F.; ECKSTEIN, D.; SCHMITT, U.; AUTIO, J.; HEIKKINEN, O., 2003: Multiproxy dendroclimatology: a pilot study in northern Finland. *Holocen* 13, 6: 829–838.
- MEINING, S.; SCHRÖTER, H.; VON WILPERT, K., 2004: Waldzustandsbericht 2004. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- MENZEL, A.; FABIAN, P., 1999: Growing season extended in Europe. *Nature* 397: 659.
- MISSON, L.; GERSHENSON, A.; TANG, J.W.; MCKAY, M.; CHENG, W.X.; GOLDSTEIN, A., 2006: Influences of canopy photosynthesis and summer rain pulses on root dynamics and soil respiration in a young ponderosa pine forest. *Tree Physiol.* 26: 833–844.
- NAGELEISEN, L.-M.; RENAUD, J.-P. 2006: Bilan de la Santé des Forêts en 2005. Les résultats 2005 du réseau Européen de suivi des dommages forestiers. Département de la Santé des Forêts, Ministère de l'agriculture et de la pêche, http://www.agriculture.gouv.fr/spip/IMG/pdf/re_2005.pdf
- NÄGELI, W., 1931: Einfluss der Herkunft des Samens auf die Eigenschaften forstlicher Holzgewächse. IV. Mitteilung. Die Fichte. *Mitt. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch.* 27: 150–237.
- POUTTU, A.; DOBBERTIN, M., 2000: Needle retention and density patterns in *Pinus sylvestris* L. in the Rhone Valley of Switzerland: comparing results of the needle trace method with visual defoliation assessments. *Can. J. For. Res.* 30: 1973–1982.
- PRETZSCH, H., 1992: Zunehmende Unstimmigkeit zwischen erwartetem und wirklichem Wachstum unserer Waldbestände. *Forstwiss. Cent.bl.* 111: 366–382.
- REBETEZ, M., 2001: Changes in daily and nightly day-to-day temperature variability during the twentieth century for two stations in Switzerland. *Theor. Appl. Climatol.* 69: 13–21.
- REBETEZ, M.; DOBBERTIN, M., 2004: Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. *Theor. Appl. Climatol.* 79: 1–9.
- RIGLING, A.; BRÄKER, O.; SCHNEITER, G.; SCHWEINGRUBER, F., 2002: Intra-annual tree-ring parameters indicating differences in drought stress of *Pinus sylvestris* forests within the Erico-Pinion in the Valais (Switzerland). *Plant Ecol.* 163: 105–121.
- SCHÄR, C.; VIDALE, P.L.; LÜTHI, D.; FREI, C.; HÄBERLI, C.; LINIGER, M.A.; APPENZELER, C., 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332–336.
- SCHWEINGRUBER, F.H., 1996: Tree rings and environment. Bern, Haupt.
- SCOTT, P.A.; BENTLEY, C.V.; FAYLE, D.C.F.; HANSELL R.I.C., 1987: Crown Forms And Shoot Elongation Of White Spruce At The Treeline, Churchill, Manitoba, Canada. *Arct. Antarc. Alp. Res.* 19, 2: 175–186.
- SPIECKER, H., 1990: Growth variation and environmental stresses – Long-term observations on permanent research plots in southwestern Germany. *Water Air Soil Pollut.* 54: 247–256.
- SPIECKER, H.; MIELIKÄINEN, K.; KÖHL, M.; SKOVSGAARD, J.P. (eds) 1996: *Growth Trends in European Forests*. Berlin, Springer.

- TRANQUILLINI, W., 1979: Physiological ecology of the alpine timberline. *Ecol. stud.* 31.
- WILPERT VON, K., 1990: Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde. *Freibg. Bodenk. Abh.* H. 24.
- ZINGG, A., 1996: Diameter and Basal Area Increment in Permanent Growth and Yield Plots in Switzerland. In: SPIECKER, H.; MIELIKÄINEN, K.; KÖHL, M.; SKOVSGAARD, J.P. (eds) *Growth Trends in European Forests*. European Forest Institute Research Report No. 5. Berlin, Heidelberg, Springer. 239–265.

Abstract

Tree growth and elevated temperatures

Between 1864 and 2000 spring and summer temperatures in Switzerland have increased by 0.8°C per 100 years. Climate models predict a more than doubling of this temperature rise by the middle of this century. Depending on the limiting factors for tree growth temperature increase may lead to different growth responses.

Tree provenance trials along elevation gradients were used to study the effect of future climate warming. With increasing elevation tree stem and height growth declines and needles become shorter. High elevation and northern provenances are optimally adapted to a short growing season, but cannot completely utilize the longer growing season when planted at low elevation. They may respond less to climate warming than low elevation trees if planted at high elevation.

Needle elongation pattern of European larch in the Engadin valley corresponds to an upward shift of 200 m over the past 20 years which is in agreement with the observed temperature increase in spring. During the extremely warm and dry summer 2003 tree stem growth has decreased at low elevation, but not at higher elevation. Thus an increase in summer drought may offset growth increases at low elevation in the future.

Keywords: stem growth, elevation gradient, growth period, shoot growth, needle elongation, drought