

Räumliche und zeitliche Unterschiede von Nadel- längen und Jahrringbreiten im Engadin

Die Analyse eines mehrjährigen Datensatzes

GEO 511-Masterarbeit

Abgabetermin: 30.09.2015

Betreuung: Prof. Dr. Robert Weibel UZH (Fakultätsvorsteher),
Dr. Paolo Cherubini WSL, Dr. Patrick Fonti WSL

Verfasserin: Alexandra Blatter
08-103-038

Institut: Geographisches Institut
Universität Zürich – Irchel
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich

Zusammenfassung

Seit 1959 werden im Auftrag der WSL und der ETHZ im Engadin die Nadeln der Lärchen gemessen. Der Grund für diese Messungen war das zyklisch wiederkehrende Phänomen des Lärchenwicklers. Die Daten über die Nadellängen wurden im Rahmen dieser Arbeit digitalisiert, die Messmethoden und Untersuchungsstandorte dokumentiert. Das Ziel dieser Arbeit ist es, mit diesem neu erstellten 40-jährigen Datensatz, die räumlichen und zeitlichen Unterschiede im Wachstum der Nadeln und Jahrringe zu analysieren. Dazu wurde an den gemessenen Lärchen Bohrkernen entnommen, um Informationen über die Jahrringbreiten zu erhalten und monatliche Temperaturdaten miteinbezogen. Das Wachstum der Nadellängen wird mit Hilfe einer logistischen Wachstumsfunktion modelliert, die Jahrringbreiten anhand dendrochronologischer Methoden ausgewertet und der Zusammenhang zwischen Jahrringbreiten, Nadellängen und Temperatur analysiert. Die Zusammenhänge zwischen den Wachstumsparametern aus der logistischen Wachstumsfunktion und den Jahrringbreiten, werden mit Hilfe eines statistischen Tests gezeigt. Die Resultate der Analyse zeigen, dass sich die Wachstumsperiode mit zunehmender Höhe leicht verschiebt. Der Zeitpunkt des Erreichens der 50%-Nadellänge zeigt einen signifikanten Zusammenhang mit den Temperaturen im April, Mai und Juni. Für die anderen Wachstumsparameter maximale Nadellänge und Geschwindigkeit des Wachstums konnten keine signifikanten Zusammenhänge gezeigt werden. Die Jahrringbreiten zeigen eine signifikante Korrelation mit den gemittelten Temperaturen der Monate April – Juni, aber auch mit den Temperaturen April bis Juni des Vorjahres. Der Zeitpunkt des Erreichens der 50%-Nadellänge verschiebt sich um rund 4 Tage pro Grad Temperaturerhöhung im Mai. Daraus lässt sich folgern, dass sich die maximale Nadellänge und die Geschwindigkeit des Wachstums wahrscheinlich nur wenig durch die Temperatur beeinflusst werden. Die Wachstumsperiode schiebt sich aber durch die Klimaerwärmung verschiebt und früher startet.

Abbildungsverzeichnis

ABB. 1 LÄRCHENWICKLER, QUELLE: WWW.BFW.AC.AT	12
ABB. 2 VERFÄRBTE LÄRCHENWÄLDER IM VAL SUSAUNA, QUELLE: BEAT WERMELINGER, WSL	13
ABB. 3 DER EFFEKT VON ERHÖHTEN TEMPERATUREN AUF DIE POPULATIONSDICHTEN DER LÄRCHENWICKLERRAUPEN ENTLANG EINES HÖHENGRADIENTEN, QUELLE: JOHNSON, 2010	14
ABB. 4 KÜRZERE NADELN IN DEN JAHREN NACH DEN LÄRCHENWICKLERAUSBRÜCHEN, QUELLE: BALTENSWEILER, 2008	16
ABB. 5 ÜBERSICHTSKARTE UNTERSUCHUNGSTANDORTE, QUELLE: SWISSTOPO.....	20
ABB. 6 STANDORT SILS SCHADENHERD, QUELLE: SWISSTOPO	23
ABB. 7 STANDORT SILS MARIA, QUELLE: SWISSTOPO	24
ABB. 8 STANDORTE ZUOZ CASTELL UND ZUOZ PAUN CHOD, QUELLE: SWISSTOPO	25
ABB. 9 STANDORT BRAIL, QUELLE: SWISSTOPO	26
ABB. 11 STANDORT FLÜELAPASS ALPENROSE, QUELLE: SWISSTOPO	27
ABB. 12 STANDORT DAVOS WOLFGANG, QUELLE: SWISSTOPO.....	27
ABB. 13 RECHTS: ANZAHL MESSUNGEN PRO STANDORT. LINKS: ANZAHL MESSUNGEN PRO JAHR	28
ABB. 14 OBEN LINKS: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES LÄRCHENZWEIGS, QUELLE: BALTENSWEILER, 2008 UNTEN LINKS: MESSEN DER NADELBÜSCHCHEN RECHTS: GRÜN MARKIERTE LÄRCHEN AM STANDORT SILS SCHADENHERD.....	29
ABB. 15 STRUKTUR DER DIGITALISIERTEN DATEN.....	30
ABB. 16 GEPLOTTETE NADELLÄNGEN VON BRAIL 1978.....	32
ABB. 17 BEISPIEL EINER MODELLIERTE WACHSTUMSKURVE DES NADELWACHSTUMS FÜR BRAIL BAUM 1 1978 (ROT) UND BRAIL BAUM 1 1998 (BLAU).....	34
ABB. 18 VERTEILUNG DER BESTIMMTHEITSMASSE NACH STANDORTE UND JAHRE.....	35
ABB. 19 DÜNNSCNITT EINES LÄRCHENBOHRKERNS MIT DEN TYPISCHEN MERKMALEN. QUELLE: WSL INFO	38
ABB. 20 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES CROSSDATINGS, QUELLE: SCHWEINGRUBER 1988	41
ABB. 21 GELBVERFÄRBTE LÄRCHEN IN SILS SCHADENHERD	44
ABB. 22 LINTAB MESSTISCH, QUELLE WWW.RINNTCH.DE	48
ABB. 23 DÜNNSCNITT LÄRCHEN BOHRKERN MIT LÄRCHENWICKLERJAHREN. QUELLE: WSL.....	49
ABB. 24 VON LINKS NACH RECHTS: BEFALLSMUSTER 1-3, QUELLE: WEBER, 1997	50
ABB. 25 EIN BEISPIEL ZUM BERECHNEN DER GLEICHLÄUFIGKEIT, QUELLE: SCHWEINGRUBER, 1988.....	51
ABB. 26 CHRONOLOGIEN DER EINZELNEN STANDORTE	55
ABB. 27 KLIMADIAGRAMME VON METEOSCHWEIZ;, VON LINKS NACH RECHTS: DAVOS, SILS MARIA, SAMEDAN	56
ABB. 28 ENTWICKLUNG DER JAHRESTEMPERRATURMITTEL, QUELLE: METEOSCHWEIZ.....	58
ABB. 29 ENTWICKLUNG DER MITTLEREN JAHRESTEMPERRATUR	59
ABB. 30 ANZAHL BERECHNETE WACHSTUMSMODELLE PRO STANDORT.....	61
ABB. 32 MAXIMALE NADELLÄNGE AUFGETRAGEN GEGEN DIE HÖHE ÜBER MEER.....	63
ABB. 33 ERREICHEN DER 50%- NADELLÄNGE AUFGETRAGEN GEGEN DIE HÖHE ÜBER MEER.	64
ABB. 34 WACHSTUMSKONSTANTE AUFGETRAGEN GEGEN DIE HÖHE ÜBER MEER.....	64
ABB. 35 VERÄNDERUNG DER MAXIMALE NADELLÄNGE ÜBER DIE ZEIT.....	66
ABB. 36 VERÄNDERUNG DES ZEITPUNKT DES ERREICHENS DER 50%-NADELLÄNGE	66

ABB. 37 VERÄNDERUNG DER WACHSTUMSKONSTANTE ÜBER DIE ZEIT.....	67
ABB. 38 DER QQ-PLOT ZEIGT, OB STICHPROBE NORMALVERTEILT IST.	68
ABB. 39 STREUDIAGRAMM ZUM BEURTEILEN DES LINEAREN ZUSAMMENHANGS	69

Tabellenverzeichnis

TAB. 1 ÜBERSICHT MESSSTANDORTE	21
TAB. 2 ÜBERSICHT UNTERSUCHTE STANDORTE.....	22
TAB. 3 BEDEUTUNG DER SPALTEN DES DATENSATZES	31
TAB. 4 VERWENDETE MESSSTATIONEN VON METEOSCHWEIZ	58
TAB. 5 BERECHNTE KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN UND P- WERTE FÜR DEN STANDORT SILS SCHADENHERD. GELB MARKIERT DIE SIGNIFIKANTEN KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN.....	70

Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich bei all jenen Menschen, die mich im Laufe der Studienzeit unterstützt haben, unabhängig davon, ob sie nachfolgend namentlich erwähnt werden oder nicht.

Besonderer Dank gilt meinen Betreuer der Masterarbeit: Prof. Dr. Robert Weibel, Dr. Paolo Cherubini (WSL) und Dr. Patrick Fonti (WSL). Ich möchte mich bei Robert Weibel für die nützlichen Inputs im Bereich GIS bedanken, bei Dr. Paolo Cherubini für die Unterstützung im Bereich der Dendroökologie und bei Dr. Patrik Fonti für die Hilfe mit R und der Statistik. Weiter möchte ich mich bei den Schweizer Wanderwegen dafür bedanken, dass ich ihre Infrastruktur beim Schreiben und Illustrieren der Arbeit nutzen durfte, sowie für die geistigen Unterstützungen. Ein grosses Dankeschön gilt auch meinen Korrekturleser Isabel Blatter, Jonas Stuber und Niklas Jäggi. Nicht zu vergessen sind meine Eltern, welche mich während meiner ganzen Studienzeit in vielen Hinsichten unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	6
Danksagung.....	7
1 Einleitung.....	10
1.1 Motivation.....	10
1.2 Struktur der Arbeit.....	11
2 Theoretischer Hintergrund.....	12
2.1 Der Lärchenwicklerzyklus.....	12
2.2 Geschichte der Lärchenwicklerforschung.....	13
2.3 Gründe für das Ausbleiben der Massenvermehrung des Lärchenwicklers.....	14
2.4 Pflanzenwachstum.....	15
2.5 Wachstumsmodelle.....	17
2.6 Baumwachstum und Klimaerwärmung.....	18
2.7 Fragestellungen.....	19
3 Daten und Methoden.....	20
3.1 Übersicht Messstandorte.....	20
3.2 Untersuchte Standorte.....	22
3.3 Daten Nadellängen.....	28
<u>3.3.1</u> Messen der Nadellängen.....	29
<u>3.3.2</u> Digitalisierte Daten.....	30
<u>3.3.3</u> Logistisches Wachstumsmodell.....	32
3.4 Analyse der Jahrringbreiten.....	37
<u>3.4.1</u> Definitionen.....	37
<u>3.4.2</u> Grundlagen der Dendrochronologie.....	38
<u>3.4.3</u> Prinzipien der Dendrochronologie.....	39
<u>3.4.4</u> Europäische Lärche (<i>Larix decidua</i> Mill.).....	44

3.4.5	Bohrkerne ziehen	46
3.4.6	Bohrkerne aufbereiten.....	47
3.4.7	Jahrringbreiten messen	47
3.4.8	Crossdating.....	48
3.5	Klimadaten.....	56
3.5.1	Klimatische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet.....	56
3.5.2	Klimafaktor Temperatur	57
3.6	Software.....	60
4	Resultate.....	61
4.1	Räumliche Analyse des Wachstums	62
4.3	Zeitreihenanalyse des Wachstum.....	65
4.2	Zusammenhang zwischen Nadellängen, Jahrringbreiten und Temperatur	68
5	Diskussion.....	73
6	Schlussfolgerung und Ausblick	76
	Literaturverzeichnis.....	77
	Anhang.....	80

1 Einleitung

1.1 Motivation

Seit 1959 werden im Auftrag des Eidgenössischen Forschungsinstituts für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) Daten über die Nadellängen der Lärchen an verschiedenen Standorten in der Schweiz gesammelt. Doch nur ein kleiner Teil dieser enormen Datenmenge wurde ausgewertet und für die Forschung verwendet. Die meisten Daten wurden nicht digitalisiert und stehen nur in Papierformat im Archiv der WSL. Diese Erhebung von Daten über die Nadellängen ist einzigartig in der Schweiz. Auch weltweit gesehen wurden solche Daten kaum in wissenschaftlichen Studien verwendet. Die Datenerhebung erfolgte über mehr als 50 Jahre. Die Zeitspanne ist gross genug um den Einfluss der Klimaerwärmung auf die Nadellängen zu untersuchen. Aber auch der Einfluss von Standortfaktoren auf das Wachstum der Bäume bzw. der Nadellängen kann analysiert werden. In Anbetracht des Potentials, das dieser Datensatz birgt, wären es verlorene Bemühungen und verlorenes Geld, wenn er in Vergessenheit geraten würde. Matthias Dobbertin und Werner Baltensweiler von der WSL hatten bereits begonnen, einige Daten zu digitalisieren, strukturieren und analysieren, konnten aber das Projekt nicht abschliessen (Dobbertin & Giuggiola 2006; Baltensweiler et al. 2008). In dieser Arbeit sollen nun alle vorhandenen Messungen über die Nadellängen digitalisiert und in einem einheitlichen Datensatz abgelegt werden. Dies soll zukünftige Analysen vereinfachen. Schwierigkeiten bereitet, dass die Datenerhebung von verschiedenen Personen, ja zum Teil sogar von verschiedenen Abteilungen durchgeführt wurde. Dies führt dazu, dass die Methoden der Datenerhebung variieren und allenfalls zu nichtvergleichbaren Daten führen. Der Aufwand für das Digitalisieren der Daten ist gross und die Fehlerüberprüfung extrem aufwändig. Die Methoden der Datenanalyse müssen an das verwendete Mess- und Aufnahmemodell angepasst werden und konnten nicht nach den Fragestellungen dieser Arbeit ausgerichtet werden. Dies bietet einige Herausforderungen, macht aber diese Arbeit auch spannend. Das Ziel dieser Masterarbeit ist, diesen interessanten Datensatz für zukünftige Forschungen zugänglich zu machen und erste Analysen über die wachstumsbeeinflussenden Faktoren und die Veränderungen des Wachstums über die Zeit zu erstellen. Weiter sollen die Recherchen über die Datenerhebungen und die dabei verwendeten Methoden hier dokumentiert werden, um die Grundlagen für das Fortführen der Messungen und weiterführenden Arbeiten zu bilden.

1.2 Struktur der Arbeit

Die Arbeit ist in drei Hauptteile gegliedert. In einem ersten Teil wird eine Einführung in die Thematik gegeben, auf den Stand der Forschung eingegangen und die Forschungsfragen erläutert. In einem zweiten Teil wird das Untersuchungsgebiet, die verwendeten Daten und die für die Datenerhebung und Auswertung benötigten Methoden vorgestellt. In einem dritten Teil werden die Resultate der Analyse über die räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Nadellängen und Jahrringbreite präsentiert, die Forschungsfragen und Hypothesen diskutiert und einen Ausblick über potentielle weiterführende Forschungsarbeiten gegeben.

2 Theoretischer Hintergrund

Seit 1959 werden Daten über die Nadellängen der Lärchen in der Schweiz und an einigen wenigen Standorten im Ausland erhoben. Koordiniert und durchgeführt werden diese Messungen durch das Forschungsinstitut für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und der ETH Zürich. Der ursprüngliche Grund für diese langjährige Feldforschung war das zyklisch wiederkehrende Phänomen des Lärchenwicklers (*Zeiraphera diniana*).

2.1 Der Lärchenwicklerzyklus



Abb. 1 Lärchenwickler, Quelle: www.bfw.ac.at

Der Lärchenwickler tritt etwa alle 8-9 Jahre als Massenphänomen in den Alpen auf. In den inneralpinen Tälern auf ca. 1'700 m. ü. M. findet er optimale Überlebensbedingungen (Baltensweiler et al. 2008). Die Weibchen legen im Spätsommer etwa 150 Eier unter Flechten und Rinden der Lärchen. Im darauf folgenden Frühling schlüpfen die

hellgelben Raupen des Falters und fressen an den frisch ausgetriebenen Nadeln der Lärchen. Die Raupen häuten sich innerhalb von 6-8 Wochen viermal bis sie schliesslich ausgewachsen, tiefschwarz und ca. 10-15 mm lang sind. Ende Juli seilen sie sich an selbst gesponnenen Fäden von den Bäumen ab und verpuppen sich im Bodenstreu. Nach einem Monat schlüpfen sie dann als dämmerungs- und nachtaktive Falter, welche bis im Oktober überleben können. Im ersten Jahr des Massenvermehrungsphänomens treten oft nur lokale Schäden an Sonnenhängen auf. Im zweiten Jahr sind die Schäden weitverbreitet und im dritten Jahr sind nur noch vereinzelt Schattenhänge von den Raupen befallen (Baltensweiler et al. 2008). In den Ausbruchsjahren können bis zu 30'000 Raupen an einer Lärche fressen (Baltensweiler & Rubli 1999). Bei stark abgefressenen Lärchen kann es noch im selben Jahr zu einem Wiederaustrieb der Nadeln kommen. Die Lärchen bilden aufgrund der Fressschäden in den folgenden Jahren dickere und kürzere Nadeln aus (Baltensweiler et al. 2008). Diese Nadeln sind nicht mehr die optimale Nahrung für die Raupen und die Massenvermehrung wird gebremst (Baltensweiler, 1978). Der Lärchenwicklerzyklus bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von ca. 200 km pro Jahr von West nach Ost entlang des Alpenbogens (Auer 1977). Die Massenvermehrung startet also in den französischen Alpen und endet in den östlichen Alpenregionen Österreichs.

2.2 Geschichte der Lärchenwicklerforschung

Die Forschung über den Lärchenwicklerzyklus startete nach dem zweiten Weltkrieg in den 50er Jahren. Die Tourismus Verantwortlichen machten sich Gedanken über die zukünftige Entwicklung des internationalen Tourismus im Engadin. Der Lärchenwickler und die damit einhergehende rötliche Verfärbung der Lärchen löste die Befürchtung aus, dass sich das Phänomen negativ auf den Tourismus auswirken könnte. Die Annahme wurde durch den starken Befall im Jahre 1947 bestärkt und führte dazu, dass ausführliche Studien gestartet wurden mit dem Ziel der Bekämpfung des Lärchenwicklers, unter anderem mit dem Insektizid DDT (Baltensweiler & Rubli 1999).

Im Zeitraum von 1949 bis 1975 wurden in den Alpen 26 regionale Populationszyklen untersucht (Auer 1975; Auer 1977; Baltensweiler 1970-82). Weiter wurden auch Studien über das Ausbreitungsverhalten, die Vermehrung und die Parasiten des Lärchenwicklers erstellt. Die Resultate wurden in mehr als 150 wissenschaftlichen Studien veröffentlicht (Baltensweiler 1977). Fachliche Differenzen führten dazu, dass die Zusammenarbeit zwischen Dr. C. Auer, damals beim Forstamt des Kantons Graubünden angestellt, und dem Entomologischen Institut der ETH Zürich beendet wurde. Bis zu seinem unerwarteten Tode im Jahr 1979 führte Dr. C. Auer die Forschung zur Bekämpfung der Lärchenwickler, wie z. B. das Raupen Monitoring oder das grossflächige Besprühen der Wälder mit *Bacillus thuringensis* (Bt), weiter. Das Institut für Entomologie hingegen führte die Forschung über die Ökologie und Verbreitung der Lärchenwickler bis 1982 weiter. Ab 1982 wurden nur noch an wenigen Standorten im Oberengadin



Abb. 2 Verfärbte Lärchenwälder im Val Susauna, Quelle: Beat Wermelinger, WSL

phänologische Beobachtungen und Kartierungen der Ausbrüche durchgeführt. So ist es nicht erstaunlich, dass das Nichtauftreten der erwarteten Massenvermehrung 1989 fast unbemerkt blieb (Baltensweiler & Rubli 1999). Diese Massenvermehrung des Lärchenwicklers, welche zuvor seit 1200 Jahren in regelmässigen Zyklen und fast ununterbrochen aufgetreten ist, scheint seit den 90 Jahren nicht mehr zu existieren (Esper et al. 2007). Das Ausbleiben des Zyklus induzierte neue Forschungen über die Ursachen des Ausbleibens des Phänomens.

2.3 Gründe für das Ausbleiben der Massenvermehrung des Lärchenwicklers

Vor allem die Wintertemperatur scheint eine entscheidende Rolle im Ausbleiben des Lärchenwicklerzyklus zu spielen. Bei erhöhten Wintertemperaturen können die Eier der Lärchenwickler nicht optimal überwintern, dadurch wird die Massenvermehrung gebremst und der Ausbruch abgeschwächt. Auch kalte und nasse Sommer beeinträchtigen das Populationswachstum und die

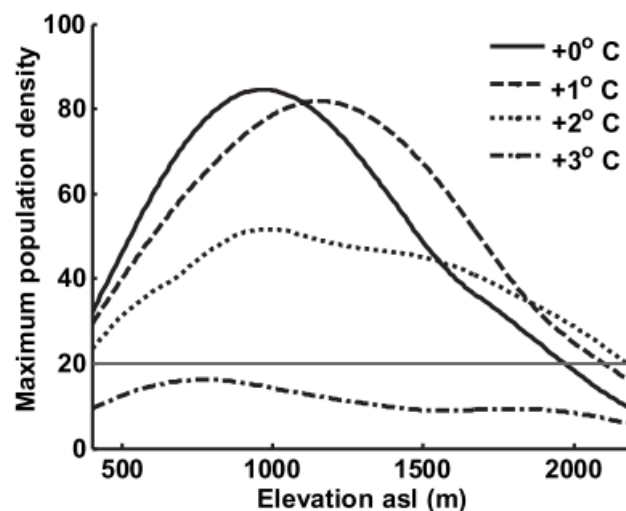


Abb. 3 Der Effekt von erhöhten Temperaturen auf die Populationsdichte der Lärchenwicklerraupen entlang eines Höhengradienten, Quelle: Johnson, 2010

Periodizität des Phänomens sinkt. Kontinentale Winter und trockene Sommer begünstigen hingegen das Populationswachstum. Bei anhaltender Klimaerwärmung könnte sich die optimale Höhenlage des Lärchenwicklers in höhere Lagen verschieben, allenfalls sogar über die Waldgrenze. Dies könnte zu einer Verringerung des Auftretens oder sogar zum Ausbleiben des Lärchenwicklers führen (Baltensweiler 1993; Johnson et al. 2010).

Die Ursachen für das Ausbleiben beruhen aber nicht nur auf der Klimaerwärmung. Zeitlichen Schwankungen in der Intensität der Ausbrüche liegen oft Landnutzungsänderungen zu Grunde. In der heutigen Zeit verliert die Alpwirtschaft in den Alpen kontinuierlich an Bedeutung. Dies hat zur Folge, dass wieder vermehrt Kiefern in den lichten Lärchenwäldern wachsen. Diese Bildung von heterogenen Waldformen kann das Populationswachstum des Lärchenwicklers negativ beeinflussen und die Zyklen abschwächen oder beenden (Battipaglia et al. 2014a).

Abschliessend kann gesagt werden, dass das Klima definitiv einen Einfluss auf den Lärchenwicklerzyklus hat. Wie die einzelnen Faktoren aber genau zusammenspielen und welcher den entscheidenden Anstoss für das Ausbleiben des Phänomens gibt, kann nicht definitiv geklärt werden.

2.4 Pflanzenwachstum

Neben dem Einfluss des Lärchenwicklers auf die Nadellängen und die Jahrringbreiten, soll in dieser Arbeit der Einfluss des Klimas auf die Nadellängen, sowie die Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten gezeigt werden. Phänologische Beobachtungen werden schon seit je her verwendet, um den Effekt der Klimaerwärmung auf die Vegetationsentwicklung zu quantifizieren, Daten über Nadellängen jedoch kaum (Dobbertin, unpubl.). Der 40-jährige Datensatz über die Nadellängen, der im Rahmen dieser Arbeit digitalisiert wurde, bietet eine gute Datengrundlage, um den Einfluss der Klimaerwärmung auf die Nadeln und Jahrringe der Lärchen zu untersuchen.

Die Jahrringbreiten und die Nadellängen geben prinzipiell Informationen über das Wachstum des Baumes. Das Wachstum ist abhängig von der Atmung und Fotosynthese und diese werden beeinflusst durch verschiedene Umweltfaktoren wie Licht, Temperatur, Wasser, verfügbare Gase und die Bodenfruchtbarkeit. Hinzu kommen innere Faktoren, wie der Zustand der Stomata, die Akkumulation und die Verfügbarkeit von Nahrung, Verletzungen an Pflanzenteilen oder auch der physiologische Zustand des Gewebes und der Zellen. Einige dieser Faktoren sind abhängig vom Alter des Baumes beziehungsweise der Zellen. Die Zellatmungsrate ist zum Beispiel höher in jungen Zellen als in älteren (Fritts 1976).

Studien zeigen, dass bei einer Lufttemperatur von unter 5°C kein Stammzuwachs (Loris 1981) und keine Triebstreckung (Speer 2010) erfolgen. Wenn hingegen die Tagesmitteltemperatur während mehreren Tagen über 10°C beträgt, wird der Stammzuwachs gestartet. Dies zeigt eine Studie mit Fichten aus Baden-Württemberg (Wilpert von 1990). Bei immergrünen Bäumen wie Kiefern oder Fichten, welche ihre Nadeln gleichzeitig oder kurz nach der Streckung der Triebe entwickeln, wird das Längenwachstum der Nadeln vor allem durch die Umweltbedingungen kurz vor oder während des Austriebs bestimmt (McCarroll et al. 2003). Bei Laubbäumen oder Lärchen hingegen müssen vor dem Austrieb Reservestoffe verbraucht werden, um die ersten Blätter oder Nadeln bilden zu können. Deshalb sind die Nadellängen von den Umweltbedingungen vom Vorjahr beeinflusst.

Nicht nur die Lufttemperatur spielt eine wachstumslimitierende Rolle, sondern auch die Bodentemperatur (Körner 2003; Baldocchi et al. 2005). Verschiedene Studien zeigen, dass sowohl das Wurzelwachstum (Tranquillini, 1979; Körner, 1999) wie auch das Streckungswachstum der Triebe (Scott et al. 1987) durch tiefe Bodentemperaturen beeinträchtigt werden kann. Mit Hilfe von Kohlenstoff-Fluss-Messungen wurde herausgefunden, dass Laubwälder von verschiedenen Untersuchungsstandorten erst dann mit ihrem Wachstum begannen, wenn die Bodentemperatur den Wert der mittleren jährlichen Lufttemperatur des Standortes überschritt (Baldocchi et al. 2005).

Bäume können aber auch bei extremer Hitze durch den erhöhten Energieaufwand für die Atmung oder durch direkte Schäden mit reduziertem Wachstum reagieren. Nadelbäume in borealen und gemässigten Breiten erleiden ab einer Temperatur von 40-50°C Schäden. Die Unterschiede in der Anpassungsfähigkeit zwischen den verschiedenen Arten und den einzelnen Individuen ist aber gross (Larcher 2001)

Die Fotosynthese- und die Zellatmungsrate müssen demnach auch von der Nadellänge abhängig sein. Die Oberfläche, welche zur Fotosynthese benützt werden kann, vergrößert sich bei zunehmender Nadellänge und dementsprechend auch die Fotosyntheserate. Daher stellt sich die Frage, ob grundsätzlich ein Zusammenhang zwischen Jahrringbreiten und Nadellängen gezeigt werden kann und welchen Einfluss die Klimaerwärmung auf das Wachstum der Lärchen, insbesondere auf die Länge der Nadeln, hat. Das Abfressen der Nadeln durch die Raupen des

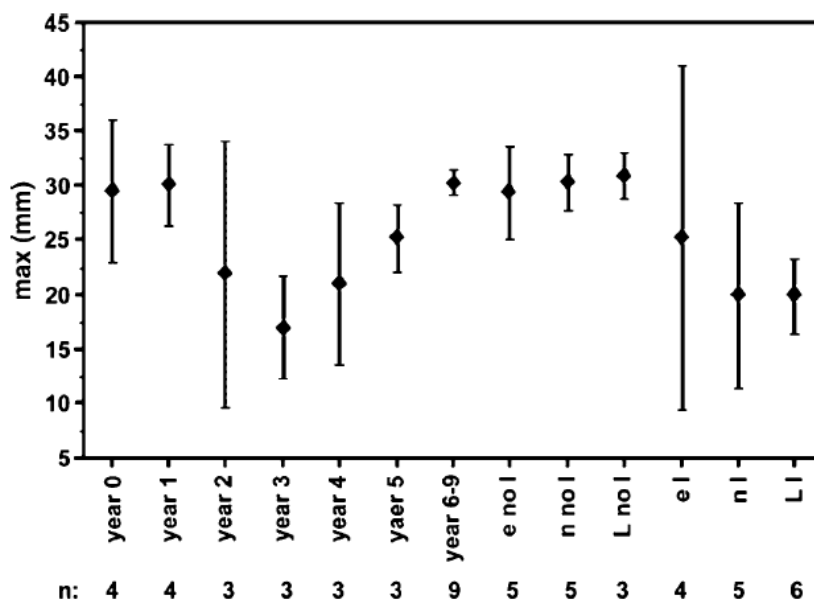


Abb. 4 Kürzere Nadeln in den Jahren nach den Lärchenwicklerausbrüchen, Quelle: Baltensweiler, 2008

Lärchenwicklers hat zur Folge, dass das Wachstum des Baumes durch die eingeschränkte Fotosyntheseleistung gehemmt wird. Es können weniger Reservestoffe eingelagert werden und die Jahrringe fallen schmaler aus. Weiter bilden die Lärchen in den Jahren nach den Ausbrüchen dickere und kürzere Nadeln aus (Baltensweiler et al. 2008). Dadurch wird das Populationswachstum gebremst und das ökologische Gleichgewicht verschiebt sich zu Gunsten der Lärchen. Ob der Lärchenwickler verantwortlich ist für die schmalen Jahrringe oder allenfalls ungünstige Klimabedingungen, kann nur durch den Vergleich der Jahrringsequenzen der Lärchen mit den Sequenzen von weniger betroffenen Arten wie Fichte oder Zirbe eruiert werden (Schweingruber 1989).

2.5 Wachstumsmodelle

Das Wachstum der Pflanzen erfolgt nicht linear über die ganze Vegetationsperiode. Das bedeutet, die relative Wachstumsrate variiert über die Zeit und kann nicht mit einem linearen Modell beschrieben werden. Für das Wachstum der Pflanzen existieren verschiedene Wachstumsmodelle, welche versuchen, die zeitlichen Variationen mit einzubeziehen. Grundsätzlich wird zwischen zwei Modellen unterschieden. Einerseits Wachstumsmodelle, welche annehmen, dass das Wachstum begrenzt ist durch einen asymptotischen maximalen Wert. In dieser Arbeit ist dieser Wert die maximale Nadellänge. Andererseits Modelle, welche von einem unbegrenzten Wachstum ausgehen (Paine et al. 2012).

Je nach abhängiger Variable oder der zu untersuchenden Zeitspanne eignet sich das asymptotische oder das nicht begrenzte Modell. Das Höhenwachstum von Bäumen ist meist aus physikalischen Gründen begrenzt. Das Wasser kann nicht in unbegrenzte Höhen transportiert werden, weil die Saugspannung mit zunehmender Höhe abnimmt. Die Biomasse und der Umfang eines Baumes hingegen können unbegrenzt wachsen (Thomas 1996; Chave et al. 2003; Muller-Landau et al. 2006; Sillett et al. 2010).

Es wird schnell klar, dass für die Nadellängen ein Modell mit der Annahme des begrenzten Wachstums geeignet ist. Da das Wachstum der Nadeln durch die Vegetationsperiode, genauer gesagt durch das Klima begrenzt wird. Die Nadeln fallen jedes Jahr ab und müssen im Frühjahr neu gebildet werden. Das bedeutet, dass die Nadeln nicht unbegrenzt wachsen können. Es scheint auch nicht effizient zu sein, die ganze Energie und alle Nährstoffe in das Nadelwachstum zu investieren, wenn die Nadeln im Herbst wieder abgeworfen werden. Es ist effizienter

für den Baum, ab einer gewissen Nadellänge die Nährstoffe zu speichern und zum Beispiel für das Höhenwachstum oder Dickenwachstum einzusetzen.

Das logistische Wachstumsmodell ist das meist genutzte asymptotische Wachstumsmodell (Winsor 1932; Hunt & Parsons 1977; Zeide 1993; Heinen 1999). Dieses Modell wird durch die drei Parameter a , b und c definiert. Der Parameter a ist die obere Asymptote, b beschreibt den Wendepunkt der Funktion und c steht für die Wachstumskonstante.

Die abhängige Variable (**Nadellänge**) und die unabhängige Variable (**DOY¹**) sind durch die Messwerte gegeben und die drei Parameter werden mit Hilfe des logistischen Wachstumsmodells modelliert. Die modellierten Parameter ermöglichen die Analyse der Nadellängen. Es können sowohl Aussagen über temporäre Veränderungen (Einfluss Klimaveränderung), als auch über die Standorte und die spezifischen Standortfaktoren, wie Temperatur oder Höhe über Meer gemacht werden.

2.6 Baumwachstum und Klimaerwärmung

Seit dem Jahr 1900 ist die Temperatur in der Schweiz rund 0.8 °C gestiegen. Der grösste Anteil dieser Erwärmung erfolgte in den letzten 30 Jahren (Rebetez 2001). Verschiedene Studien zeigen, dass Bäume seit den 90er Jahren in Mitteleuropa einen höheren Zuwachs zeigen als früher (Spiecker 1999; Pretzsch 1992). Rund drei Viertel der untersuchten europäischen Wälder zeigen eine erhöhte Produktivität (Boisvenue & Running 2006). Zuerst wurde angenommen, dass der gesteigerte Zuwachs aus den erhöhten Stickstoffeinträgen resultiert. Der Einfluss der steigenden Temperaturen wurde daher als gering eingeschätzt (Dobbertin & Giuggiola 2006). Eine Studie, basierend auf österreichischen Inventurdaten, zeigt aber eine Verlängerung der Wachstumsperiode bedingt durch die Temperaturerhöhung und einen dadurch resultierenden Durchmesserzuwachs (Hasenauer et al. 1999). Weiter wurde gezeigt, dass sich die Vegetationszeit auf der Nordhalbkugel in den letzten Jahrzehnten um 10 bis 20 Tage verlängert hat (Linderholm 2006). Zudem treten die phänologischen Frühjahrsphasen, wie die Blattentfaltung oder die Blüte, in Europa deutlich verfrüht auf (Menzel & Fabian 1999).

¹ Tag des Jahres

2.7 Fragestellungen

Was sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten bezüglich Nadellängen und Jahrringbreiten?

Kann ein Zusammenhang zwischen Jahrringbreiten, Nadellängen und Klima gezeigt werden?

Welchen Einfluss hat die Klimaerwärmung auf die Phänologie und das Wachstum der Lärchennadeln?

3 Daten und Methoden

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die verwendeten Daten und Methoden geben und die Struktur der einzelnen Datentypen zeigen. In dieser Arbeit wurden drei verschiedene Arten von Daten verwendet:

- Nadelmessungen
- Jahrringmessungen
- Klimadaten

3.1 Übersicht Messstandorte

Die Abb. 4 zeigt die Standorte der Nadelmessungen im Graubünden. Es wurden an zwei weiteren Standorten in der Schweiz (Brienz und Lenzburg) Messungen durchgeführt. Die Tab. 1 zeigt eine Übersicht über die vorhandenen Daten in den einzelnen Jahren. Bei einem Kreuz in den Feldern sind Messungen vorhanden und wenn sie noch zusätzlich gelb markiert sind, existieren die Daten in digitalisierter Form. Die rot markierten Daten wurden zwar aufgenommen, sind aber nicht mehr auffindbar (siehe Kap. 3.3.1). In dieser Arbeit werden die sieben Standorte, welche die Tab. 1 und Abb.5 zeigt, näher untersucht. Diese Standorte liegen im Engadin und in Davos.

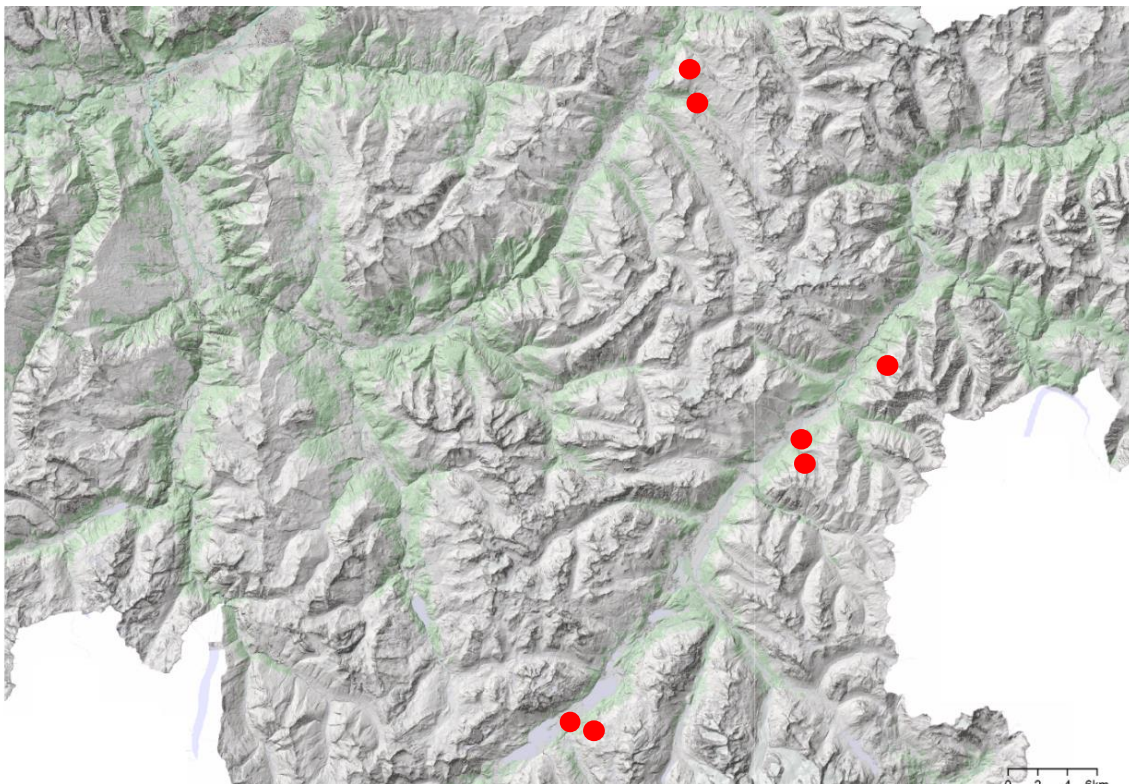


Abb. 5 Übersichtskarte Untersuchungsstandorte, Quelle: Swisstopo

Das Ziel ist es, alle Messdaten zu digitalisieren, um alle vorhandenen Daten in die zukünftigen Analysen miteinbeziehen zu können. Die genaue Lokalisierung der blau markierten Standorte ist kaum mehr möglich. An diesen Standorten wurden schon seit den 80er Jahren keine Messungen mehr gemacht und es sind auch keine Koordinaten oder Bemerkungen über den exakten Standort der gemessenen Lärchen vorhanden. Einzig für den Standorte Sils Campingplatz sind Skizzen über den genauen Standort der Bäume vorhanden. Eine weitere Unsicherheit bergen die Messmethoden. Es gibt keine Garantie, dass über die Jahre immer mit der gleichen Methode gemessen wurden. Es wurden zwar schon seit 1959 Messungen gemacht, das Datenformular war aber anders. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit nur die Daten ab 1972 verwendet, um eine gewisse Sicherheit zu haben, dass nach der gleichen Methode gemessen wurde. Im Kap. 3.3.1 wird genauer auf die verwendeten Messmethoden eingegangen.

3.2 Untersuchte Standorte

Dieses Kapitel geht näher auf die in dieser Arbeit untersuchten Standorte im Engadin und in Davos ein. Die Tab. 2 gibt einen Überblick über die einzelnen Standorte und ihre Attribute. Weiter wird gezeigt, an wie vielen Lärchen Nadellängen und Jahrringbreitenmessungen durchgeführt wurden. Zudem werden genauen Koordinaten des Standorts angegeben. Falls die Messungen der Nadellängen weitergeführt werden, können die Standorte mit diesen Angaben und Karten einfach lokalisiert werden.

Tab. 2 Übersicht untersuchte Standorte

Standort	ID	Höhe über Meer	Koordinaten	Anzahl gemessene/ gebohrte Bäume
Sils Schadenherd	SS	1830-1900	777063/144922	8
Sils Maria	SM	1884	779424/144708	4
Brail	BR	1632	799138/171246	10
Zuoz Castell	ZC	1877	791969/163928	4
Zuoz Paun Chod	ZPC	1762	792745/163948	4
Davos Wolfgang	DW	1640	784336/189769	4
Flüelapass Alpenrose	FA	1836	788037/186003	4

Sils Schadenherd (SS)

Der Standort Sils Schadenherd befindet sich ca. 950 m nach dem Kreisverkehr in Segl Baselgia. Es gibt eine kleine Einbuchtung auf der rechten Strassenseite, von wo aus ein nicht markierter Pfad zum Standort führt. Die acht Bäume sind mit einem grünen Punkt (ausser B7 und B8 mit einem weissen Punkt) markiert und befinden sich auf einer Höhe zwischen 1830 und 1900 m. ü. M. Die Bäume B7 und B8 befinden sich etwas abseits der anderen Bäume, ca. 100 Meter oberhalb des Wanderweges auf der linken Seite des Lawinenschuttkegels. Die gemessenen Äste sind mit einem Alufolienbändchen gekennzeichnet. Der Hang hat eine südöstliche Exposition. An diesem Standort erfolgen die Messungen seit 1972 sehr kontinuierlich und nur mit wenigen Lücken. Die Lärchen überwiegen anzahlmässig an diesem Standort und es sind nur wenige kleine Kiefern anzutreffen.



Abb. 6 Standort Sils Schadenherd, Quelle: Swisstopo

Sils Maria (SM)

Der Standort Sils Maria befindet sich in der Nähe der Seilbahn Station Sils Maria LSM. Er ist am besten über die rot-eingezeichnete Route zu erreichen. Die vier Lärchen befinden sich vor einer eingezäunten Jungwuchsfläche und sind mit einem grünen Punkt markiert. Die gemessenen Äste sind mit einem Alufolienbändchen gekennzeichnet. Der Hang hat eine nordwestliche Exposition und die Lärchen sind die dominierende Art, wobei es auch einige wenige Fichten und Kiefern hat. Bei diesen beiden Standorten sind die Daten zwischen 1990 und 2003 nicht auffindbar. Es ist aber sicher, dass Messungen in diesem Zeitraum gemacht wurden.

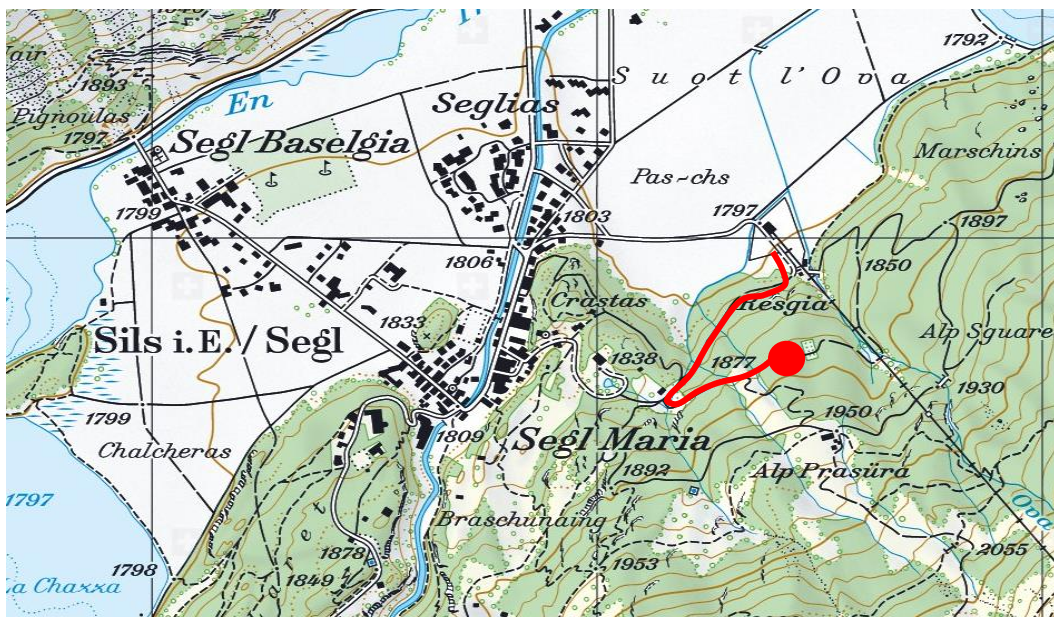


Abb.7 Standort Sils Maria, Quelle: Swisstopo

Zuoz Paun Chod (ZPC)/ Zuoz Castell (ZC)

Die Standorte Zuoz Paun Cod und Zuoz Castell befinden sich beide in der Nähe von Zuoz. Der Standort Zuoz Castell liegt ca. 500 m oberhalb des Parkplatzes des Hotels Castell. Es sind vier mit grünen Punkten und mit Alubändchen markierte Bäume, welche etwas abseits des Weges stehen. Diese Lärchen weisen ein Alter von rund 300 Jahren auf und gehören zu den ältesten Lärchen, die im Rahmen dieser Arbeit gebohrt wurden. Der Standort Zuoz Paun Chod befindet sich ca. 20 m oberhalb eines Gebäudes (Ferienhaus Baltensweiler) am Waldrand. Es sind wiederum vier grün markierte Bäume mit Alubändchen. Bei diesen beiden Standorten sind die Daten zwischen 1990 und 2003 nicht auffindbar. Es ist aber sicher, dass Messungen in diesem Zeitraum gemacht wurden.

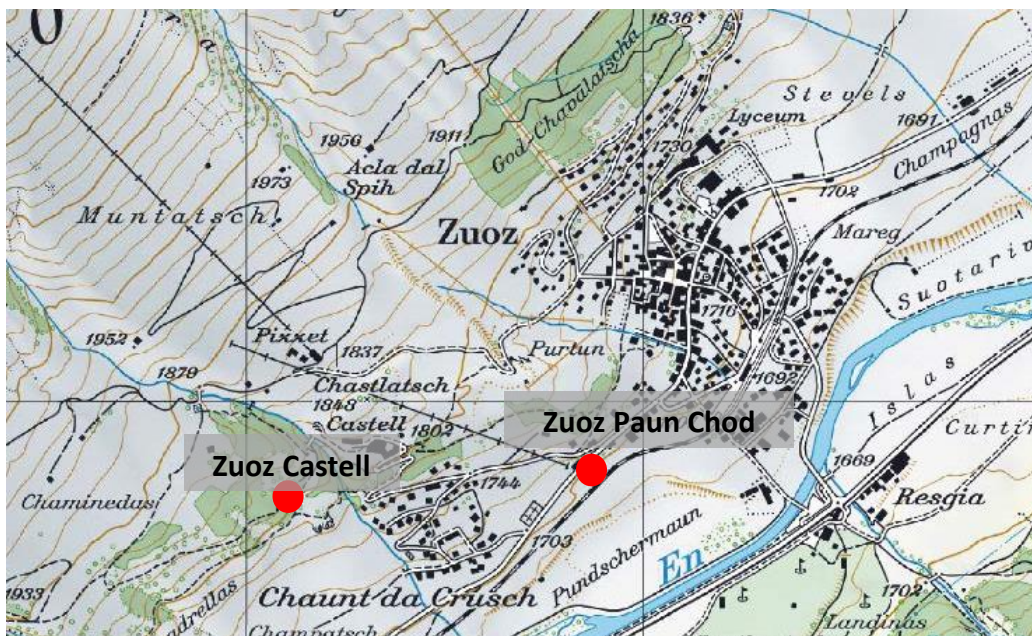


Abb. 8 Standorte Zuoz Castell und Zuoz Paun Chod, Quelle: Swisstopo

Brail (BR)

Der Standort Brail befindet sich etwa 50 m abseits der Hauptstrasse. Insgesamt wurden an 11 Lärchen die Nadeln und Jahrringe gemessen. Die Baumnummern haben jedoch im Laufe der Jahre immer wieder gewechselt und neue Bäume sind hinzugekommen. Die Wechsel der Baumnummern wurden nur ungenügend dokumentiert. Eine eindeutige Zuordnung der Messungen zu den einzelnen Bäumen war daher nicht möglich. Im neu erstellten Datensatz existiert eine Spalte mit den ursprünglichen Baumnummern und eine mit der Nummerierung nach Baltensweiler 2004, um die Wechsel der Bäume einigermaßen nachvollziehen zu können. Die definitive Nummerierung wurde anhand einer Tabelle von Baltensweiler erstellt. Diese zeigt wie sich die Nummern möglicherweise über die Jahre geändert haben. Es wurde versucht, die Baumwechsel nach dieser Tabelle nachzuvollziehen. Nicht alle gemessenen Äste sind mit Alufolienbändchen markiert. Die Nadelmessungen am 04.08.2015 konnten nicht vollständig durchgeführt werden, da einige der Bäume an diesem Standort gefällt wurden. Die Messungen in Brail erfolgten aber seit 1972 kontinuierlich und nur mit wenigen Lücken.

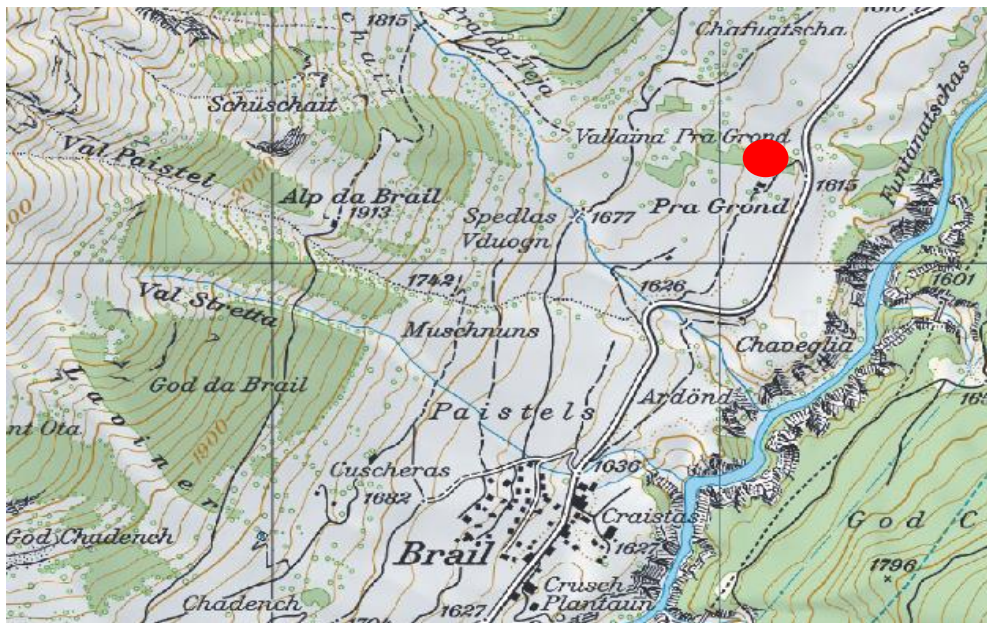


Abb. 9 Standort Brail, Quelle: Swisstopo

Flüelapass Alpenrose (FA) / Davos Wolfgang (DW)

Flüelapass Alpenrose und Davos Wolfgang sind die einzigen Standorte, welche sich nicht im Engadin befinden. Der Standort Flüelapass Alpenrose befindet sich auf der nördlichen Seite des Flüelapass. Kurz vor dem Restaurant Alpenrose auf der rechten Strassenseite vom Pass aus gesehen, gibt es ein Feldweg der links hinunter und dann gleich wieder auf die Hauptstrasse führt. In dieser Schlaufe befinden sich die vier grün und mit Alubändchen markierten

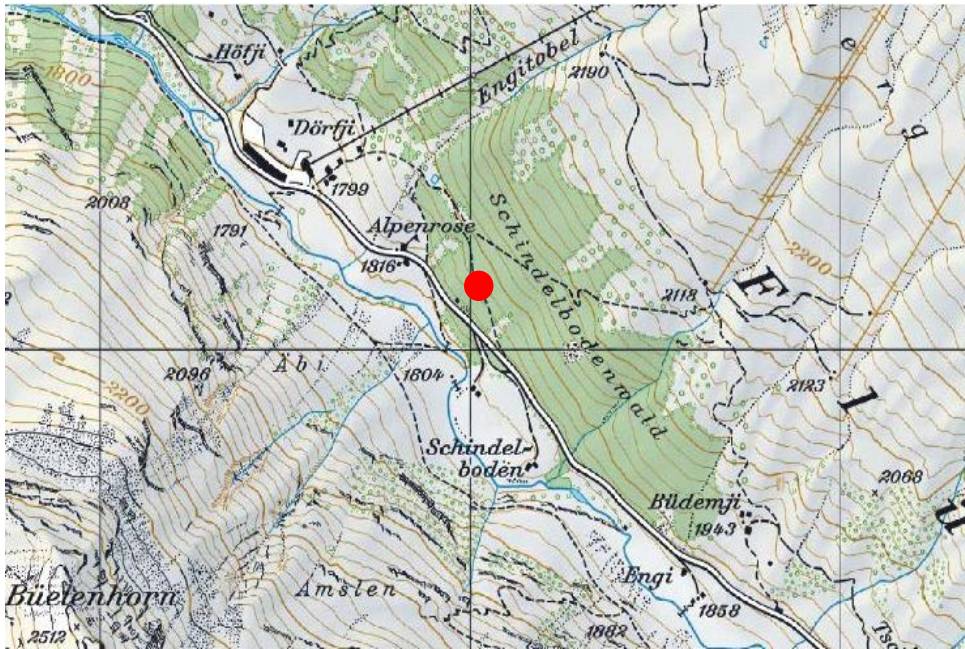


Abb. 11 Standort Flüelapass Alpenrose, Quelle: Swisstopo

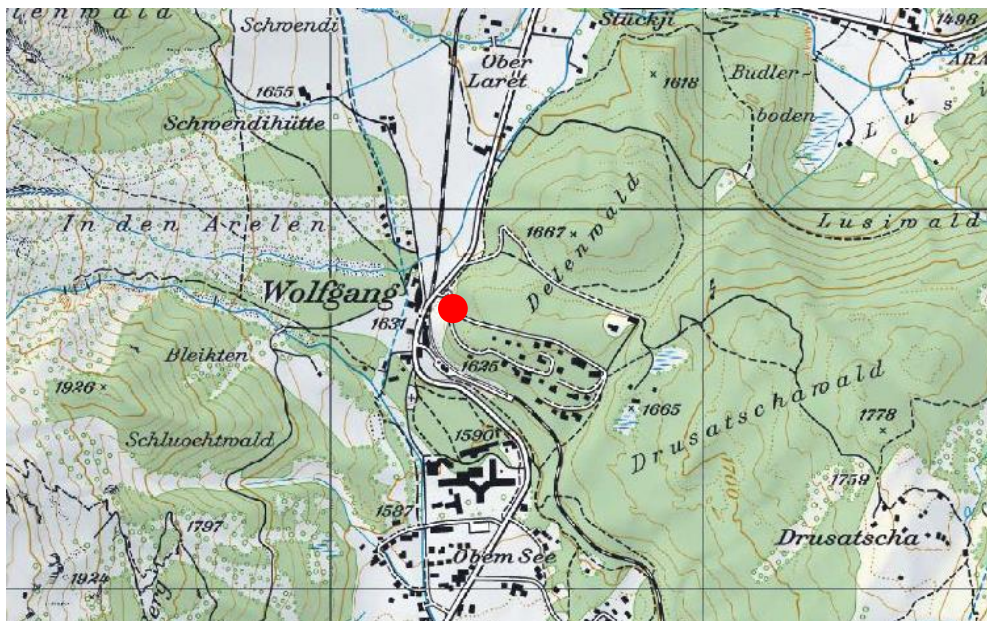


Abb. 12 Standort Davos Wolfgang, Quelle: Swisstopo

Bäume.

Der Standort Davos Wolfgang befindet sich etwas nördlich von Davos. Auch hier sind die Lärchen mit grünen Punkten und Alubändchen markiert und stehen direkt am Waldrand. An beiden Standorten fehlen die Daten zwischen 1990 und 2003. Die Lärchen an diesen beiden Standorten sind nur rund 100 Jahre alt.

3.3 Daten Nadellängen

Die Daten über die Nadellängen werden seit 1959 von der WSL und der ETH Zürich erhoben. Es wird angenommen, dass die Daten seit 1972 nach der gleichen Messmethode gemessen wurden. Das Datenformular hat sich zwischen 1972 und 2003 nicht verändert und es wurden immer sechs Messungen pro Baum und Tag durchgeführt. Die vorhandene Datenmenge variiert stark während der Messperiode. Grundsätzlich nimmt die Datendichte im Verlauf der Jahre ab. Es wird nicht nur an weniger Standorten gemessen, sondern zum Teil auch nur noch einmal oder zweimal im Jahr. Die Standorte im Engadin, vor allem Sils Schadenherd und Brail, weisen die längsten und homogensten Zeitreihen auf. Aber auch die anderen fünf der sieben hier untersuchten Standorte würden relative lange Zeitreihen aufweisen, wie die Tab. 2 zeigt.

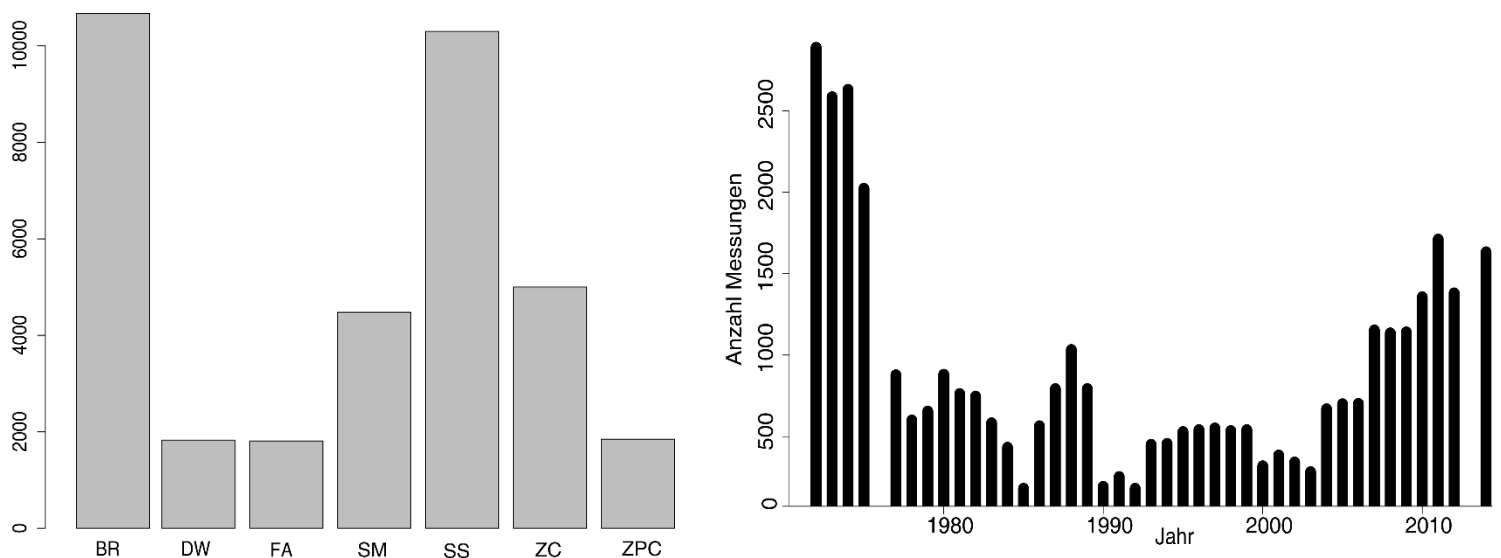


Abb. 13 Rechts: Anzahl Messungen pro Standort. Links: Anzahl Messungen pro Jahr

Die rotmarkierten Daten wurden zwar erhoben, sind aber im Archiv der WSL nicht auffindbar und. Leider war es auch nicht möglich, die digitalisierten Daten auf einem alten beschädigten Datenträger einzulesen. Es gibt Hinweise, dass die Daten an der ETHZ in Besitz von Prof. Dr. Andreas Fischlin sind. Auf mehrmalige Anfrage wollte und konnte niemand Auskunft zum Ver-

bleib der Daten geben. Es sind wohl zwischenmenschliche Differenzen, herrührend aus vergangenen Tagen, welche zum nichtaushändigen der Daten führt. Aufgrund von Hinweisen in einigen Dokumenten ist anzunehmen, dass die Daten erhoben wurden. Es wird daher weiterhin versucht die Daten aufzutreiben. Für zukünftige Analysen ist der Datensatz nur interessant, wenn er vollständig und einheitlich ist. Es ist erstrebenswert, alle Daten im gleichen Datensatz zu speichern und für alle interessierten Institute zur Verfügung zu stellen.

3.3.1 Messen der Nadellängen

Die Messung der Nadellänge erfolgte an einem bestimmten Ästchen in der unteren Krone der Lärchen. Die Sprossachse ist am Blattansatz oft etwas verdickt. Diese Verdickung wird auch Nodus (Knoten) genannt. Nodien werden jedes Jahr gebildet, wenn die Sprossachse wächst. Die Messungen erfolgten immer am dritten Nodus also am dritten Zweigjohrgang und zwar proximal und distal drei Nadelbüschchen (Kurztrieben). Unter „proximal“ ist die Messung in Richtung Stamm und unter „distal“ vom Stamm weg gemeint Die Nadeln des Nadelbüschchens werden dabei mit den Fingern zusammengedrückt und die längsten Nadeln gemessen. Insgesamt erfolgten pro Baum und Datum sechs Messungen. Die Daten wurden nicht immer am gleichen Ast erhoben, da die Nadeln von Kühen abgefressen wurden oder gewisse Äste abgebrochen sind. In diesem Falle wurde ein neuer Ast gewählt und der Wechsel im Datenformular

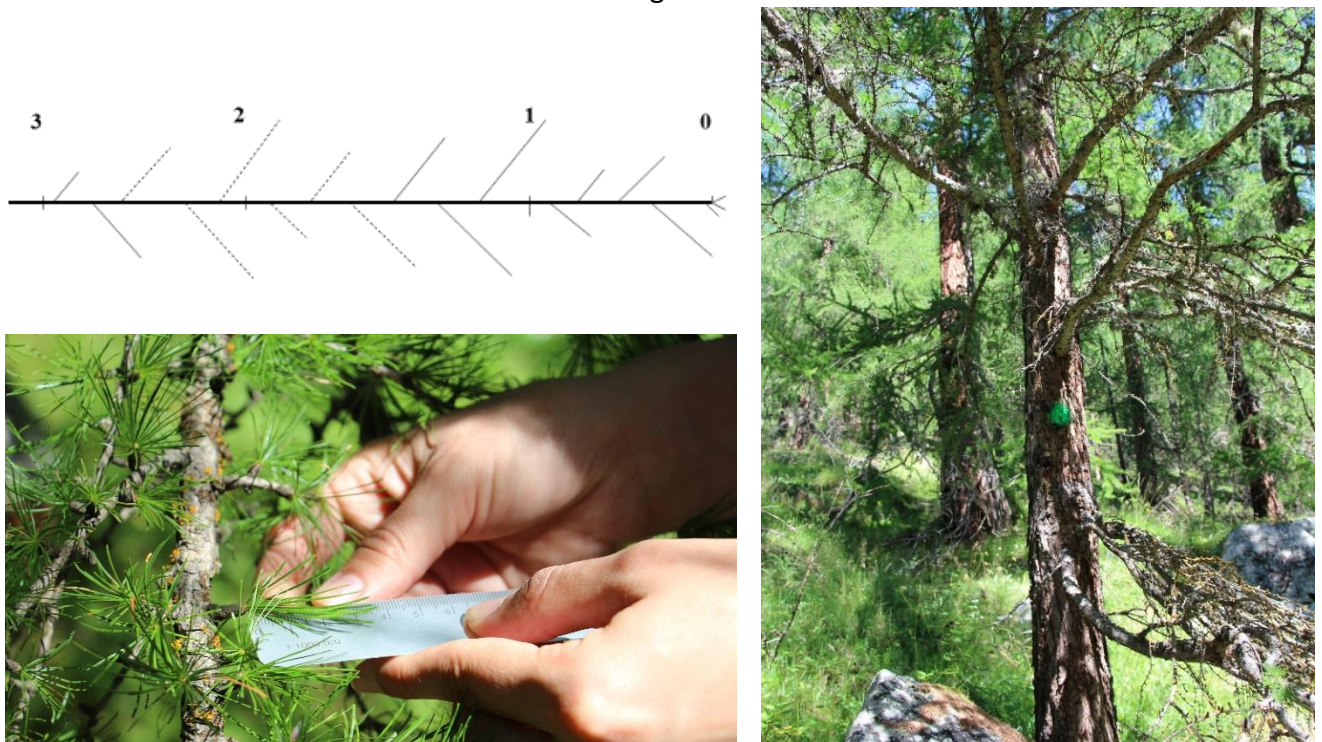


Abb. 14 Oben links: Schematische Darstellung eines Lärchenzweigs, Quelle: Baltensweiler, 2008

Unten Links: Messen der Nadelbüschchen

Rechts: Grün markierte Lärche am Standort Sils Schadenherd

festgehalten. Nebst der Länge der Nadelbüschchen wurden zum Teil auch die Exposition, die Position ermittelt und unter Bemerkungen Baum- oder Astwechsel festgehalten. Diese Angaben sind aber nicht konstant über die Jahre aufgenommen worden. Gerade der Baumwechsel ist nur ungenügend dokumentiert, was die eindeutige Zuordnung der einzelnen Bäume zu den Messungen, vor allem beim Standort Brail praktisch unmöglich macht. Die Daten wurden bis 2003 in einem bestimmten Datenformular erhoben. Im Anhang sind ein originales Datenformular und ein aktuelles Datenformular abgebildet.

3.3.2 Digitalisierte Daten

Das Ziel ist es, alle Daten über die Messungen der Nadellängen in einem einheitlichen und vollständigen Datensatz abzulegen. Die bereits von Dr. Matthias Dobbertin digitalisierten Daten der Standorte Brail und Sils Schadenherd wurden kontrolliert und ergänzt. Die Daten der übrigen Standorte wurden von den originalen Datenprotokollen digitalisiert und geordnet. Die Kontrolle erfolgte mit multivariatem Sortieren, um Messfehler und Tippfehler zu korrigieren. Weiter erfolgte eine stichprobenartige, visuelle Überprüfung der digitalisierten Daten mit den originalen Datenprotokollen. Die Abb. 15 zeigt einen Ausschnitt des neu erstellten Datensatzes. Das Ziel war, möglichst alle Informationen der Datenformulare in den Datensatz integrieren zu können. Gerade Notizen und Bemerkungen über Baumwechsel und Frassschäden der Lärchenwickler können wichtige Zusatzinformationen liefern zu den eigentlichen Nadellängen liefern und damit in die Analyse miteinbezogen werden. Was die Angaben über die Position bedeuten, konnte nicht genau ermittelt werden. Wahrscheinlich gibt die Position Auskunft über die Lage des Astes, an welchem die Nadelbüschchen gemessen wurden. Dies konnte aber nicht definitiv eruiert werden. Viele der Zusatzinformationen wurden nicht kontinuierlich erhoben, sondern fehlen in den meisten Jahren. Für fehlende Werte wurde ein „NA“ eingesetzt, damit später die Statistik Software keine Probleme mit leeren Zellen hat. Die Bedeutungen der einzelnen Spalten werden in der Tab. 3 erklärt.

Site	Tree	Needlegroup	Height(a.s.L)	Exposition	Position	Year	DOY	Length(mm)	Remarks	Orig. Tree N	LBM Damage
Fluela	B1	1	1830	NA	3	1980	159	7	NA	NA	NA
Fluela	B1	2	1830	NA	3	1980	159	7	NA	NA	NA
Fluela	B1	3	1830	NA	3	1980	159	6	NA	NA	NA
Fluela	B1	5	1830	NA	3	1980	159	9	NA	NA	NA
Fluela	B1	6	1830	NA	3	1980	159	9	NA	NA	NA
Fluela	B1	4	1830	NA	3	1980	159	6	NA	NA	NA
Fluela	B2	1	1830	NA	3	1980	159	9	NA	NA	NA
Fluela	B2	2	1830	NA	3	1980	159	7	NA	NA	NA
Fluela	B2	3	1830	NA	3	1980	159	5	NA	NA	NA

Abb. 15 Struktur der digitalisierten Daten

Tab. 3 Bedeutung der Spalten des Datensatzes

Site	Standort der Messung
Tree	Baumnummer gemäss der Nummerierung von Baltensweiler 2003
Needlegroup	Nadelbüschchen: 1-3 proximal, 4-6 distal
Height	Höhe des Standortes über Meer, Durchschnittlicher Wert
Exposition	Exposition des gemessenen Astes
Position	Bedeutung dieses Parameters ist unklar
Year	Jahr der Messung
DOY	Tag des Jahres
Length	Länge der Nadeln in [mm]
Remarks	Allgemeine Bemerkungen über Baumwechsel, Astwechsel usw.
Original Tree Number	Ursprüngliche Baumnummer (Datenformular)
LBM Damage	Informationen über die Stärke der Frassschäden in Lärchenwicklerjahren

3.3.3 Logistisches Wachstumsmodell

Um die Daten der Nadellängen analysieren zu können, müssen sie in eine homogene Struktur gebracht werden. Die Nadeln wurden nicht jedes Jahr am gleichen Tag gemessen, da der Anfang der Vegetationsperiode nicht bekannt und auch das maximale Nadelwachstum nicht für jedes Jahr vorhanden ist. Das bedeutet, dass die Daten nicht direkt mit einander verglichen werden können. Ein Blick auf die Verteilung der Daten zeigt, dass ein lineares Model nicht

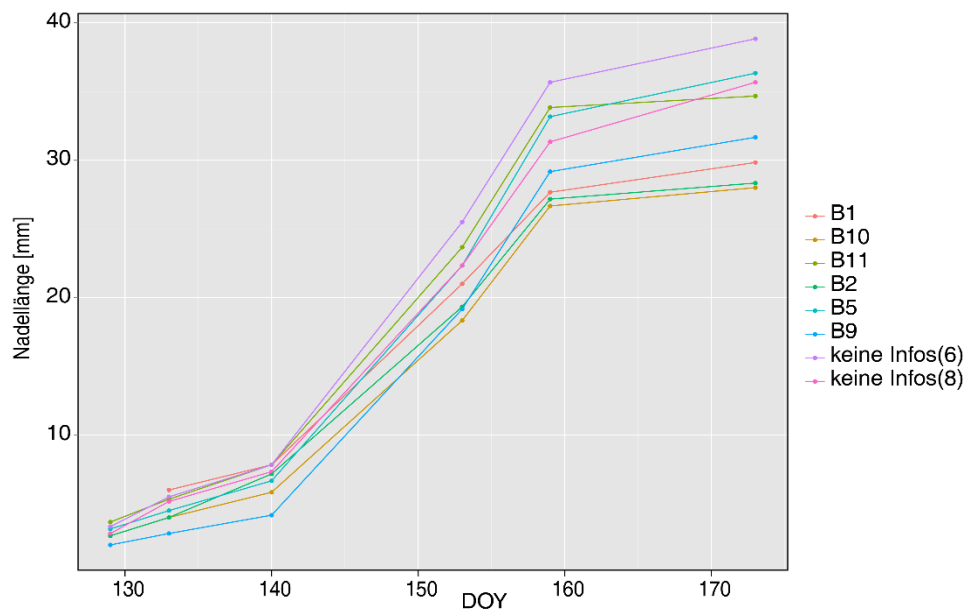


Abb. 16 Geplottete Nadellängen von Brail 1978.

geeignet ist, um die Nadellängen zu modellieren. Besser passt ein nicht lineares Regressionsmodell. Wie schon im Kapitel 2.5 erklärt, gibt es verschiedenen Typen von Wachstumsmodellen. Für die hierverwendeten Daten eignet sich am besten eine logistische Wachstumsfunktion.

Die Differentialgleichung hat folgende Form:

$$Y = \frac{a}{1 + e^{(b-x)/c}}$$

Das hierverwendete Wachstumsmodell wurde mit Hilfe des R Package „stats“ und der Funktion „nls“ erstellt (R Development Core Team, 2008).

Die Parameter a , b und c haben folgende Bedeutung:

a = obere Asymptote → maximale Nadellänge

b = Wendepunkt der Kurve → Zeitpunkt des Erreichens der 50%- Nadellänge

c = Wachstumskonstante → Geschwindigkeit des Wachstums

Diese drei Parameter geben Auskunft über das Wachstum der Nadeln. Der Parameter a für die maximale Nadellänge, b steht für den Tag, an welchem der Wendepunkt der Wachstumsfunktion (Zeitpunkt des Erreichens der 50%- Nadellänge) erreicht ist und c gibt an, wie schnell die Nadeln wachsen. Die Parameter müssen in einem ersten Schritt geschätzt werden, damit das Modell weiss, in welchem Zahlenbereich die Parameter etwa liegen. Dies erleichtert dem Modell den Start der Berechnung. Als Startwerte wurden $a = 33$, $b = 149$ und $c = 9$ geschätzt. Ähnliche Werte hat auch Dobbertin (unpubl. 2010) angegeben. Das Modell wurde so automatisiert, dass für jedes Jahr und jeden Baum eines Standortes die modellierten Parameter a , b , c und einige Zusatzwerte R^2 und JUNI ausgegeben werden. Die Anzahl der Iterationen wurde auf 500 beschränkt. Wenn das Modell nach 500 Iterationen keine Annäherung finden kann, wird ein NA-Wert ausgegeben. Für den Zeitraum (1972-1985) mit Lärchenwicklerausbrüchen wurden die Messungen über die Nadellängen beim Wiederaustrieb ausgeschlossen. Das bedeutet, dass alle Messungen nach dem 200. Tag im Jahr nicht in die Modellierung miteinbezogen wurden. Das Wachstumsmodell ist nicht dafür ausgerichtet, dass nach der maximalen Nadellänge wieder abnehmende Werte folgen. An welchen Nadelbüschchen die Messungen durchgeführt wurden, also ob proximal oder distal, wurde nicht unterschieden. Die Auswertung zeigte, dass sich die Längen der einzelnen Büschchen zwar ziemlich stark unterscheiden können, es aber keine Anhaltspunkte gibt, dass sich die Längen der proximal gemessenen Büschchen generell von der Länge der proximal gemessenen Büschchen unterscheiden.

Die Abb. 17 zeigt die modellierten Wachstumskurven für die Lärche mit der Nummer 1 von Brail in den Jahren 1978 (rot) und 1998 (blau). Die Punkte entsprechend sind die gemessenen Nadellängen und die Linien stellen die modellierten Werte dar. Die maximalen Nadellängen unterscheiden sich nur wenig in den beiden Jahren. Jedoch wird deutlich durch die steilere Kurve gezeigt, dass das Wachstum viel schneller erfolgte im Jahr 1998 als 1978. Weiter ist erkennbar, zu welchem Zeitpunkt die 50%- Nadellänge erreicht ist. Wobei natürlich auch beachtet werden muss, dass das Erreichen der 50%- Nadellänge automatisch früher ist, wenn die maximale Länge kürzer ist. Die modellierten Parameter können also nicht isoliert analysiert werden, sondern müssen immer im Kontext mit den anderen betrachtet werden. Es darf nicht

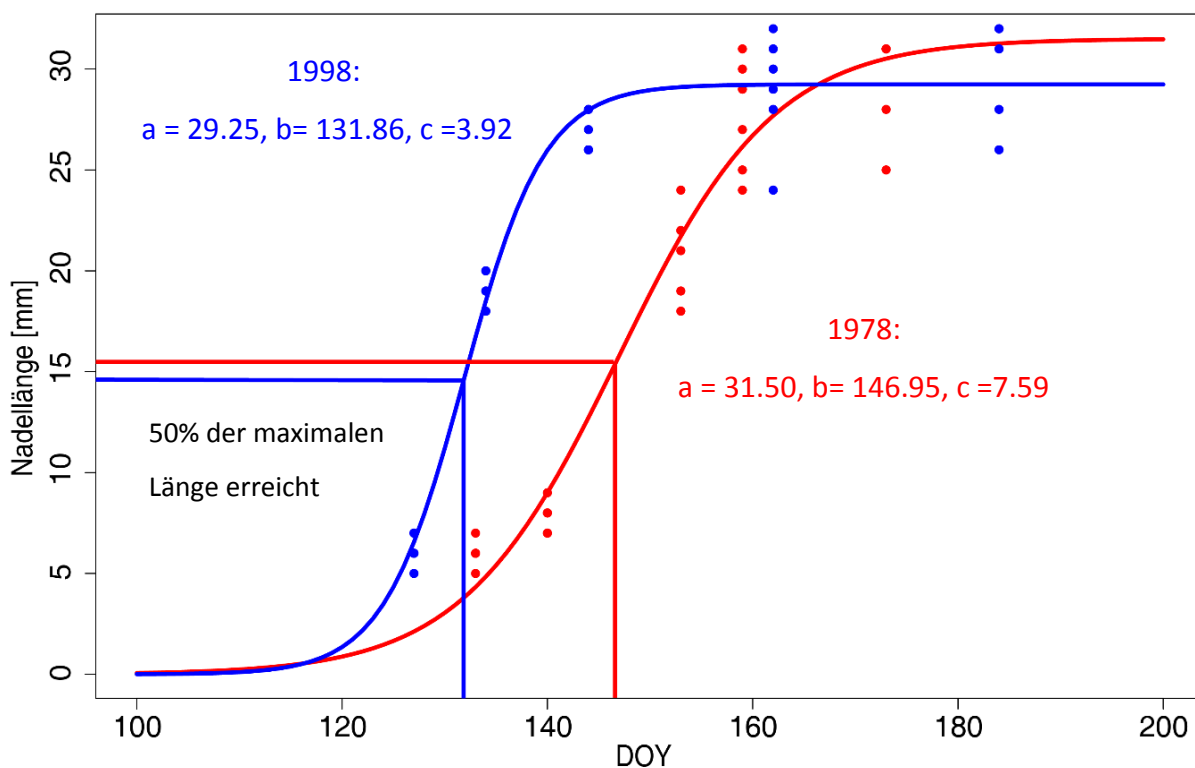


Abb. 17 Beispiel einer modellierten Wachstumskurve des Nadelwachstums für Brail Baum 1 1978 (rot) und Brail Baum 1 1998 (blau).

vergessen werden, dass die Parameter mit Hilfe eines Modells berechnet wurden und daher nur eine Annäherung an den tatsächlichen Verlauf der Wachstums liefern. Um aber einen Anhaltspunkt zu haben, wie gut das Modell die Messwerte annähert, wurden das Bestimmtheitsmass (R^2) berechnet, mit welchen die Güte der Modelle beurteilt werden kann.

Güte des Wachstumsmodels

Die Beurteilung der Güte eines Wachstumsmodells darf aber nicht, wie bei einer linearen Regression, nur über Bestimmtheitsmass (R^2) erfolgen. Das R^2 kann Wert zwischen 0 und 1 annehmen. Bei einer perfekten Annäherung hat das R^2 den Wert 1. (Quelle) Da die Beurteilung

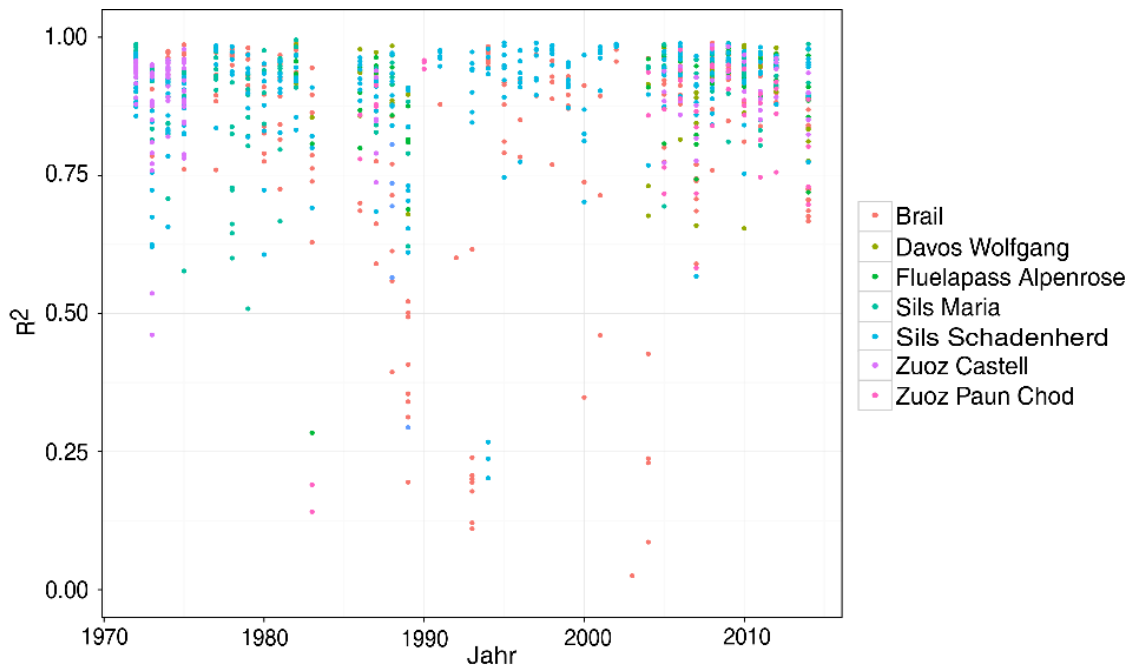


Abb. 18 Verteilung der Bestimmtheitsmasse nach Standorte und Jahre.

von nicht linearen Modellen einige Unsicherheiten und Schwierigkeiten birgt, wird zusätzlich zum R^2 manuell per Stichprobe untersucht, in welchen Situationen das Modell keine oder eine nur ungenügende Annäherung findet.

Die Abb. 18 zeigt die Verteilung der R^2 über die Zeit. Es gibt keinen eindeutigen Trend, dass Daten von bestimmten Jahren oder Standorten besser durch das Modell angenähert werden können als andere. Grundsätzlich gilt aber umso kleiner die Datenmenge (wenige Messungen über das Jahr), desto schlechter die Annäherung des Modells.

NA-Werte und kleines Bestimmtheitsmass

Um zu überprüfen, in welchen Situationen das Model keine Parameter berechnen kann, wurden zufällige Jahre mit NA-Werten ausgewählt und geschaut, was die Gründe für den Abbruch des Modells sein könnten. Abb.18 zeigt die Nadellängen von Baum 13 (1973) in Sils Schadenherd. Die Daten sind annähernd exponentiell verteilt und lassen sich nicht durch einen sigmoide Kurve annähern. Als Resultat wurde ein NA ausgegeben. Abb. 19 zeigt die modellierte

Wachstumskurve (Linie) mit den gemessenen Werten (Punkte) von Baum 5 (1994) in Sils Schadenherd. Das R^2 beträgt 0.27 und ist somit relativ klein. Die rot markierten Messungen können nicht angenähert werden und dementsprechend klein ist das R^2 . Insgesamt konnte das Modell in 193 Fällen keine Annäherung finden. Die manuelle Analyse der NA-Werte und der kleinen R^2 helfen die Güte des Modells abzuschätzen. Gerade bei nicht linearen Modellen ist es wichtig sich nicht nur auf die statistischen Grössen zu verlassen.

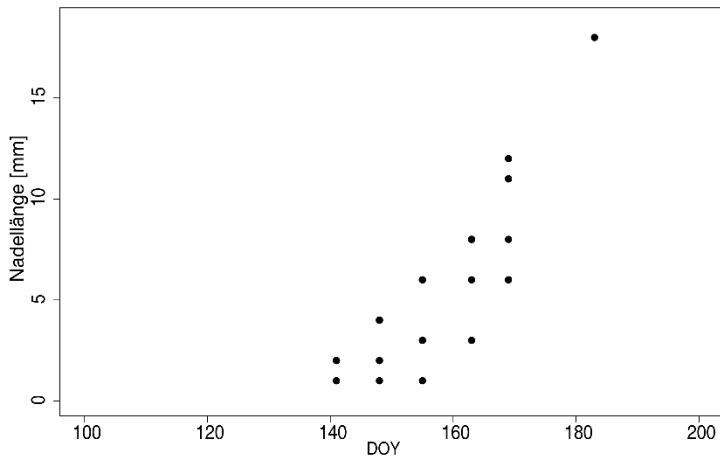


Abb. 18 Verteilung der Messwerte von Baum 13 (1973) in Sils Schadenherd.

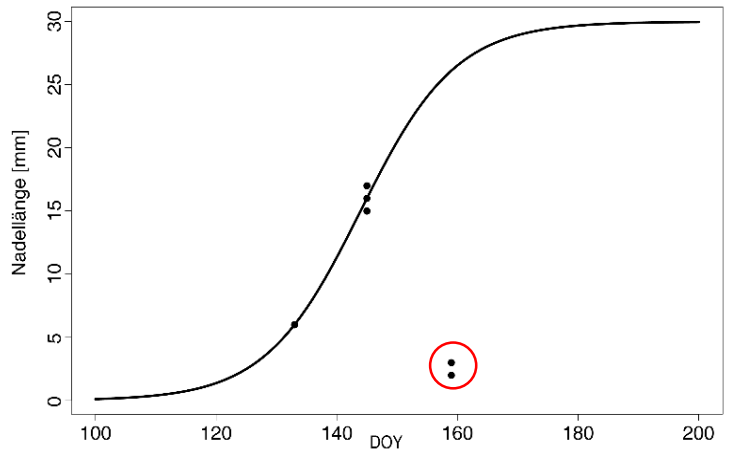


Abb. 19 Verteilung der Messwerte von Baum 5 (1994) in Sils Schadenherd.

3.4 Analyse der Jahrringbreiten

Um das Wachstum der Lärchen besser verstehen und analysieren zu können, ist es hilfreich Dendrodaten, genauer gesagt die Breite der Jahrringe, miteinzubeziehen. Über das Dickenwachstum von Bäumen wurden schon etliche Studien veröffentlicht und es sind zahlreiche Methoden zur Datengewinnung und Analyse vorhanden. Einige davon werden hier vorgestellt.

3.4.1 Definitionen

Dendrochronologie

1. (sensu lato) Methode, mit der die jährlichen Zuwachsraten von Gehölzen datiert werden können. Aus Jahrringen lassen sich frühere Umweltbedingungen rekonstruieren und Hölzer aus historischen und archäologischen Kontexten datieren.
2. (sensu stricto) Sie umfasst alle Teilgebiete, die Hölzer zur Datierung verwenden, z. B. die Dendroarchäologie. Sie ist in diesem Fall ein Teilgebiet von (1).

(Kaennel & Schweingrueber 1995)

Dendroökologie

Die Dendroökologie umfasst alle Teilgebiete der Dendrochronologie, die Umweltinformationen aus den Jahrringen herauslesen. Zu diesen Teilgebieten gehören:

- Dendroklimatologie
- Dendrohydrologie
- Dendrogeomorphologie
- Dendroglaziologie
- Dendrochemie

Kaennel & Schweingrueber 1995)

Dendroklimatologie

Die Dendroklimatologie ist ein Teilgebiet der Dendroökologie und befasst sich mit der Rekonstruktion des Klimas anhand datierter Jahrringe.

(Kaennel & Schweingrueber 1995)

3.4.2 Grundlagen der Dendrochronologie

Die Dendrochronologie basiert auf der Tatsache, dass in vielen mehrjährigen Pflanzen, vor allem in Bäumen und Sträucher, Jahrringe im Stammquerschnitt ersichtlich sind. Das Wachstum von Bäumen ist durch Höhen- und Breitenwachstum charakterisiert und ist das Ergebnis von Zellaktivitäten in meristematischem Gewebe. Meristematische Zellen sind teilungsfähig und

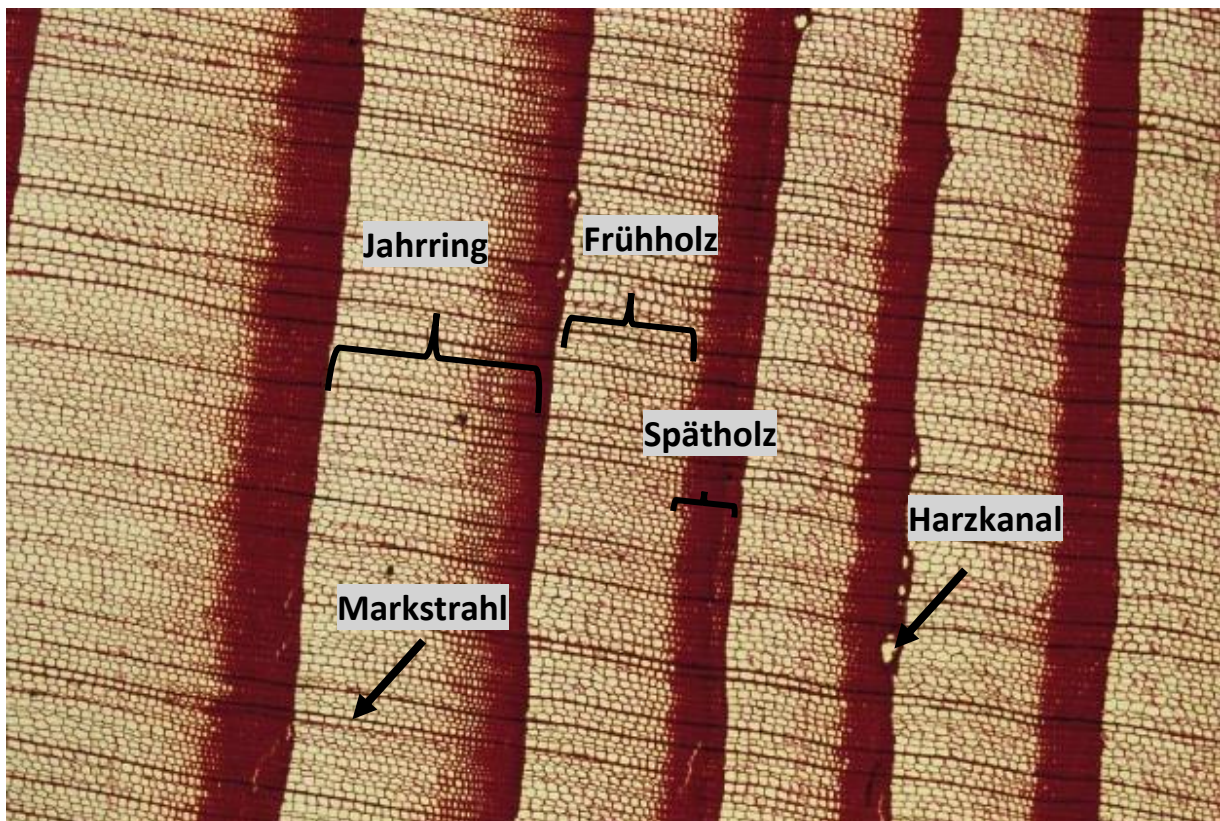


Abb. 19 Dünnschnitt eines Lärchenbohrkerns mit den typischen Merkmalen. Quelle: WSL Info

det. Die Zellwände des Spätholzes sind dicker als die Zellwände des Frühholzes und erscheinen dadurch dunkler. Daher sind die Jahrringe in den Nadelbäumen gut ersichtlich und meist bereits ohne Mikroskop zu erkennen. Die Grenze zwischen zwei Jahrringen bildet der scharfe Übergang zwischen den zuletzt gebildeten Spätholzzellen und den ersten Frühholzzellen der

neuen Vegetationsperiode. Nebst den Jahrringen sind im Querschnitt Markstrahlen und Harzkanäle zu erkennen. Mit Hilfe dieser holzanatomischen Merkmale kann die Spezies bestimmt werden.

3.4.3 Prinzipien der Dendrochronologie

Ein Jahrring pro Jahr

Baumarten, welche zum Datieren verwendet werden, dürfen nur einen Jahrring pro Jahr ausbilden. Arten, welche mehrere Ringe pro Jahr ausbilden, können nicht zu Datierungszwecken genutzt werden. Bäume in tropischen Gebieten und in Mittelmeerraum bilden oft nicht nur ein Jahrring pro Jahr aus. Das saisonale Klima ist nicht so ausgeprägt wie in gemässigten Breiten und die Jahrringe werden nicht konsequent nur jedes Jahr ausgebildet (Cherubini et al. 2003).

Uniformitätsprinzip

Das Uniformitätsprinzip besagt, dass die Beziehung zwischen Umweltfaktor und Baumwachstum über die Jahre konstant bleiben muss. Das bedeutet, dass gleiche limitierende Faktoren die gleichen Prozesse auf die gleiche Weise beeinflussen. Wassermangel hat auch in der Vergangenheit einen schmaleren Jahrring zur Folge. Würde sich die Reaktion des Baumes auf das Klima grundlegend ändern, könnten mit der Analyse von Jahrringbreiten keine Klimarekonstruktionen gemacht werden. Es muss aber beachtet werden, dass sich eine Art über die Jahrtausende an gewisse Umweltbedingungen anpassen kann und über die Zeit allenfalls weniger sensitiv reagiert (Fritts 1976).

Prinzip des limitierenden Faktors

Die Jahrringbreite wird durch verschiedene umwelt- aber auch genetische Faktoren beeinflusst. Zu den Umweltfaktoren gehören die Temperatur, der Niederschlag und aber auch die Lichtverhältnisse. Der limitierende Faktor ist jener, der die Jahrringbreiten entscheidend beeinflusst. Im den Hochlagen im Engadin ist der limitierende Faktor z. B. die Temperatur. Der Genpool eines Individuums entscheidet über die Reaktion auf die vorherrschenden Umweltbedingungen. Einige Individuen oder Arten reagieren stärker, andere weniger stark. Der limitierende Faktor kann auch über das Jahr hinweg wechseln. In Frühling ist meist die Tem-

peratur ausschlaggebend für den Beginn des Wachstums. Im Sommer hingegen ist es die Wasserversorgung und im Herbst wiederum die Temperatur. Aber auch plötzliche Verbesserungen der Lichtverhältnisse, z. B. durch das Abholzen oder Umkippen eines Nachbarbaumes, können einen Wechsel des limitierenden Faktors zur Folge haben. Die Intensität dieser wachstumslimitierenden Faktoren muss sich jedes Jahr ändern, damit eine Veränderung in den Jahrringbreiten ersichtlich wird. Die Jahrringbreite muss nicht direkt proportional zum limitierenden Faktor sein. Trockene Jahre sollten in den meisten Fällen engere Jahrringe aufweisen als niederschlagsreiche Jahre. Diese Abfolge von weiten und engen Ringen macht das Crossdating, d. h. die zeitliche Einordnung dieser Jahre, möglich. Um allgemeingültige Chronologien entwickeln zu können, müssen die limitierenden Faktoren über ein grösseres Gebiet und über mehrere Arten wirken. Ist dies nicht der Fall, muss für jedes Untersuchungsgebiet eine eigne Chronologie erstellt werden (Fritts 1976).

Das Konzept der ökologischen Amplitude

Jede Art hat ihre eigene ökologische Amplitude. Die ökologische Amplitude ist der Bereich in dem eine bestimmte Spezies entsprechend ihrer ökologischen Potenz gegenüber einem bestimmten Umweltfaktor existenzfähig ist. Im Optimalbereich ist die Vitalität maximal, daran schliessen sich nach oben und unten suboptimale Vitalitätsbereiche an, innerhalb deren eine Art noch überleben kann (Spektrum, Biologisches Lexikon). Für die Dendroklimatologie sind Standorte geeignet, an welchen die zu untersuchende Spezies in suboptimalen Vitalitätsbereichen wächst. An diesen Standorten reagiert die Spezies auf eine Variabilität des limitierenden Faktors. Wenn hingegen Bäume an einem für sie im Optimalbereich liegenden Standort wachsen, wirken sich Temperaturschwankungen nur wenig auf die Jahrringbreiten aus und eine Klimarekonstruktion anhand der Jahrringbreiten ist nicht möglich. In diesem Fall weisen die Jahrringbreiten über die Jahre nur wenig Variabilität auf. Für den Baum ist dies sicher optimal, aber um die Jahrringe zu datieren jedoch unbrauchbar.

Wahl des Standortes

Die Wahl des Standortes und der Art sind entscheidend für den Erfolg der Analyse. Nicht alle Standorte eignen sich gleich gut, um eine Jahrringanalyse durchzuführen. Die Wahl des Standortes hängt stark von der Fragestellung der Forschung ab. Es gibt aber noch weitere Einschränkungen, wie der Zugang zum Standort oder fehlende Bohrbewilligungen (z.B. in Nationalparks), welche die Wahl des Standortes beeinflussen können. Grundsätzlich wird aber der

Standort nach dem limitierenden Faktor, der für die Studie interessant ist, ausgewählt. Um Temperaturverhältnisse zu rekonstruieren, eignen sich besonders in suboptimalen Vitalitätsbereichen, z.B. an der Waldgrenze im Gebirge.

Sensitivität

Sensitivität, im dendroökologischen Sinne, ist das Ausmass, in welchem Jahrringmerkmale von Jahr zu Jahr auf Umweltfaktoren reagieren. Eine Jahrringfolge die starke Variationen aufweist, wird als sensitiv bezeichnet (Kaennel&Schweingrueber 1995). Durch genetische Unterschiede zwischen den Individuen können Bäume innerhalb einer Art unterschiedlich stark auf Umweltfaktoren reagieren.

Crossdating

Anpassung der Variationen von Jahrringbreiten oder anderen Jahrringmerkmalen zwischen Bäumen. Dies erlaubt die exakte Bestimmung des Entstehungsjahres eines jeden Jahrrings oder der Herkunft der Bäume (Treibholz, Holztransport, usw.)(Kaennel & Schweingrueber 1995).

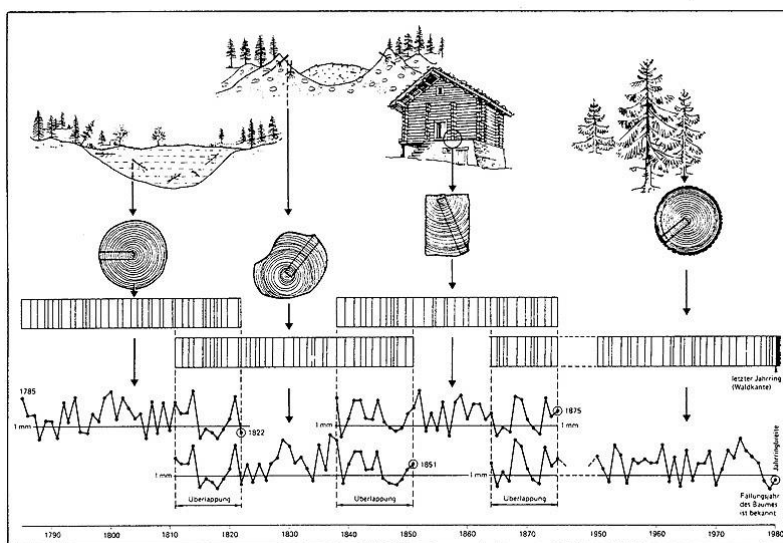


Abb. 20 Schematische Darstellung des Crossdatings, Quelle: Schweingrueber 1988

Das Crossdating ist ein wichtiger Schritt in der Dendrochronologie. Die Muster der gemessenen Jahrringbreitenkurven werden dabei mit anderen Messungen und Chronologien des gleichen Gebietes und der gleichen Baumart verglichen. Nur so können die Jahrringe den entsprechenden Jahren zugeordnet werden. Die Abb. 20 zeigt, wie Daten verschiedener Herkunft verwendet werden können, um eine Chronologie aufzubauen. Bei Daten von lebenden Bäumen ist das Jahr der Bohrung bekannt und der letzte Jahrring kann einem Jahr zugeordnet werden. Bei Daten von Totholz werden die Muster der Jahrringbreiten mit bereits datierten Kurven verglichen und nach Überlappungen gesucht. Bei einer Überlappung von 30 Jahren können meistens die Jahrringe datiert werden. Es ist nicht der absolute

Wert der Jahrringbreiten der entscheidend ist, sondern das Muster aus der Abfolge von schmalen und breiten Jahrringen, welche wie ein Fingerabdruck sind für einen bestimmten Region sind, und deren spezifischen Umwelteinflüssen widerspiegeln. Diese Abfolge wird beim Crossdating statistische überprüft(Fritts 1976).

Fehlende Jahrringe

Ein Baum bildet seine Jahrringe nicht über den ganzen Stamm gleichmässig aus. Aus diesem Grund werden auch immer zwei Proben pro Baum gemacht. In einem trockenen Jahr bildet sich nur ein dünner Jahrring und zwar auf der Seite des Stammquerschnittes, wo der Baum das Wachstum am dringendsten benötigt. An einigen Stellen des Stammquerschnitts ist der Ring dann nur sehr schlecht oder gar nicht zu erkennen. Beim Vergleichen der A und B Probe eines Baumes können diese fehlenden Ringe entdeckt und eingefügt werden.

Falsche Jahrringe

Eine weitere Komplikation beim Crossdating können falsche oder doppelte Ringe sein. Damit sind Jahrringe gemeint, welche zwar auf den ersten Blick aussehen wie reguläre Jahrringe, aber in Wirklichkeit sind es spätholzartige Zellen innerhalb des Frühholzes. Diese können durch Trockenheit in der Vegetationsperiode gebildet werden. Es wird unterschieden zwischen interannueller Dichteschwankung und falscher Jahrringe unterschieden. Interannuelle Dichteschwankungen sind aufgrund ihrer unscharfen Grenzen leicht erkennbar. Falsche Jahrringe sind hingegen nur durch das Crossdating zu erkennen (Schweingruber 1996; Stokes & Smiley 1968).

Repetition

Die Messungen der Jahrringbreiten müssen an mehreren Bäumen pro Standort durchgeführt werden, um aussagekräftige Informationen über den Einfluss des Klimas zu gewinnen. Jeder einzelne Baum weist individuelle Variabilität auf, welche oft durch genetische Faktoren oder auch durch Bildung von Zug- oder Druckholz zu erklären sind. Das Entnehmen von mehr als einem Bohrkern pro Baum erlaubt den statistischen Vergleich individueller Variabilität, welche durch das Mitteln der Proben gedämpft werden kann. Um die Variabilität der einzelnen Bäume eines Standortes zu minimieren, werden die Jahrringbreiten von mehreren Bäumen eines Standortes gemittelt. Dadurch wird der Einfluss des Klimas auf die Bäume besser ersichtlich. Die Anzahl Bäume variiert auch durch die Stärke des Einflussfaktors Klima. Bei grossem

Einfluss, zeigen praktisch alle Bäume ähnliche Muster von breiten und schmalen Jahrringen und das Crossdating ist einfach durchzuführen, die Anzahl nötiger Untersuchungsbäume ist kleiner (Fritts 1976).

Standardisierung

Die Standardisierung ist wie auch das Crossdating eine grundlegende Methode. Die Jahrringbreite ist nicht nur abhängig von Umweltfaktoren, sondern auch vom Alter des Baumes, der Höhe innerhalb des Stammes und Bedingungen und Produktivität des Standortes. Bei einer Studie über den Einfluss des Klimas auf die Jahrringbreiten ist es oft nötig, dass die Variabilität, welche durch das Alter des Baumes hervorgerufen wird, geschätzt und aus den Messungen entfernt wird. Die Jahrringe werden mit zunehmendem Alter des Baumes tendenziell schmaler, weil der Durchmesser des Stammes zunimmt und der Baum, um das gleiche Wachstum zu generieren, immer mehr investieren muss. Die Hilfe von Standardisierungsmethoden, welche in vielen Dendrochronologie Software standardmässig vorprogrammiert ist, können diese systematischen Änderungen aus den Messungen entfernt werden (Fritts 1976).

3.4.4 Europäische Lärche (*Larix decidua* Mill.)

Die *Larix decidua* Mill. gehört zu der Familie der Kieferngewächse und ist in Europa heimisch. Die europäische Lärche wächst vor allem in den Alpen und einigen wenigen Gebieten in Osteuropa. Sie kann bis zu 50 Meter hoch und in subalpinen Lagen über 1000 Jahre alt werden. Im Winter verträgt sie Temperaturen von -40°C . Die Nadeln wachsen in Nadelbüscheln mit 8-10 Nadeln. Diese verfärben sich im Herbst gelb-rötlich und fallen ab. Im Frühling spriessen neue Nadeln, welche sich über den ganzen Baum verteilt simultan entwickeln.

An der Waldgrenze bildet die Lärche Mischbestände mit der Arve und in tieferen Lagen mit der Waldföhre. An der Waldgrenze gilt sie als Pionierpflanze und kann auf Moränenablagerungen aus Kalk- und Silikat Gesteinen wachsen. Die Nährstoffansprüche sind dementsprechend gering. Auch die Wasseransprüche sind nicht hoch. Lärchen wachsen an trockenen Standorten und sogar auf Kalkrendzina. Durch das breite ökologische Spektrum, die klar abgegrenzten Jahrringe und die hohe Sensitivität ist die Lärche gut geeignet für die Jahrringbreitenanalyse, bietet aber auch einige Schwierigkeiten durch die Lärchenwicklerjahre (Schweingruber 1993).



Abb. 21 Gelbverfärbte Lärchen in Sils Schadenherd

In den Alpen wurden die Lärchen während etwa 2000 Jahren alle 8-9 Jahren vom Lärchenwickler befallen. Die heutigen Bestände sind stark durch jahrhundertelange Beeinflussung des Menschen geprägt. Die schattenverträglichere Arve hätte die lichthungrige Lärche während der natürlichen Waldsukzession verdrängt. Die Arven und Fichten wurden allerdings vermehrt geschlagen, als die Alpwirtschaft an Bedeutung gewann und in den lichtdurchfluteten Lärchenwäldern die Weidewirtschaft zunahm. Heute verliert die Alpwirtschaft nach und nach an Bedeutung und Zirbelkiefern vermehren sich erneut unter dem lichten Kronendach der Lärchenbestände (Battipaglia et al. 2014b).

3.4.5 Bohrkerne ziehen

Es ist von Vorteil, die Bohrkerne genau an den Lärchen zu ziehen, an welchen auch die Nadelmessungen erfolgen. Dies ist jedoch nicht ganz einfach, da die Nummerierung der gemessenen Lärchen im Verlauf der Jahre geändert wurde. Die Beprobung der Lärchen erfolgte nach der Nummerierung von Baltensweiler 2004. Vor der Feldarbeit wurde für jeden Standort beim zuständigen Förster eine Bewilligung eingeholt.

Die Bohrkerne werden mit Hilfe eines Zuwachsbohrers gezogen. Dabei wird dem Baum ein etwa 5mm breiter Bohrkern entnommen. Das kleine Loch, das zurück bleibt, verschliesst der Baum sofort mit Harz, um zu verhindern, dass Pilze und Bakterien eindringen können. Der Bohrer wird im rechten Winkel zum Stamm auf die Rinde gesetzt. Dann wird im Uhrzeigersinn gedreht, bis die Mitte des Baumes erreicht ist. Dies kann mit Hilfe der Nadel kontrolliert werden. Weiter ist von Vorteil, das Mark des Baumes zu treffen. Damit möglichst alle Jahrringe auf dem Bohrkern vorhanden sind. Wenn die Mitte des Baumes erreicht ist, wird die Nadel in den Bohrer geschoben und eine ganze Drehung zurückgedreht. Nun kann die Nadel mit dem Bohrkern aus dem Bohrer gezogen werden. Der frische Bohrkern wird beschriftet und in eine Plastikhülle oder Strohalm geschoben. Um zu vermeiden, dass Reaktionsholz die Jahrringbreiten verfälscht, werden die Bohrkerne auf der Seite des Stammes entnommen, welcher nicht durch Hangprozesse beeinflusst wird. Reaktionsholz entsteht, wenn ein Baum durch ein Ereignis, wie z. B. eine Lawine oder ein Erdbeben schräg gestellt wird. Ein Baum muss sich, um nicht gänzlich umzukippen, in den folgenden Jahren wieder aufrichten. Bei Nadelbäumen wie der Lärche wird Druckholz gebildet, d. h. die Lärche wird wieder in die Vertikale gedrückt. Laubbäume hingegen bilden Zugholz aus, welches den Baum wieder in die Vertikale zieht. In dieser Arbeit spielen solche Ereignisse nur eine sekundäre Rolle, weil der Fokus beim Wachstum, beeinflusst durch Klima und nicht durch geomorphologische Prozesse, liegt. Daher wurden die Bohrkerne jeweils in einem rechten Winkel zur Hangneigung gezogen. Um fehlende Jahrringe oder auskeilende Jahrringe besser zu erkennen und die Genauigkeit des Datierens zu erhöhen, wurden immer zwei Bohrkerne pro Untersuchungsbaum entnommen. Dies ist wichtig, da ein einzelner Baum je nach Ereignis seine Jahrringe nicht gleichmässig über den Querschnitt des Stammes ausbildet. Die Bohrungen wurden etwa auf Brusthöhe gezogen, um möglichst viele der Jahrringe sehen zu können. Nach der Feldarbeit muss der Bohrer unbedingt gereinigt und vom Harz befreit werden.

3.4.6 Bohrkerne aufbereiten

Bohrkerne aufkleben

Um die Jahrringbreiten messen zu können, müssen die Bohrkerne aufbereitet werden. Die Bohrkerne dürfen nicht zu lange in der Plastikhülle bleiben, da sie sonst beginnen zu schimmeln beginnen. Zur Aufbereitung werden die frischen Bohrkerne aus der Transporthülle (Trinkhalme) genommen und mit einem gewöhnlichen Holzleim auf kleine Hölzchen geklebt. Wichtig ist dabei, dass die Bohrkerne immer im rechten Winkel zur Faserrichtung geklebt werden, damit die Jahrringe später unter dem Mikroskop gut ersichtlich sind. Da sich die Faserrichtung entlang des Bohrkerns drehen kann, werden die Bohrkerne bei ändernder Faserrichtung gebrochen und die Teilstücke separat aufgeklebt. Die Bohrkerne können auch schon beim Bohren auseinander gebrochen sein. Es ist daher sinnvoll, die zu einander gehörenden Enden gerade am Standort zu markieren, um ein kniffliges Puzzle beim Aufkleben zu verhindern. Die Bohrkerne werden mit einem eindeutigen Code gekennzeichnet, um auch hier Verwechslungen auszuschließen.

Bohrkerne schleifen

Die getrockneten Bohrkerne werden in einem nächsten Schritt mit der Schleifmaschine geschliffen. Zuerst mit einem groben Schleifpapier (Körnung 180) und in einem zweiten Durchgang mit einem feineren (Körnung 240). Wichtig ist, dass die Bohrkerne nicht zu stark auf das Schleifpapier gedrückt werden, da die Oberfläche der Bohrkerne sonst verbrennen kann und die Jahrringe nicht mehr gut zu erkennen sind. Nach dem Schleifen sind die Bohrkerne messbereit.

3.4.7 Jahrringbreiten messen

Die Jahrringbreiten wurden mit Hilfe eines Mikroskops, eines Lintab Messtisches und der Software WinTsap gemessen. In einem ersten Schritt erfolgt das optische Zählen der Jahrringe. Es wird jeweils bei 10er Jahren (2010, 1990, 1980 usw.) ein Punkt, bei der 50er Jahren (1950) zwei Punkte und bei 100er Jahren (2000, 1900) drei Punkte gesetzt. Dadurch bekommt die Messperson einen Überblick über die Jahrringe oder allenfalls fehlende Jahrringe des entsprechenden Bohrkerns. Zudem kann während dem eigentlichen Messen überprüft werden, ob kein



Abb. 22 Lintab Messtisch, Quelle www.rinntech.de

Jahr doppelt gemessen oder übersprungen wurde. In WinTsap werden nun die Voreinstellung gemacht. Wichtig ist, dass die richtigen Kalibrierungsoptionen geladen werden. Weiter wird angegeben in welche Richtung gemessen wird, im Allgemeinen von der Borke zum Mark. Meist ist das Jahr bekannt, in welchem die Bohrkerne gezogen wurden und daher auch das Jahr des letzten Jahrrings. Die Bohrkerne von Sils Schadenherd, Zuoz, Flüelapass Alpenrose und Brail wurden

im Oktober 2014 gezogen, nur die von Sils Maria und Davos Wolfgang im August 2015. Der Jahrring war aber im August noch nicht abgeschlossen und somit konnte der äusserste Ring nicht miteinbezogen werden. In einem nächsten Schritt wird der Bohrkern auf den Messtisch gelegt und das Mikroskop scharf gestellt. Das Nadelkreuz wird auf die Grenze des ersten Jahrrings nach der Borke justiert, und zwar so, dass das Nadelkreuz rechtwinklig zum Jahrring steht. An der Kurbel wird nun gedreht bis der nächste Jahrring erscheint. Per Klick mit der Maus wird die Distanz gemessen und abgespeichert. Dieser Vorgang wird nun bei jedem Jahrring bis zum Mark fortgeführt. Dadurch entsteht ein Kurvendiagramm mit den Breiten der einzelnen Jahrringe. Diese Messungen werden für jeden Bohrkern wiederholt. Unklare Jahrringe oder sonstige Auffälligkeiten wie Harzkanäle oder Dichteschwankungen werden notiert. Dies vereinfacht das spätere Crossdating.

3.4.8 Crossdating

Wie in dem Kapitel 3.4.3 beschrieben, ist das Crossdating ein wichtiger Schritt in der Dendrochronologie. Den einzelnen Jahrringen wird dabei das richtige Jahr zugeordnet und somit das Verwenden der Jahrringe zu Datierungszwecken ermöglicht. In den Jahrringen der Lärchen sind alle 8-9 Jahre einige sehr schmale Ringe zu finden. Diese sind auf die zyklisch auftretenden Lärchenwicklerausbrüche zurückzuführen.

Lärchenwicklerjahre

Insbesondere bei der hier untersuchten Baumart gibt es die sogenannten Lärchenwicklerjahre. Diese Jahrringe sind durch extrem dünnes Spätholz charakterisiert. Es ist möglich, dass auf einigen Borkernen die extrem dünnen Jahrringe auch unter dem Binokular nicht sichtbar sind. Durch das Crossdating der A und B Probe eines Baumes können diese Jahre ausfindig gemacht werden. Es ist aber auch möglich, dass bei beiden Proben der Jahrring fehlt. In diesem Fall ist es von Vorteil die Kurven mit den publizierten Lärchenwicklerjahren aus anderen Studien zu vergleichen (Baltensweiler et al. 2008; Esper et al. 2007; Weber 1997). Die Abb. 23 zeigt einen Dünnschnitt eines Bohrkerns. Deutlich sind die schmalen Lärchenwicklerjahre 1982 und 1973-1974 zu sehen. Auf normalen Bohrkernen hingegen ist es schwieriger den Jahrring zu erkennen. Das Crossdating wird dadurch zu einem extrem aufwändigen und schwierigen Prozess.

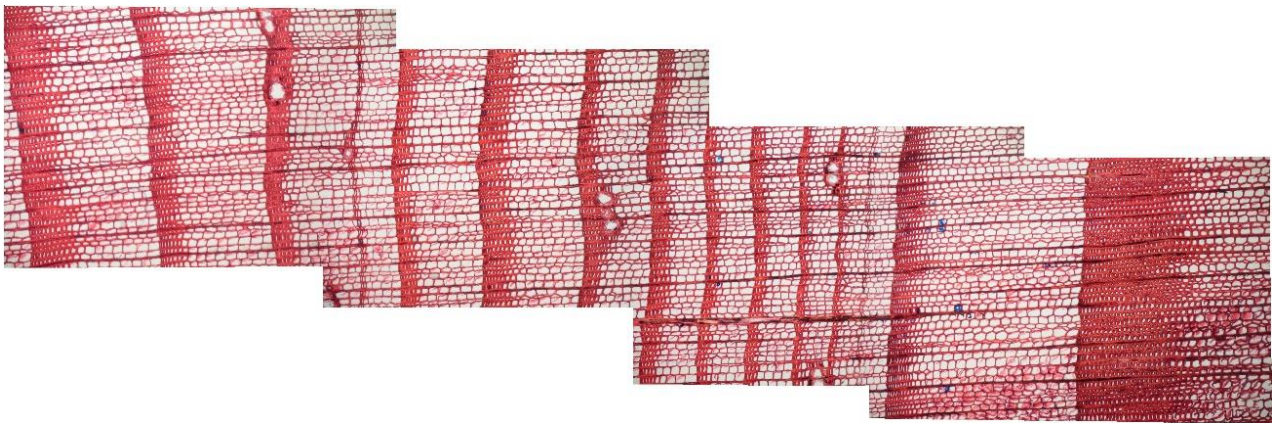


Abb. 23 Dünnschnitt Lärchen Bohrkern mit Lärchenwicklerjahren. Quelle: WSL

Je nachdem wie die Jahrringstruktur in den Lärchenwicklerjahren ausgebildet ist, kann auf den zeitlichen Ablauf der Entwicklung der Raupen geschlossen werden:

Im ersten Befallsmuster startet die Entwicklung der Raupen schon früh im Jahr. Das bedeutet, dass die Frassschäden schon das Wachstum des Frühholzes beeinflussen. Die Lärchen haben aber nach dem Verpuppen der Raupen noch genügend Zeit um neue Nadeln spriessen zu lassen. Durch die Wiederbelaubung können die Lärchen dennoch Nährstoffe speichern und das Wachstum kann sich im darauffolgenden Jahr bereits etwas erholen.

Beim zweiten Befallsmuster ist im ersten Befallsjahr nur das Spätholz betroffen. Die Entwicklung der Raupen verzögert sich durch ungünstige Witterungsverhältnisse. Den Lärchen bleibt

keine Zeit mehr um innerhalb der Vegetationsperiode neue Nadeln zu bilden und es können keine Nährstoffe gespeichert werden. Dieser Nährstoffmangel beeinflusst das Wachstum und somit die Bildung von Frühholz im folgenden Jahr.

Beim dritten Befallsmuster sind mehrere aufeinanderfolgende Jahrringe nur schwach ausgebildet oder fehlen ganz. Dies kommt von einem über mehrere Jahre stark auftretenden Lärchenwicklerbefall (Weber 1997).

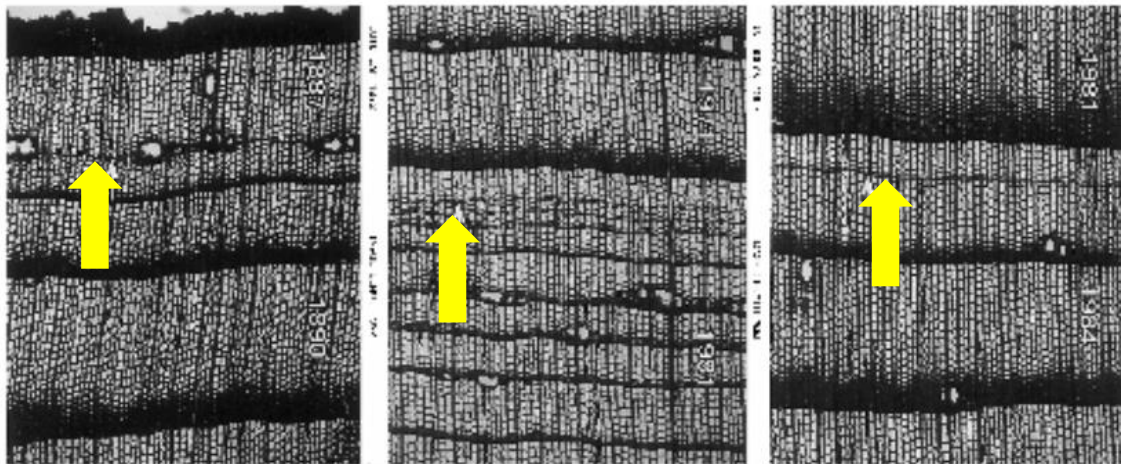


Abb. 24 Von links nach rechts: Befallsmuster 1-3, Quelle: Weber, 1997

Visuelles Crossdating

In einem ersten Schritt erfolgt das visuelle Crossdating der Jahrringe. Die Kurven werden übereinander gelegt und die Jahre werden verglichen. Fehlende Jahre oder Messfehler werden so schnell sichtbar. Mit TsapWin© Funktion MathGraph können die Kurven verschoben werden bis sie passen. Es können auch Jahrringe eingefügt oder gelöscht werden. Diese Änderungen müssen immer in den Bemerkungen festgehalten werden. Jahrringe, welche nicht sichtbar auf den Bohrkernen sind, werden mit dem hundertstel Millimeter Wert 1 und der Bemerkung „miss“ eingefügt.

Statistisches Crossdating

Nach dem visuellen Crossdating erfolgt das Crossdating mit Hilfe von statistischen Parametern. Die drei hier vorgestellten statistischen Kenngrößen übernehmen eine unterstützende Funktion beim Crossdating. Es ist aber wichtig, dass das Crossdating nicht nur über die statistischen Parameter erfolgt, da beide Teile einen wichtigen Beitrag zum erfolgreichen Datieren

beitragen. Es ist auch nicht sinnvoll einen minimalen Wert für die statistischen Grössen anzugeben.

Gleichläufigkeit (Glk)

Die Gleichläufigkeit ist ein Mass der Jahr-zu-Jahr Übereinstimmung zwischen den Intervall-Trends zweier Jahrringfolgen, üblicherweise ausgedrückt als Prozentsatz gleichlaufender Intervalle (Kaennel & Schweingruber 1995).

Die Gleichläufigkeit ist daher ein Mass für die Ähnlichkeit zweier Kurven. Wenn die Kurven innerhalb eines Intervalls in die gleiche Richtung zeigen, erhalten sie den Wert 1. Bei gegenläufigen Kurven den Wert 0. Daraus kann nun der Prozentsatz an gleichläufigen Intervallen einer Kurve berechnet werden, die Gleichläufigkeit.

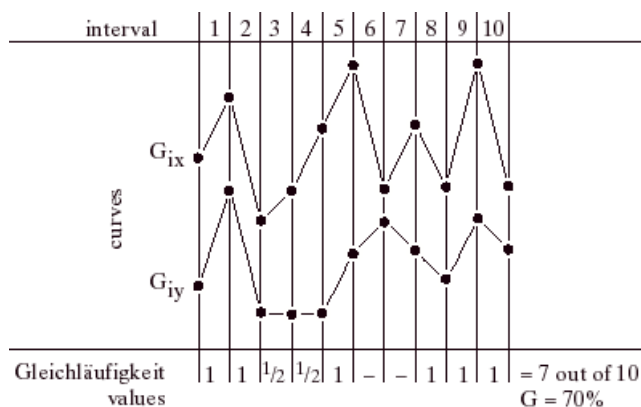


Abb. 25 Ein Beispiel zum Berechnen der Gleichläufigkeit, Quelle: Schweingruber, 1988

Cross Dating Index (CDI)

Der Cross Dating Index ist ein Datierungsindex, kombiniert aus dem t-Wert und der Gleichläufigkeit. Er kann einen maximalen Wert von 1000 annehmen.

$$CDI = \frac{(G - 50 + 50 * \sqrt{\frac{overlap}{max\ overlap}}) * T}{10}$$

$$G = \frac{Glk + _SGlk + S_Glk + SSGlk}{n}$$

$$T = \frac{TVBP + TVH}{2}$$

(n = number of operators in the numerator)

Der t-Wert wird berechnet aus dem t-Wert von Baillie-Pilcher (TVBP) und dem t-Wert von Hollstein (TVH).

Signifikanz der Gleichläufigkeit (GSL)

* = 95.0%	$50 + \frac{1.654 * 50}{\sqrt{n}}$
** = 99.0%	$50 + \frac{2.326 * 50}{\sqrt{n}}$
*** = 99.9%	$50 + \frac{3.09 * 50}{\sqrt{n}}$
	<i>n=Anzahl der Punkte</i>

Der GSL Wert zeigt auf welchem Signifikanzniveau die Gleichläufigkeit signifikant ist.

Resultate des Crossdatings

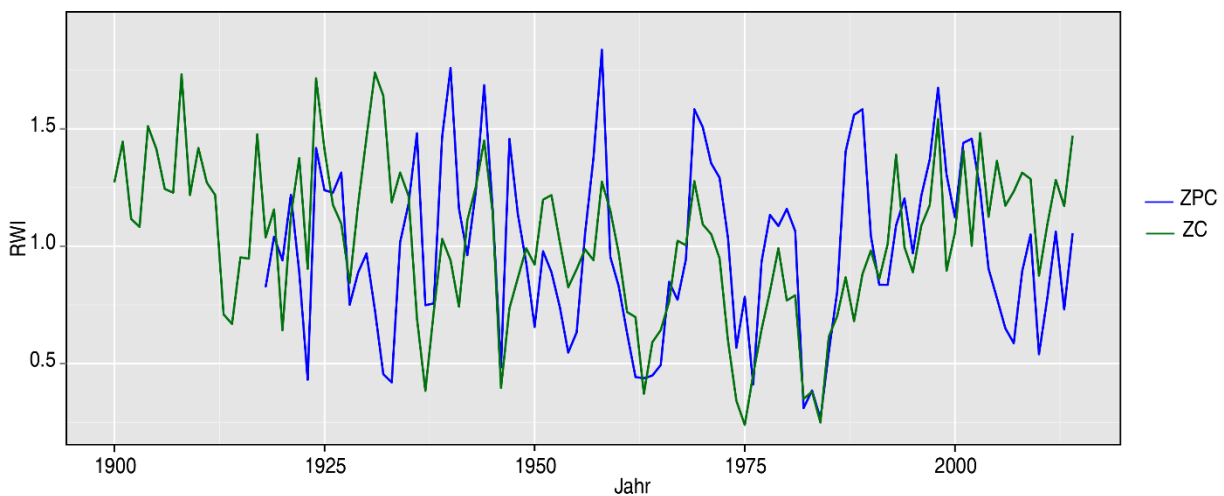
Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur an den Bäumen Bohrkernen genommen, an welchen auch Nadelmessungen gemacht wurden. Es existieren demnach Daten von 4 bis 10 Bäumen pro Standort. Diese Anzahl an Messungen ist nicht ausreichend, um aussagekräftige Chronologien zu erstellen. Es gibt immer Bäume, welche schwierig zu messen sind. Zum Beispiel, wenn Teile des Bohrkerns morsch sind, durch einen Ast gestört, oder einfach nicht zu den anderen passen. Um die Messwerte dennoch verwenden zu können, wurden bestehende Jahrringdaten von Werner Baltensweiler und Paolo Cherubini verwendet. Die zusätzlich verwendeten Chronologien stammen von Cellerina (Cherubini, unpubl) und Sils Schadenherd (Baltensweiler, unpubl.) und reichen bis 1998 bzw. bis ins Jahre 2005. Die neu gemessenen Jahrringbreiten werden nun mit diesen Chronologien verglichen, um die Gültigkeit der Datierung zu verbessern.

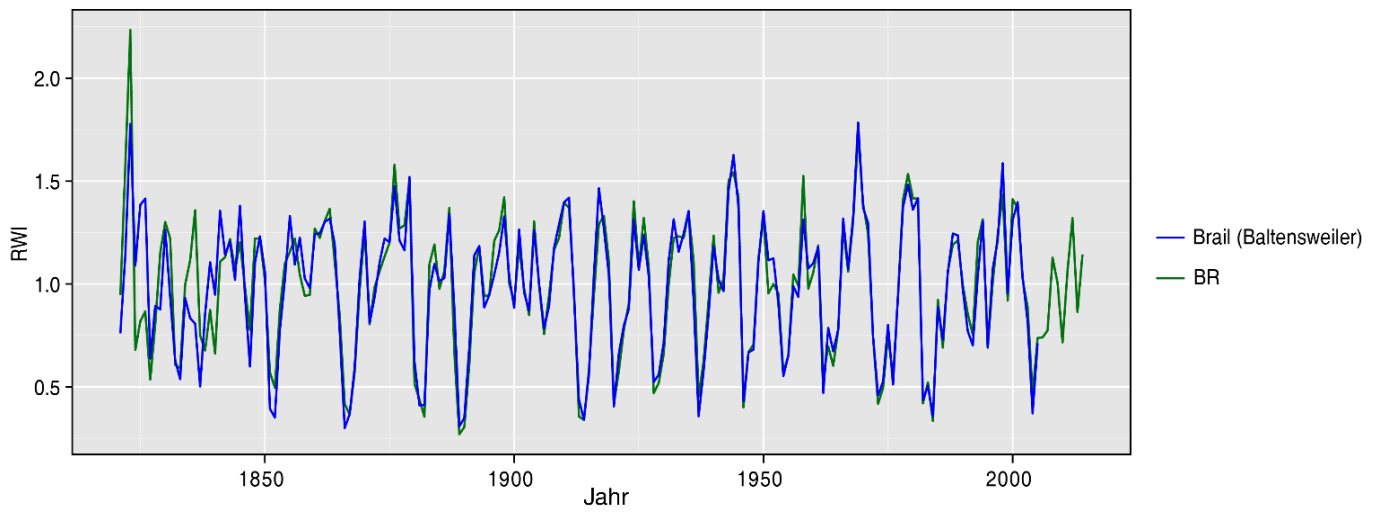
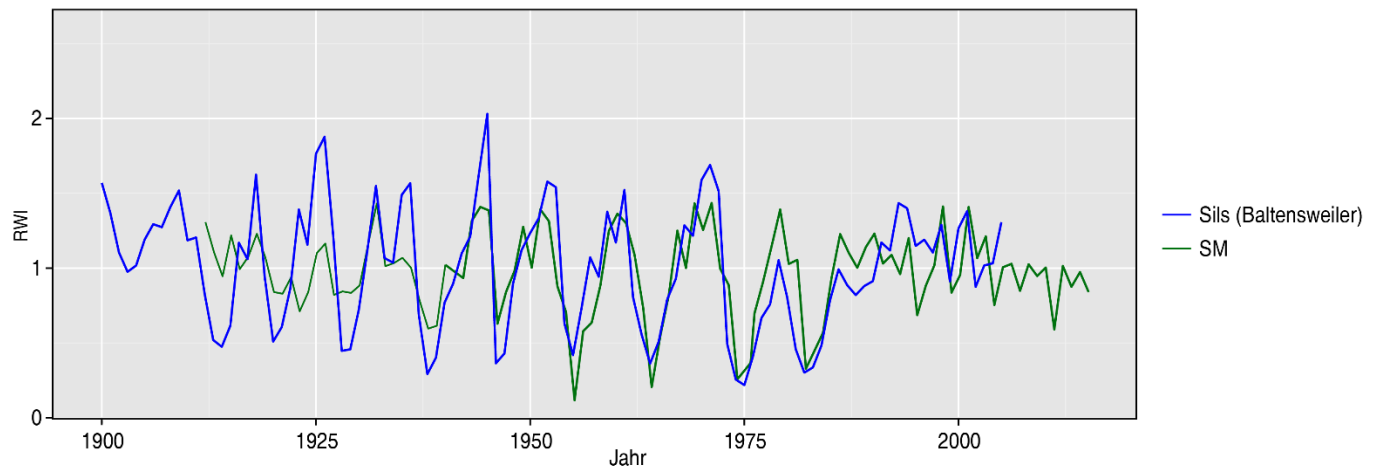
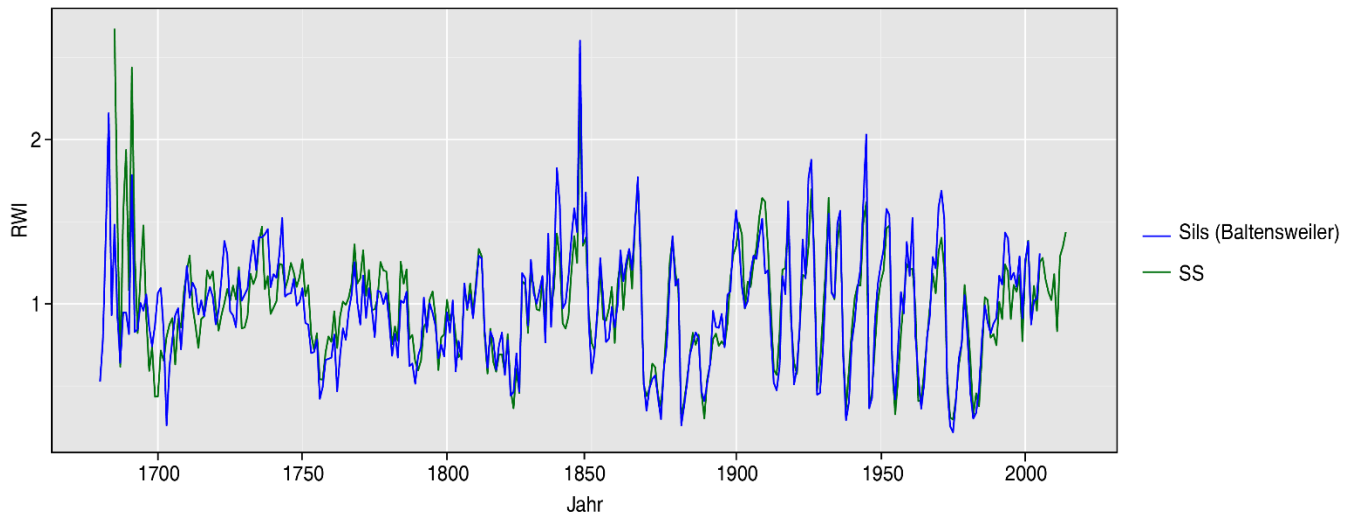
Das Berechnen der Chronologien erfolgte mit dem R Paket *dpIR* (Bunn 2008). Dieses Paket wurde eigens für die Dendrochronologie entwickelt und erleichtert die Verarbeitung von Jahrringdaten. Es sind einige nützliche Funktionen enthalten, wie z.B. das Bilden und Abbilden von Chronologien und Einzelmessungen, aber auch das Berechnen von Gleichläufigkeiten oder Autokorrelationen.

Die Jahrringbreitenkurven der Standorte Brai, Sils Schadenherd und Sils Maria sind relativ übereinstimmend mit den bestehenden Chronologien (siehe Glk). Für die Standorte in Davos und Zuoz gibt es keine bestehenden Chronologien. Diese Kurven wurden untereinander verglichen, da die Standorte nicht sehr weit auseinander liegen und daher keine signifikanten Unterschiede im Jahrringbreitenmuster zeigen. Die Kurven die in der Abb. 26 gezeigt werden, sind Chronologien, gebildet aus den Mittelwerten der einzelnen Messungen. In einem ersten Schritt wurden die A und B Proben der Bäume miteinander verglichen. Die Gleichläufigkeit der bestehenden Chronologien mit den neu gebildeten Chronologien haben folgende Werte:

DW/FA: 0,63 SM/SB: 0,69 ZPC/ZC: 0,46 SS/SB: 0,80 BR:0,78

Die Standorte Brail und Sils Schadenherd zeigen deutlich die Ausbrüche der Lärchenwickler alle 8-9 Jahre bis zu den 90er Jahren. Danach gibt es in den Jahrringbreiten keine regelmässig auftretenden Einbrüche mehr. Die datierten Ausbrüche stimmen mit den in anderen Studien publizierten Lärchenwicklerjahren überein (Baltensweiler et al. 2008; Esper et al. 2007; Weber 1997). Das Crossdating ist damit abgeschlossen und die Jahrringe sind datiert.





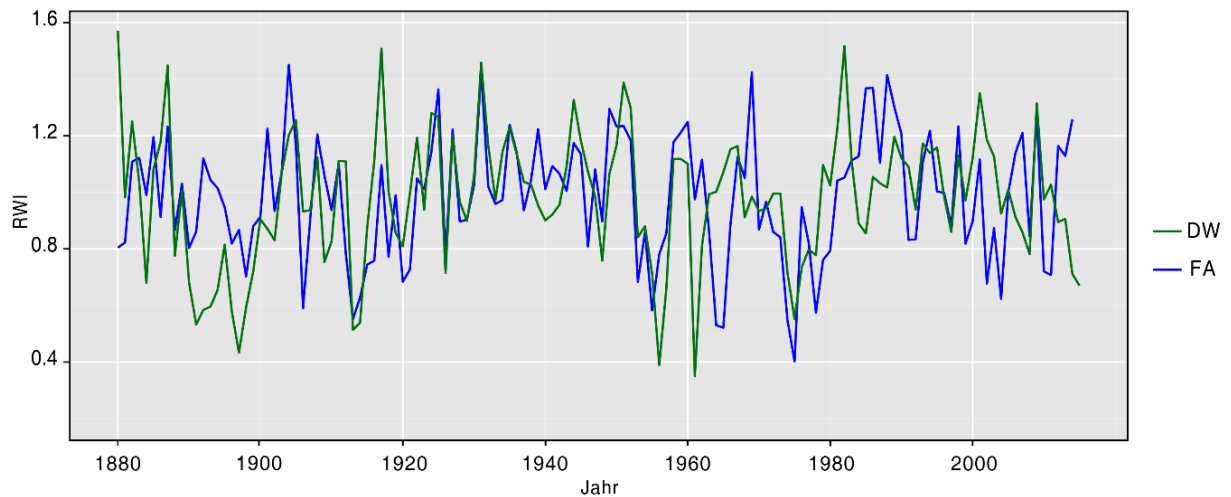


Abb. 26 Chronologien der einzelnen Standorte

Standardisierung

Die Jahrringe von jungen Bäumen sind tendenziell breiter als die Jahrringe von älteren Bäumen. Damit die Jahrringbreiten von diesem Trend bereinigt werden können, müssen sie einer Standardisierung unterzogen werden. Die Standardisierung erfolgte über die Funktion „detrend“ des R Pakets „dplR“ (Bunn 2008). Weiter wurde die Methode „Spline“ verwendet, welche geeignet ist um den Alterstrend zu bereinigen. Mit Hilfe des Attributes „nyrs“ kann die Beweglichkeit oder Elastizität der Spline-Kurve gewählt werden. Die Jahrringbreiten wurden mit einem Wert von 32 Jahren standardisiert. Die standardisierten Jahrringbreiten werden dann nicht mehr in mm angegeben sondern als RWI (Ring Width Index).

3.5 Klimadaten

3.5.1 Klimatische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet

Grundsätzlich herrscht in den inneralpinen Tälern der Alpen, z.B. wie dem Engadin, ein eher trockenes und kontinental geprägtes Klima, da die Täler sowohl von Norden als auch vom Süden her gegen Niederschlag abgeschirmt sind. Ein weiterer Grund ist der Malojapass. Über diesen flachen und breiten Pass strömen relativ kühle Luftmassen aus dem Comerseegebiet über das Bergell ins Oberengadin (Gensler 1978).

Die durchschnittliche Niederschlagsmenge im Engadin liegt zwischen 600 und 700 mm/Jahr. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge in den nördlichen Voralpen, den Alpen und der Südschweiz liegt hingegen bei etwa 2000 mm/Jahr und im Mittelland bei ca. 1000-1500 mm/Jahr. Der feuchteste Monat im Engadin ist der August, wie die Klimadiagramme Abb. 27 von Meteoschweiz zeigen. Im Allgemeinen nehmen die Niederschläge mit der Höhe zu. Das

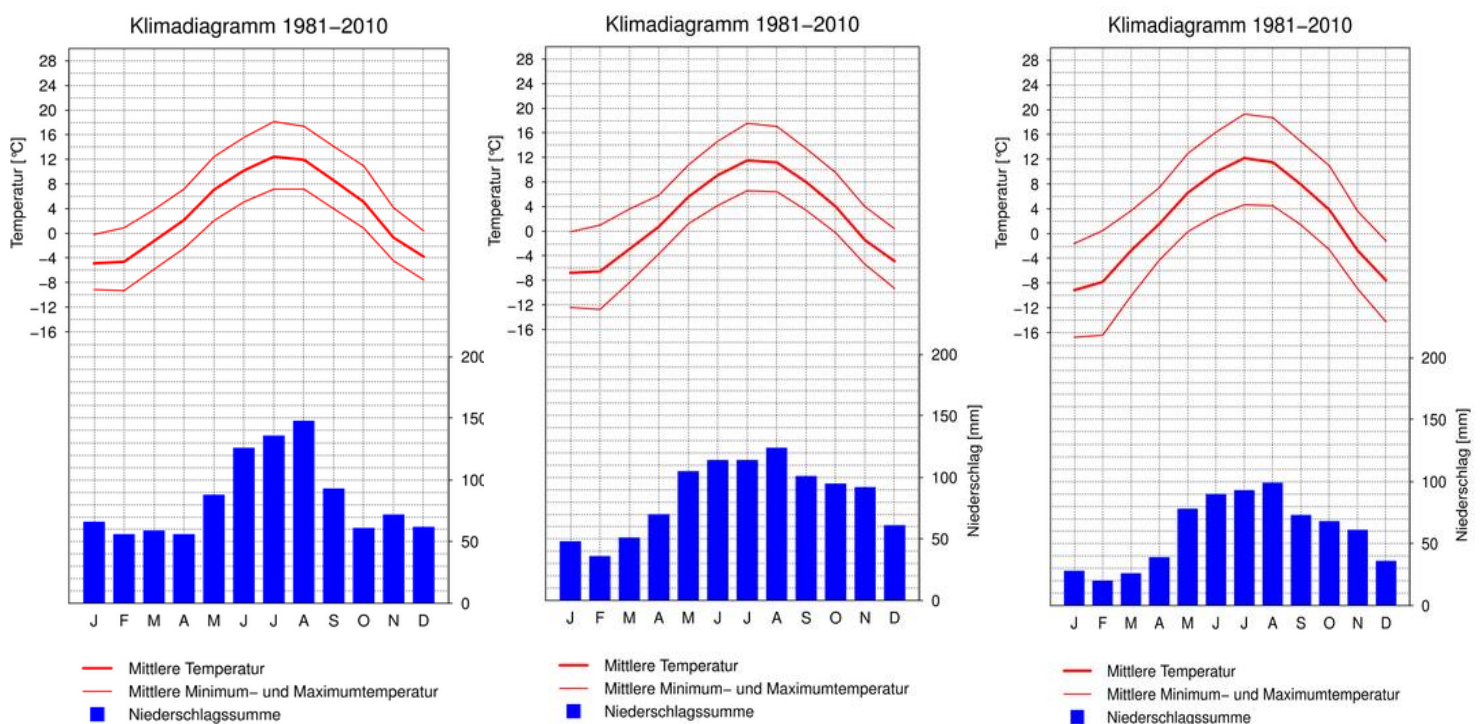


Abb. 27 Klimadiagramme von Meteoschweiz; von links nach rechts: Davos, Sils Maria, Samedan

Oberengadin hingegen hat rund 70 % niedrigere Niederschlagsmengen als das tiefer gelegene Puschlav. Grund dafür ist der Südost-Wind, der die Niederschläge mit sich bringt. Die Niederschläge am Alpensüdrand entstehen demnach durch Stauregeneffekte. Das Oberengadin,

welches hinter der Berninagruppe liegt, bekommt daher weniger Regen ab als die südlicheren Gebiete (Gensler 1978).

Im Vergleich mit Davos haben die Standorte im Engadin weniger Niederschlag. Dies ist auf die inneralpine Lage des Engadins zurückzuführen. Die Klimadiagramme des Engadins zeigen, dass sich die Normtemperatur zwischen Sils Maria und Samedan nur wenig unterscheidet. Das Engadin ist jedoch durch grosse tages- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen geprägt. Auffallend sind die deutlich tieferen Wintertemperaturen im Engadin als in Davos. Diese kommen durch den häufig in wolkenfreien Winternächten entstehenden Kaltluftsee in der Talebene rund um Samedan zustande. Kaltluftseen entstehen, da sich die Erdoberfläche rasch abkühlt. Die über den Tag aufgeheizten, wärmeren Luftschichten in höheren Lagen kühlen nicht so schnell ab wie die bodennahen Luftmassen. Dadurch entsteht eine Inversionslage. Die kältere Luft hat eine höhere Dichte als die wärmeren und somit wird der Austausch zwischen den Luftmassen gebremst. Dadurch kann es in den Wintermorgenstunden in Samedan bis zu 10°C kälter sein als auf dem 1600 m höher gelegenen Corvatsch. Diese Kaltluftseen haben einen Einfluss auf die Schneebedeckung und die Vegetation (Gensler 1978).

Ein weiteres lokales Phänomen ist der Malojawind. Er ist ein dem regulären Berg- und Talwindssystem entgegengesetzter Wind und hat seinen Ursprung im Bergell. Die steilen Bergänge erwärmen sich am Morgen rascher als die flachen Talebenen. Die warme Luft steigt auf und aus dem Tal wird Luft nachgezogen. Dieser so entstandene Wind weht nun in Richtung Malojapass. Dadurch dass der Malojapass eher flach ist und zwischen dem Oberengadin und dem Bergell keinen Talabschluss bildet, können die Luftmassen aus dem Bergell ungehindert den Pass überwinden und werden im Oberengadin zum Malojawind. Der Malojawind tritt häufig zwischen Juli und Oktober auf und kann sturmähnliche Formen annehmen (Eitel 2015).

3.5.2 Klimafaktor Temperatur

Wie schon in dem Kapitel 3.4.2 erklärt wird, spielt vor allem die Temperatur eine entscheidende Rolle für das Wachstum der Lärchen im Engadin. Aus diesem Grund wurden Daten über die Tagesmitteltemperaturen verwendet, um den Zusammenhang zwischen Jahrringen, Nadellängen und Klima zu zeigen.

Die Daten stammen von den Meteoschweiz Messstationen Davos, Samedan und Sils Maria. Das Climap der WSL bietet die Möglichkeit ein breites Spektrum an klimatischen Daten der

Meteoschweiz herunterzuladen. Die Tab. 4 zeigt die verwendeten Stationen und ihre Attribute. Die Station Samedan liefert erst seit 1980 Temperaturdaten. Für Davos und Sils Maria hingegen sind fast lückenlos seit 1900 Daten vorhanden. Zur Analyse wurde die mittlere Tagestemperatur 2 m über Boden gewählt.

Tab. 4 Verwendete Messstationen von Meteoschweiz

Station	ID	Koordinaten	Höhe ü. M.	Messreihe
Davos	DAV	783514/187457	1594 m	1900-2015
Segl-Maria	SIA	778575/144976	1804 m	1900-2015
Samedan	SAM	787210/155700	1709m	1980-2015

Die Abb. 28 zeigt die Entwicklung der Jahrestemperatur in der Schweiz im letzten Jahrhundert. Es ist zu erkennen, dass sich die Abweichung der Temperatur zum Durchschnitt seit den 80er Jahren deutlich im positiven Bereich befindet. Das bedeutet, die durchschnittliche Jahrestemperatur seit den 80er Jahren im Vergleich zu den Normwerten stetig.

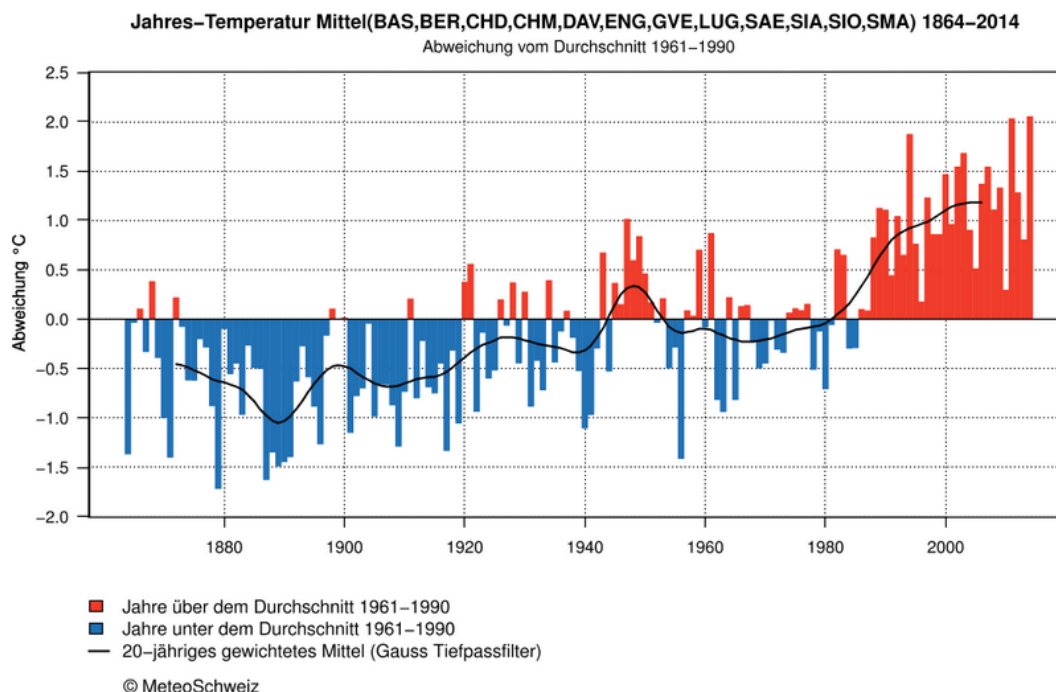


Abb. 28 Entwicklung der Jahrestemperaturmittel, Quelle: Meteoschweiz

Der schweizweite Trend ist auch an den untersuchten Standorten im Engadin zu erkennen. Die Abb. 29 zeigt die mittlere Jahrestemperatur der drei Standorte Sils-Maria, Samedan und Davos. Auch hier ist zu erkennen, dass die Temperaturen im Jahresmittel steigen. In Sils-Maria

ist die Temperatur in den für die Vegetationsentwicklung entscheidenden Monaten April und Mai um rund 1.6 °C gestiegen. Dies entspricht dem Effekt einer Höhenverschiebung um 200 Meter (Dobbertin & Giuggiola 2006).

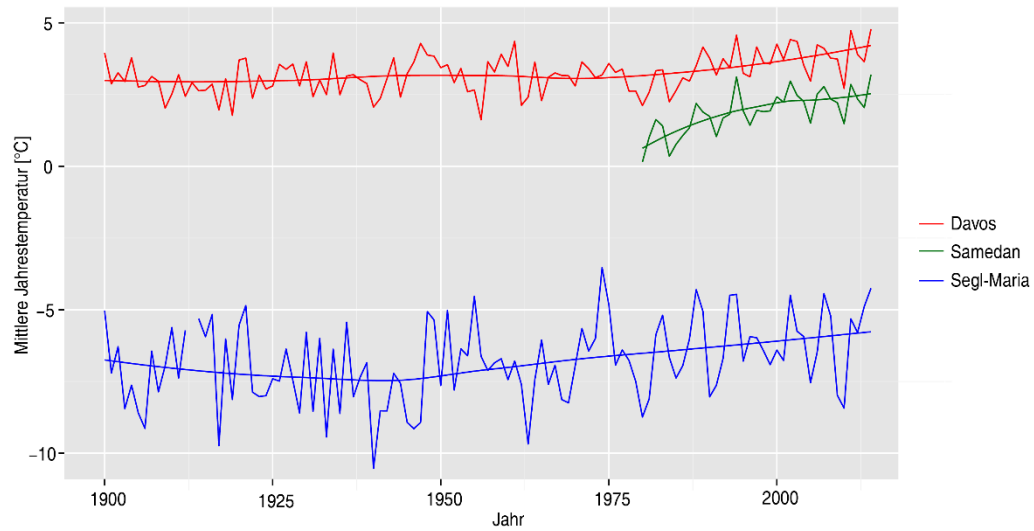


Abb. 29 Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur

3.6 Software

Das Digitalisieren der Rohdaten, d. h. das Eintippen der Rohdaten und eine erste Fehlerbearbeitung mit multivariatem Sortieren erfolgte mit der Software *Excel* (Office 2013). Insgesamt wurden ca. 36'000 Datenpunkte digitalisiert und in einem Datensatz (siehe CD mit den Daten) gespeichert. Auch die Klima und Dendrodaten wurden zum Teil mit *Excel* bearbeitet. Die Menge an Daten stellte kein Problem dar und verlangsamte das Computersystem nur gering. Vorteile einer ersten Datenbearbeitung mit *Excel* sind die einfachen Filter und Sortierfunktionen. Die genaue Analyse der Daten und die Modellierung erfolgten in *R Studio* (Version: R-3.2.0). Es wurden unter anderem folgenden Pakete häufig verwendet: *ggplot2* (Wickham 2009), *chron* (James & Hornik 2015), *plyr* (Wickham 2014), *dplR* (Bunn 2008). Das *dplR* ist ein Paket zur Analyse von Dendrodaten. Das Crossdating, das Standardisieren und das Erstellen von Chronologien können mit Hilfe dieses Pakets bewältigt werden.

4 Resultate

Dieses Kapitel zeigt die Resultate der Analyse der Nadellängen und der Jahrringbreiten im Zusammenhang mit dem Klimafaktor Temperatur. Der Fokus wird auf die Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten, auf die Veränderungen über die Zeit und den Zusammenhang zwischen den Jahrringbreiten, den Nadellängen und der mittleren Monatstemperatur gelegt. In einem ersten Schritt werden die Resultate der einzelnen Daten auf den verschiedenen Skalenebenen betrachtet. Das heisst, es wird untersucht, wie sich die einzelnen Bäume innerhalb eines Standortes unterscheiden. In einem nächsten Schritt werden die Unterschiede zwischen den Standorten analysiert. In den Veränderungen über die Zeit wird der Fokus auf den Einfluss der Klimaerwärmung gelegt. Anhand der modellierten Wachstumsparameter und der Temperaturerhöhung wird das Wachstum über den Zeitraum von 40 Jahren analysiert. Weiter wird anhand der berechneten Korrelationen gezeigt, welche Monatsmitteltemperaturen einen Einfluss auf das Dicken- und das Längenwachstum der Lärchen haben. Schliesslich soll der Zusammenhang zwischen Nadellängen und Jahrringbreiten gezeigt.

Insgesamt konnte mit Hilfe des Modells 1106 Wachstumskurven für die einzelnen Bäume und Jahre modelliert werden. Die Abb. 30 zeigt, wie sich die berechneten Wachstumskurven auf die Standorte aufteilen. Für die Standorte Sils Schadenherd und Brail konnten am meisten Wachstumskurven berechnet werden. Der Grund dafür ist, dass Brail und Sils Schadenherd die längsten Zeitreihen und somit auch am meisten Daten aufweisen.

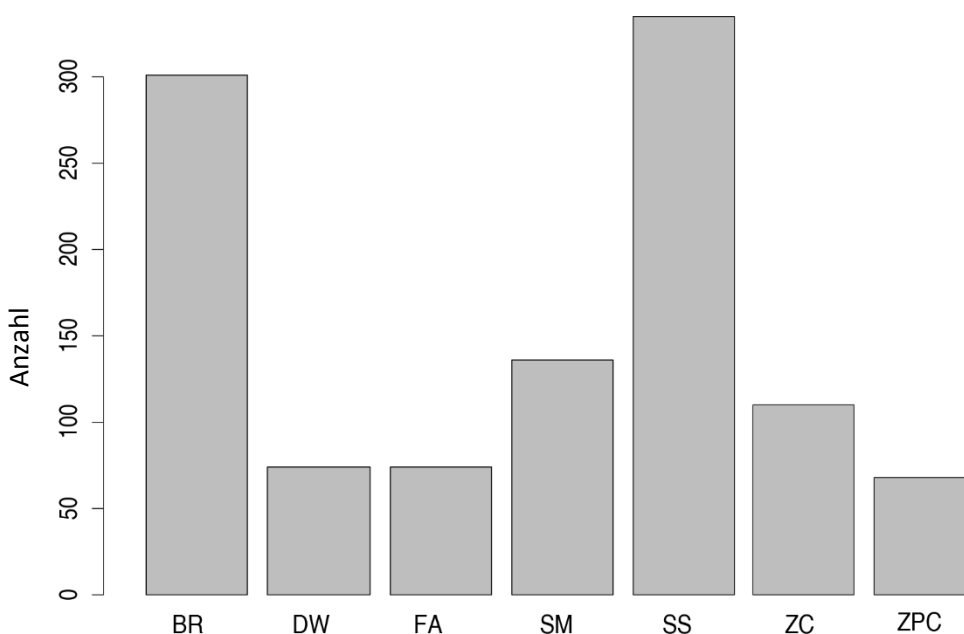


Abb. 30 Anzahl berechnete Wachstumsmodelle pro Standort

4.1 Räumliche Analyse des Wachstums

In der räumlichen Analyse des Wachstums werden die Unterschiede im Nadel- und Jahrringwachstum der einzelnen Standorte in Bezug auf den Standortfaktor Höhe über Meer untersucht. Auf den Standortfaktor Temperatur wird erst in der Zeitreihen Analyse eingegangen. Die Standortfaktoren Temperatur und Höhe über Meer sind gekoppelt. Jedoch kann der Temperaturgradient durch lokale Wetterphänomene wie Kaltluftseen beeinflusst werden. Da es im Engadin, nur eine über den Zeitraum von 1972-2014 zur Verfügung stehende Klimastation gibt, müssen die Temperaturdaten für die einzelnen Standorte interpoliert werden. Die zweite Klimastation liegt in Davos und deren Daten können für die Interpolation der Temperatur der Standorte Flüelapass Alpenrose und Davos Wolfgang verwendet werden. Der in dieser Arbeit verwendete Temperaturgradient beträgt 0.6°C pro 100 m Höhe (Gensler 1978). Die Temperaturdaten von Samedan wurden in der Analyse nicht verwendet, da die Temperaturmessungen dort erst 1980 starten. Für die Standorte im Engadin wurden für alle die Temperaturdaten von Sils Maria verwendet.

In einer ersten Analyse wird untersucht, wie stark sich die modellierten Parameter der einzelnen Bäume eines Standortes unterscheiden. Um die Variabilität durch die Klimaveränderung zu vermindern, wurden nur die Daten ab 1985 verwendet. Es stellt sich heraus, dass in Anbetracht der Tatsache, dass die Baumnummern bei den langen Zeitreihen Brail und Sils Schadenherd gewechselt wurden, es nicht möglich ist das Verhalten der einzelnen Bäume zu charakterisieren. Es wird aber angenommen, dass die maximale Länge der Nadeln genetisch bedingt sein könnte. Um aber eindeutige Aussagen darüber treffen zu können, müssten über längere Zeit immer an den gleichen Bäumen bzw. am gleichen Ast die Nadellängen gemessen werden.

Standortfaktor Höhe über Meer

Um zu analysieren, ob und wie sich die Wachstumsparameter über die Höhe verändern, wurden die Parameter in Abhängigkeit der Höhe über Meer untersucht. Wiederum wurden die Lärchenwicklerjahre nicht miteinbezogen, da die verkürzten Nadeln nicht primär durch die höhere Lage zustande kamen, sondern durch den Frass der Raupen. Um einen besseren Überblick zu erhalten, wurde der Median der einzelnen Lärchen und Jahre berechnet.

Maximale Nadellänge

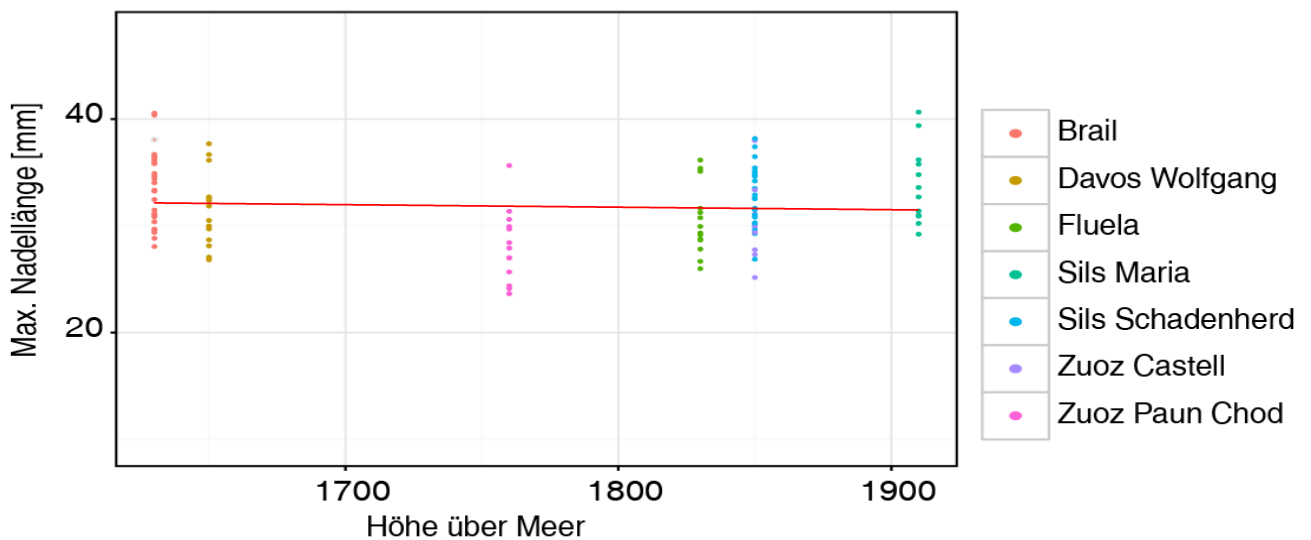


Abb. 31 Maximale Nadellänge aufgetragen gegen die Höhe über Meer.

Abb. 32 Erreichen der 50%- Nadellänge aufgetragen gegen die Höhe über Meer. Abb. 33 Maximale Nadellänge aufgetragen gegen die Höhe über Meer.

Die Abb. 31 zeigt die Entwicklung des Parameters a über die Höhe. Die Regressionsgerade zeigt mit einer Steigung von -0.002 kaum Veränderungen über die Höhe und das Bestimmtheitsmass ist mit 0.002 sehr klein. Andere Faktoren beeinflussen daher die maximale Nadellänge mehr als der Faktor Höhe über Meer

Zeitpunkt des Erreichens der 50% Nadellänge

In der Abb. 32 wird die Entwicklung des Parameter b über die Höhe und eine Annäherung mit Hilfe einer linearen Regression dargestellt. Die Regressionsgerade hat eine Steigung von 0.03 . Das bedeutet, dass sich pro 100 Meter Höhenzunahme das Erreichen der 50% -Nadellänge um 3 Tage verschiebt. Das Bestimmtheitsmass beträgt aber nur 0.17 . Das heisst nur ein kleiner

Anteil der Variabilität wird durch die lineare Regression erklärt. Die Höhe über Meer beeinflusst in dieser Analyse das Erreichen 50%-Nadellänge der Nadeln nicht entscheidend.

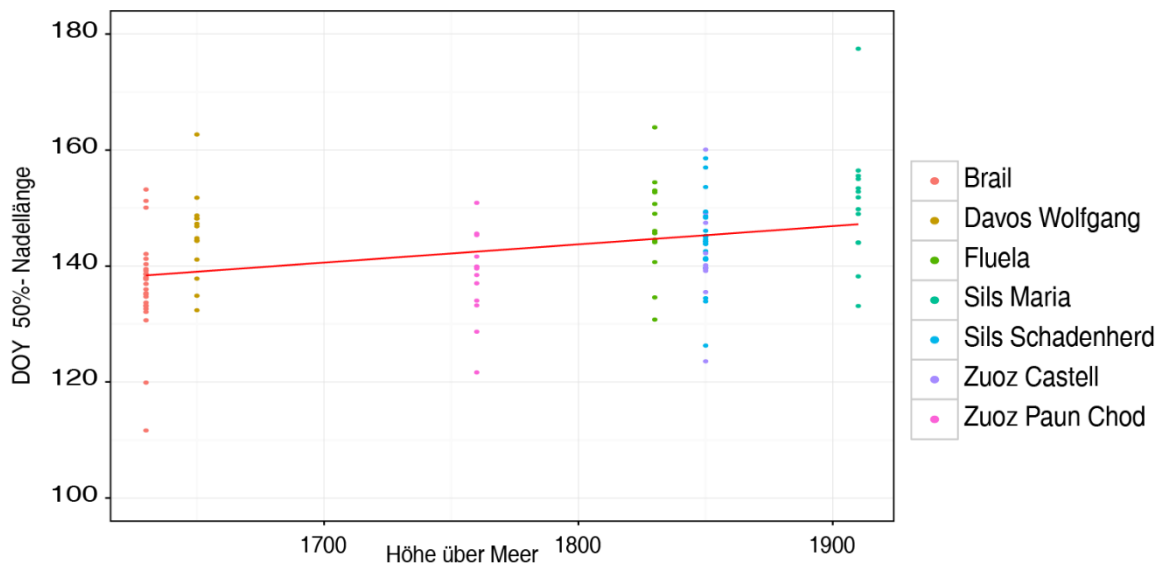


Abb. 34 Erreichen der 50%- Nadellänge aufgetragen gegen die Höhe über Meer.

Abb. 35 Wachstumskonstante aufgetragen gegen die Höhe über Meer. Abb. 36 Erreichen der 50%- Nadel-
länge aufgetragen gegen die Höhe über Meer.

Wachstumskonstante

Die Abb. 33 zeigt die Entwicklung der Wachstumskonstanten über die Höhe über Meer. Auch hier besteht kaum ein Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit des Wachstums und der

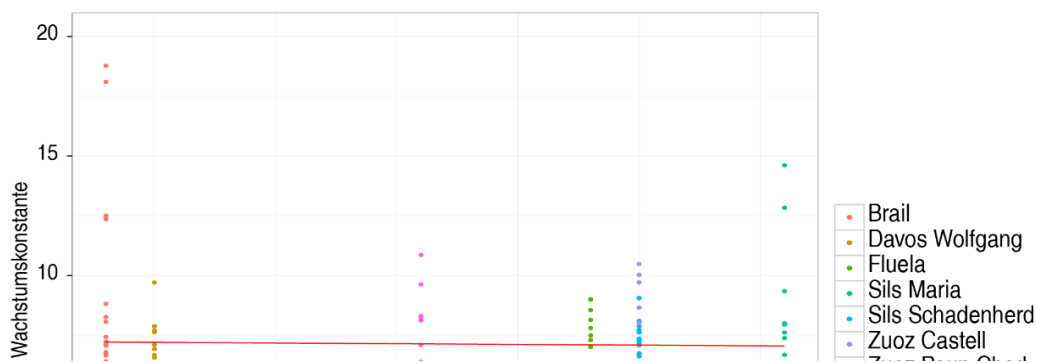


Abb. 37 Wachstumskonstante aufgetragen gegen die Höhe über Meer.

Abb. 38 Der QQ-Plot zeigt, ob Stichprobe normalverteilt ist. Abb. 39 Wachstumskonstante aufgetragen
gegen die Höhe über Meer.

Höhe über Meer. Die Steigung beträgt -0.0004 und das Bestimmtheitsmass 0.0003 . Die Streuung der Daten ist gross. Die Wachstumskonstante scheint nicht von der Höhe über Meer abhängig zu sein.

Absolute Länge am 1. Juni

Diese aus der Wachstumskurve berechnete absolute Grösse zeigt einen im Gegensatz zu den anderen Parametern einen deutlicheren Trend zu kürzeren Nadeln in höheren Lagen. Die Steigung beträgt -0.03 und das Bestimmtheitsmass 0.27 . Es ist nicht erstaunlich, dass die absolute Länge am 1. Juni und der Zeitpunkt der 50% Nadellänge einen ähnlichen Trend zeigen. Dadurch dass das Modell symmetrisch ist am Wendepunkt, sind diese beiden Grössen direkt miteinander gekoppelt und es ist zu erwarten, dass sie sich ähnlich verhalten.

4.3 Zeitreihenanalyse des Wachstum

In der Zeitreihenanalyse werden die Veränderungen des Wachstums über die Zeit analysiert und der Zusammenhang zwischen Jahrringbreiten, Nadelwachstum und Klima gezeigt. Wie schon bei den räumlichen Analysen wurde der Median der einzelnen Lärchen pro Jahr und Standort berechnet. Für die Jahrringbreiten wurden die Chronologie des jeweiligen Standortes verwendet. In die Analyse werden aber nur die Standorte Sils Schadenherd und Brail miteinbezogen. Für die anderen Standorte ist sowohl die Datendichte der Nadellängen wie auch der Jahrringbreiten zu gering, um sie in der Analyse zu berücksichtigen.

Maximale Nadellänge

Auf den ersten Blick ist für das maximale Nadelwachstum kein eindeutiger Trend (Abb. 34) zu erkennen. Das maximale Nadelwachstum variiert ziemlich stark über die Zeit und über den Raum. Gut zu erkennen sind die kürzeren Nadeln in den Lärchenwicklerjahren 1973 – 1976 und 1982 – 1984. Die Nadeln wurden vor dem Erreichen der maximalen Nadellänge von den Raupen abgefressen. In den Jahren nach den Ausbrüchen erholten sich die Lärchen wieder und die Nadeln wurden wieder länger. Nach 2003 ist ein schwacher Trend zu kürzeren Nadeln erkennbar. Die Streuung des modellierten Parameters ist grösser. Dies spricht gegen die Hypothese, dass durch die Temperaturerhöhung die Nadeln länger werden. Dieser Trend könnte mit der Tatsache erklärt werden, dass die Nadeln nach 2003 mit einer anderen Methode gemessen wurden und dadurch ein systematischer Fehler vorhanden ist.

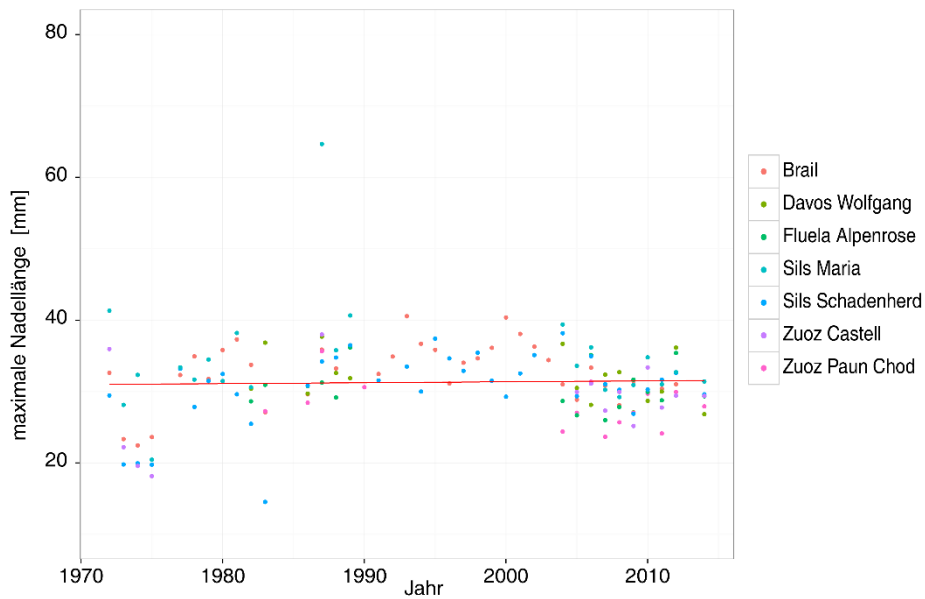


Abb. 40 Veränderung der maximale Nadellänge über die Zeit

Zeitpunkt des Erreichens der 50%-Nadellänge

Der Parameter b der Wachstumsfunktion gibt Auskunft über den Ort des Wendepunktes der Funktion (Sachs & Hedderich 2012). Der Wendepunkt ist per Definition der Ort mit der grössten Steigung. Die Nadeln haben daher am Wendepunkt genau die Hälfte ihrer Länge erreicht. Dies ist bei einer logistischen Wachstumsfunktion charakteristisch durch drei Parameter definiert. Die Abb. 35 zeigt die Entwicklung des Parameters b . Es ist ein Trend zu einer Verfrühung des Erreichens der 50%-Nadellänge zu erkennen. Dies lässt darauf schliessen, dass die Nadeln früher im Jahr die Hälfte der maximalen Länge erreichen. Weiter ist zu erkennen, dass die Lärchenwicklerjahre nicht so grosse Auswirkungen auf den Parameter b haben wie auf die

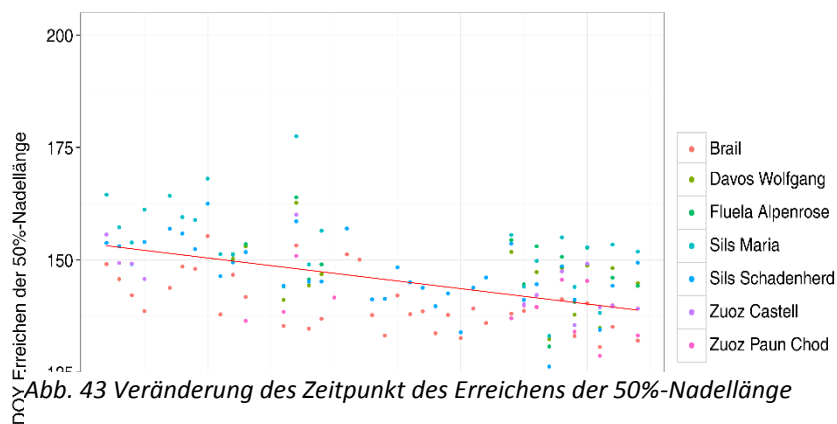


Abb. 43 Veränderung des Zeitpunkt des Erreichens der 50%-Nadellänge

Abb. 44 Veränderung der Wachstumskonstante über die Zeit
Abb. 45 Veränderung des Zeitpunkt des Erreichens der 50%-Nadellänge

maximale Nadellänge. In den Lärchenwicklerjahren ist aber eine leichte Verfrüfung zu erkennen. Eine mögliche Erklärung ist in der Abhängigkeit des Parameters b von der maximalen Nadellänge zu finden. in der Definition des Wachstumsmodells. Die Wachstumsfunktion hat am Wendepunkt eine Symmetrieachse. Das bedeutet, wenn das maximale Nadelwachstum durch das Abfressen der Raupen kleiner ist als in den anderen Jahren, ist die die 50%-Nadellänge auch früher erreicht.

Wachstumskonstante

Die Wachstumskonstante zeigt in welcher die Zeit die maximale Länge erreicht wird. Der Parameter c gibt Informationen über die Steigung der Kurve und ist somit ein Indikator für die Geschwindigkeit des Wachstums. Umso höher der Wert des Parameter c , desto flacher ist die Kurve und desto langsamer das Wachstum. Die Abb. 36 zeigt, wie sich der modellierte Parameter c über die Zeit verhält. Es fällt sofort auf, dass die modellierten Werte eine grosse Variabilität aber keinen eindeutigen Trend aufweisen.

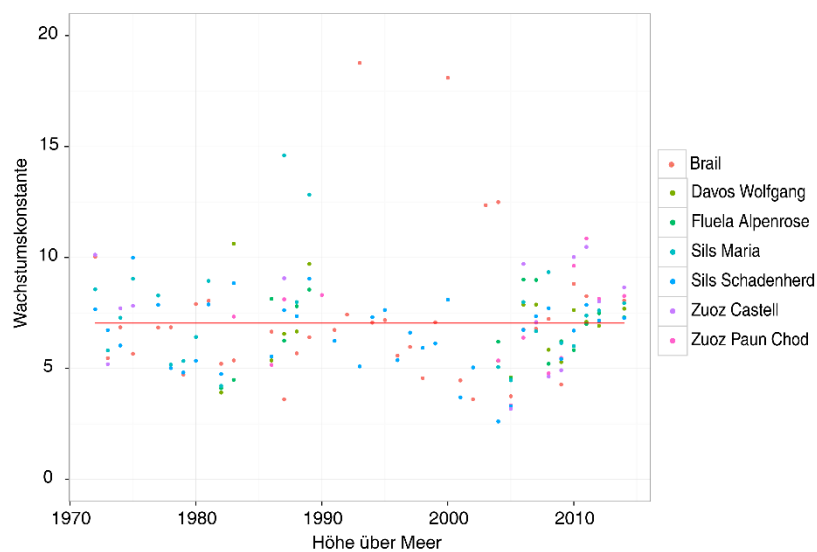


Abb. 46 Veränderung der Wachstumskonstante über die Zeit

Abb. 47 Veränderung der Wachstumskonstante über die Zeit

4.2 Zusammenhang zwischen Nadellängen, Jahrringbreiten und Temperatur

Um den Zusammenhang zwischen Nadellängen, Jahrringbreiten und Klima zu zeigen, werden die Korrelationskoeffizienten zwischen den Parameter a , b , c und den Jahrringbreiten und den monatlichen Mitteltemperaturen berechnet. Weiter wurden auch die Korrelationskoeffizienten zwischen den Nadellängen und Jahrringbreiten.

Um einen Zusammenhang zwischen zwei Variablen zu zeigen, muss die Korrelation zwischen zwei Variablen berechnet werden. Die Korrelation besteht aus einem Korrelationskoeffizient und einem p-Wert. Der Korrelationskoeffizient gibt die Stärke und Richtung des Zusammenhangs an. Er kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Bei einem starken positiven Zusammenhang hat er einen Wert nahe 1 und bei einem stark negativen Zusammenhang einen Wert nahe -1. Kein Zusammenhang besteht bei einem Wert nahe 0. Der Korrelationskoeffizient besagt noch nicht, dass auch wirklich ein statistischer Zusammenhang besteht. Dazu wird der p-Wert benötigt, welcher Auskunft gibt, ob ein Korrelationskoeffizient signifikant ist. „Der p-Wert gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine ebenso grosse und grössere Prüfgrösse, wie die berechnete, erwartet werden kann, wenn die Nullhypothese richtig ist“ (Sachs & Hedderich 2012). Es gibt verschiedenen Korrelationskoeffizienten, welche bei unterschiedlichen Daten eingesetzt werden. Für normalverteilte und parametrische Daten eignet sich ein Pearson – Korrelationskoeffizienten. Bei nicht normalverteilten und nicht-parametrischen Daten eignet sich ein Spearman-Korrelationskoeffizient. Die Spearman-Korrelation wird nicht direkt aus den Messungen errechnet sondern aus den Rängen der Daten. Dadurch ist sie

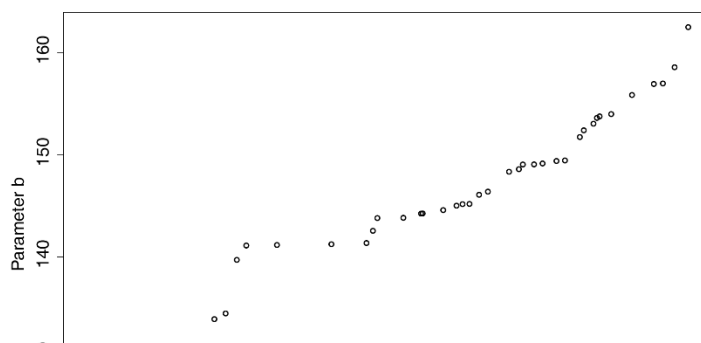


Abb. 48 Der QQ-Plot zeigt, ob Stichprobe normalverteilt ist.

Abb. 49 Streudiagramm zum Beurteilen des linearen Zusammenhangs

Abb. 50 Der QQ-Plot zeigt, ob Stichprobe normalverteilt ist.

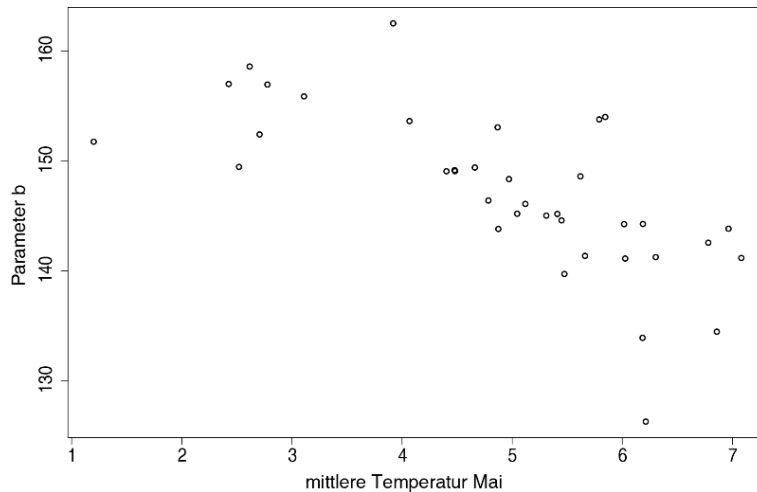


Abb. 51 Streudiagramm zum Beurteilen des linearen Zusammenhangs

Abb. 52 Veränderung der maximale Nadellänge über die Zeit
Abb. 53 Streudiagramm zum Beurteilen des linearen Zusammenhangs

für nicht-lineare Zusammenhänge genutzt werden und ist nicht auf normalverteilte Daten beschränkt. Ob die Daten nun normalverteilt sind, kann mit einem QQ-Plot gezeigt werden. Liegen die Daten annähernd auf einer Linie sind sie normalverteilt. Der lineare Zusammenhang hingegen kann mit einem Streudiagramm gezeigt werden. Die Abb. 38 zeigt, dass die Daten zwar annähernd normalverteilt sind, aber zum Teil keinen linearen Zusammenhang zeigen (Abb. 39). Folglich wird die Spearman-Korrelation verwendet (Sachs & Hedderich 2012).

Bei statistischen Testen werden zwei Hypothesen aufgestellt. Eine Nullhypothese H_0 und einen Arbeitshypothese H_1

Die Nullhypothese und die Arbeitshypothese lauten wie folgt für diese Analyse:

H_0 : Es besteht kein Zusammenhang zwischen den getesteten Variablen (Temperatur und Wachstum)

H_1 : Die Temperatur hat einen Einfluss auf die Wachstumsparameter

Ist der Korrelationskoeffizient signifikant, kann die Nullhypothese auf dem getesteten Signifikanzniveau abgelehnt werden. Die Arbeitshypothese kann nie direkt angenommen, sondern lediglich über die Verwerfung der Nullhypothese indirekt bestätigen, werden.

Die Tab. 5 des Standortes Sils Schadenherd zeigt die berechneten Korrelationskoeffizienten und die dazugehörigen p- Werte. Bei einem p-Wert < als 0,05 ist der Zusammenhang zwischen den beiden getesteten Variablen signifikant. Das bedeutet, dass der gemessene Zusammenhang der Stichprobe mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% auch für die Grundgesamtheit gilt. Damit besteht immer noch die Restchance von 5%, dass der Zusammenhang zufällig aufgetreten ist. Die Null-Hypothese kann somit mit einer Sicherheit von 95% abgelehnt werden.

Es wurden nicht nur die Korrelationen der Parameter mit den zugehörigen monatlichen Temperaturmittel berechnet sondern auch mit den monatlichen Temperaturmittel des Vorjahrs, um zu überprüfen ob die Temperatur vom Vorjahr die Wachstumsparameter beeinflusst.

Weiter wurden auch die vermutlich wachstumsrelevanten Monate April-Mai, Mai-Juni, Juni-Juli und April- Juni zusammengefasst und gemittelt und die Korrelationen berechnet mit den Wachstumsparametern. Die Tab. 5 zeigt die berechneten Korrelationskoeffizienten und die dazugehörigen p- Werte der für den Standort Sils Schadenherd.

	A		B		C		JUNI		TRW	
	Koef.	p-Wert	Koef.	p-Wert	Koef.	p-Wert	Koef.	p-Wert	Koef.	p-Wert
Jul. Vorjahr	0.216	0.212	-0.122	0.476	0.258	0.135	0.343	0.045	-0.018	0.909
Aug. Vorjahr	0.159	0.359	-0.014	0.561	-0.101	0.561	0.315	0.065	0.138	0.381
Sep. Vorjahr	-0.128	0.926	-0.128	0.457	0.130	0.454	0.077	0.660	0.214	0.174
Okt.Vorjahr									0.369	0.017
März	0.005	0.978	-0.296	0.400	0.171	0.318	0.157	0.358	0.228	0.140
April	0.100	0.563	-0.327	0.048	0.238	0.162	0.276	0.104	0.275	0.074
Mai	0.048	0.779	-0.786	0.000	-0.107	0.535	0.357	0.033	0.288	0.061
Juni	-0.073	0.671	-0.349	0.035	-0.120	0.483	0.198	0.246	0.410	0.006
Juli	0.070	0.683	-0.104	0.538	0.123	0.475	0.213	0.211	0.024	0.881
August	0.025	0.884	-0.231	0.168	0.054	0.756	0.404	0.015	0.126	0.419
April-Mai	0.080	0.643	-0.643	0.000	0.060	0.725	0.400	0.016	0.340	0.026
Mai-Juni	0.118	0.946	-0.650	0.000	-0.141	0.411	0.294	0.082	0.401	0.008
Juni-Juli	-0.012	0.945	-0.290	0.081	-0.115	0.505	0.251	0.140	0.295	0.055
April-Juni	0.067	0.696	-0.613	0.000	-0.378	0.826	0.359	0.032	0.424	0.005

Tab. 5 Berechnete Korrelationskoeffizienten und p- Werte für den Standort Sils Schadenherd. Gelb markiert die signifikanten Korrelationskoeffizienten

Zusammenhang zwischen den Wachstumsparametern und den Jahrringbreiten

Signifikant negative Korrelationskoeffizienten sind zwischen dem Parameter b und der Jahrringbreite ersichtlich und auch die absolute Länge am 1. Juni hat einen signifikanten Zusammenhang mit der Jahrringbreite. Daraus lässt sich folgern, dass in Jahren mit frühem Erreichen der 50%- Nadellänge, die Jahrringe breiter ausfallen. Dadurch, dass die Nadeln früher im Jahr die 50%-Länge erreichen, wird die Vegetationsperiode länger, die Fotosyntheseleistung somit höher und auch das Jahrringwachstum kann davon profitieren.

Zusammenhang zwischen Wachstumsparametern und der Temperatur

Signifikant negative Korrelationskoeffizienten bestehen zwischen dem Parameter b und den folgenden monatlichen Temperaturmittel: April, Mai, Juni, April-Juni, April-Mai, Mai-Juni. Die stärkste Korrelation zwischen dem Parameter b und der gemittelten Temperatur im Mai. Die anderen Parameter zeigen keine signifikanten Korrelationen mit den Temperaturmitteln, sowohl für das Vorjahr wie auch für das aktuelle Jahr. Der Parameter b zeigt auch keinen signifikanten Korrelationskoeffizienten zu den Vorjahrestemperaturmitteln. Die absolute Länge am 1. Juni hingegen zeigt positive Korrelationskoeffizienten mit den monatlichen Temperaturmitteln Mai, April-Mai, April-Juni. Diese Resultate zeigen, dass zwischen dem Erreichen der 50%-Nadellängen und der Temperatur im in den wachstumsbestimmenden Monaten April, Mai Juni ein Zusammenhang besteht.

Werden nun modellierten Parameter b über die mittlere Tempertemperatur im Mai geplottet, ist der Zusammenhang deutlich sichtbar. Die Verfrühung des Erreichens der 50%- Nadellänge mit zunehmender Mai Temperatur ersichtlich. Der Parameter b verschiebt sich um fast 4 Tage pro Grad Temperaturzunahme. Die Regression hat ein Bestimmtheitsmass von 0,47.

Zusammenhang zwischen Jahrringbreiten und der Temperatur

Signifikant positive Korrelationskoeffizienten bestehen zwischen den Jahrringbreiten und den monatlichen Temperaturen Juni, April-Mai, Mai-Juni, April-Juni. Wie auch mit den folgenden Temperaturen des Vorjahrs April-Mai, Mai-Juni, April-Juni (nicht abgebildet auf der Tab.) und

Oktober. Es besteht demnach ein Zusammenhang zwischen den Temperaturen der Monaten April- Juni des aktuellen wie auch des Vorjahrs. Die Jahrringbreite ist der einzige hier untersuchte Wachstumsparameter, welcher signifikante Korrelationskoeffizienten zu monatlichen Temperaturen aus dem Vorjahr zeigt.

4 Diskussion

Die Räumliche Analyse des Wachstums hat gezeigt, dass sich die einzelnen Bäume der Standorte in Bezug auf die Wachstumsparameter eine zum Teil grosse Variabilität aufweisen. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten war es nicht möglich diese Variabilität genauer zu analysieren.

Weiter hat die räumliche Analyse gezeigt, dass vor allem der modellierte Parameter b (Erreichen der 50%-Nadellänge) einen Trend zu verzögertem Auftritt über die Zunahme der Höhe aufweist. Die anderen Parameter zeigen keinen deutlichen Trend. Die Annahme, dass die Lärchen an höher gelegenen Standorten kürzere Nadeln aufweisen, konnte nicht bestätigt werden. Ein leichter Trend zu späterem Erreichen der 50%-Nadellänge ist jedoch zu beobachten. Zu beachten ist aber, dass der Höhenunterschied zwischen den Standorten nur ca. 200m beträgt. Dies würde einem Temperaturunterschied von ca. 1,2 °C im Durchschnitt gleichkommen. Möglicherweise ist dieser Unterschied zu gering, um deutliche Änderungen im Wachstum zusehen. Um diesen Sachverhalt zu untersuchen, müssten Nadellängen entlang eines Höhengradienten gemessen werden. In dieser Arbeit sind die Standorte relativ weit voneinander entfernt und die lokalen Einflussfaktoren, wie lokale Kaltluftsee oder die Exposition, sind stärker als der Einfluss der Höhe über Meer.

Fazit: Die räumlichen Unterschiede zwischen den Standorten bezüglich der Wachstumsparameter werden angedeutet, können aber aufgrund der Datengrundlage nicht näher konkretisiert werden. Der Einbezug von weiteren Standorten auf verschiedenen Höhen ist nötig, um diesen Sachverhalt genügend prüfen zu können.

Die Resultate der Korrelationsanalyse haben gezeigt, dass der Parameter b einen starken signifikanten Zusammenhang mit der mittleren Mai-Temperatur hat. zeigt die Verschiebung des Zeitpunkts des Erreichens der 50%-Nadellänge mit der mittleren Monatstemperatur im Mai. Die 50%-Nadellänge wird pro Grad Temperaturzunahme rund 4 Tage früher erreicht. In einer früheren Studie mit Daten der Nadellängen von Sils Schadenherd und Brail konnte gezeigt werden, dass die Nadellängen Anfang Juni in Prozent der max. Länge mit zunehmender gemittelter April bis Mai Temperatur steigt. Die Korrelationsanalyse des Parameters b konnte jedoch nicht bestätigen, dass sich die Entwicklung um gut 200 Höhenmeter nach oben verschoben hat (Dobbertin und Guigarola 2006). Die anderen Parameter, ausser die absolute Länge am 1.

Juni, zeigten keine signifikante Korrelation mit den monatlichen Temperaturen. Daraus kann gefolgert werden, dass die maximale Nadellänge und die Geschwindigkeit des Wachstums nicht primär von der Temperatur beeinflusst werden. Andere Faktoren wie Genetik, Strahlung oder Bodentemperatur könnten einen Einfluss haben. Die Auswirkungen der Lärchenwicklerausbrüche widerspiegelten sich in der maximalen Länge der Nadeln sowohl in den Ausbruchs- wie auch in den nachfolgenden Jahren. Dies bestätigt auch die Studie von Baltensweiler et al. (2008). Der Einfluss der Temperatur hingegen auf den Beginn der Phänophasen im Frühling haben hingegen etliche Studien dargelegt (Linderholm 2006, Moser 2009). Mit der Entwicklung der Wachstumsperiode der Lärche hat sich eine Studie im Lötschental befasst. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Nadeln ca. 3-4 Wochen vor dem Start des Dickenwachstums spriessen. Der Start der Wachstumsperiode tritt ca. 3-4 Tage verzögert pro 100m Höhe auf. Diese Analyse zeigte weiter, dass sich die Wachstumsperiode durch einen Temperaturanstieg verschiebt (Moser et al, 2009). Diese Erkenntnisse unterstützen die Vermutung, dass sich die Wachstumsperiode durch die Klimaerwärmung in Richtung früheres Auftreten verschiebt.

Weiter zeigten die Jahrringbreiten eine signifikante Korrelation mit den Mai bis Juni Temperaturen des aktuellen und des vorhergehenden Jahres. Das Wachstum des Dickenwachstums startet ca. 3-4 Wochen nach dem Start des Nadelwachstums (Moser et al, 2009). Daher hat wahrscheinlich auch erst die Mai-Temperatur einen Einfluss auf das Dickenwachstum. Weiter muss beachtet werden, dass auf einer Höhe von 1600-1900 m. ü. M. die Temperatur im Mai noch ziemlich tief sein kann. Mit einer zukünftigen Analyse könnte der Zusammenhang zwischen Vegetationstagen oder Temperatursummen und den Wachstumsparametern untersucht werden.

Fazit: Zwischen dem Nadelwachstum, dem Dickenwachstum und der Temperatur besteht für gewisse Perioden im Jahr ein signifikanter Zusammenhang.

Der Frage, ob und wie die Klimaerwärmung das Wachstum der Lärchen beeinflusst ist nicht einfach zu beantworten. Die Resultate der Analyse zeigen Anzeichen, dass sich die Vegetationsperiode in Richtung eines früheren Starts verschiebt. Doch wie stark dieser Einfluss ist und ob an kältere Standorte angepasste Arten wirklich auf die erhöhten Temperaturen mit vermehrtem Wachstum reagieren, bleibt offen. Nebst der Temperatur werden bei der Klimaerwärmung sicherlich auch sich ändernden Niederschlagsverhältnisse eine Rolle spielen. Diese

können das Wachstum, z. B. in Trockentälern, limitieren. Ob die Klimaerwärmung das Wachstumsoptimum nach oben verschiebt, hängt von vielen komplexen Faktoren ab und bedarf weiterer Studien.

Fazit: Es besteht die Vermutung, dass sich die Wachstumsperiode durch die Klimaerwärmung in Richtung früheres Erreichen der 50%-Nadellänge verschiebt.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Resultate dieser Arbeit haben gezeigt, dass die Länge der Nadel kombiniert mit Daten über die Jahrringbreiten und die Temperatur verwendet werden können, um den Einfluss der Klimaerwärmung auf das Wachstum der Lärchen zu untersuchen. Mit Hilfe der modellierten Parameter der logistischen Wachstumsfunktion konnte das Wachstum der Nadellängen räumlich und zeitlich charakterisiert werden. Sowohl in der räumlichen und zeitlichen Analyse hat sich gezeigt, dass sich der Zeitpunkt des Erreichens der 50%-Nadellänge verfrüht. Diese Tatsache legt die Vermutung nahe, dass sich die Wachstumszeit der Nadeln nicht verlängert oder verstärkt, sichtbar durch grössere Werte in den maximalen Nadellängen und in den Wachstumskonstanten, sondern sich die Wachstumszeit verschiebt und das Nadelwachstum verfrüht auftritt. Diese Annahme wird durch das verfrühte Erreichen der 50%-Nadellängen gestützt. Dies ist aber nur eine Vermutung und es darf nicht ausser Acht gelassen werden, dass die Daten der Nadellängen eine grosse Heterogenität aufweisen und die modellierten Parameter nur eine Annäherung für den realen Verlauf des Wachstums liefern. Für zukünftige Analysen ist es wichtig, die Daten von zusätzlichen Standorten miteinzubeziehen. Die erweiterte Analyse der Veränderungen des Wachstums entlang eines Höhengradienten birgt das Potential, die Vermutung des Verschiebens der Wachstumszeit zu bestärken. Eine weitere Möglichkeit ist das Miteinbeziehen von weiteren wachstumsrelevanten Standortfaktoren wie Strahlung und Bodentemperatur. Aber auch phänologische Daten, wie zum Beispiel das Spriessen der Lärchennadeln, können hilfreich sein, um den Verlauf des Wachstums der Nadeln der Lärchen besser zu verstehen.

Literaturverzeichnis

- Auer, C., 1977. Dynamik von Lärchenwicklerpopulationen entlang des Alpenbogens. *Wald Schnee Landschaft* 53:70-105.
- Auer, C., 1975. Jährliche und langfristige Dichteveränderungen bei Lärchenwicklerpopulationen (Zeiraphera diniana Gn.) ausserhalb des Optimumgebietes. *Wald Schnee Landschaft* 48:47-58.
- Baldocchi, D.D. et al., 2005. Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forests with soil temperature and climate data: A synthesis of FLUXNET data. *International Journal of Biometeorology*, 49(6), pp.377–387.
- Baltensweiler, W., 1977. Colour-polymorphism and dynamics of larch budmoth populations (Zeirapheradiniana Gn., Lep. Tortricidae). *Mitteilungen - Schweizerische Entomologische Gesellschaft*, 50, pp.15–23.
- Baltensweiler, W., Schadenbericht und Falterflug. Annual Reports unpupl. *WSL Library*.
- Baltensweiler, W., 1993. Why the larch bud-moth cycle collapsed in the subalpine larch-cembra pine forests in the year 1990 for the first time since 1850. *Oecologia*, 94(1), pp.62–66.
- Baltensweiler, W. & Rubli, D., 1999. Forest Snow and Landscape Research. , 74(1).
- Baltensweiler, W., Weber, U.M. & Cherubini, P., 2008. Tracing the influence of larch-bud-moth insect outbreaks and weather conditions on larch tree-ring growth in Engadine (Switzerland). *Oikos*, 117(2), pp.161–172.
- Battipaglia, G. et al., 2014a. Long-term effects of climate and land-use change on larch budmoth outbreaks in the French Alps. *Climate Research*, 62(1), pp.1–14.
- Battipaglia, G. et al., 2014b. Long-term effects of climate and land-use change on larch budmoth outbreaks in the French Alps. *Climate Research*, 62(1), pp.1–14.
- Boisvenue, C. & Running, S.W., 2006. Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology*, 12(5), pp.862–882.
- Bunn, A.G., 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), pp.115–124.
- Chave, J. et al., 2003. Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: Results from a large census plot in Panama. *Journal of Ecology*, 91(2), pp.240–252.
- Cherubini, P. et al., 2003. Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from mediterranean climates. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 78(1), pp.119–148.
- Dobbertin, M. & Giuggiola, A., 2006. Baumwachstum und erhöhte Temperaturen. *Forum für Wissen*, pp.35–45.
- Eitel, J., 2015. Malojawind- der verkehrte Maloja Wind. *SRF Meteo*.
- Esper, J. et al., 2007. 1200 Years of Regular Outbreaks in Alpine Insects. *Proceedings. Biological sciences / The Royal Society*, 274(1610), pp.671–9.
- Fritts, H.C., 1976. *Tree Rings and Climate*, Academic Press, London
- Gensler, G.A., 1978. Das Klima von Graubünden: ein Beitrag zur Regionalklimatologie der Schweiz, *Schweizerische Meteorologische Zentralanst.*

- Hasenauer, H. et al., 1999. Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. *Forest Ecology and Management*, 122(3), pp.209–219.
- Heinen, M., 1999. Analytical growth equations and their Genstat 5 equivalents. *Netherlands J. Agric. Sci.*, 47(1), pp.67–89.
- Hunt, R. & Parsons, I.T., 1977. Plant growth-analysis: Further applications of a recent curve-fitting program. *Journal of Applied Ecology*, 14, pp.965–968.
- James, D. & Hornik, K., 2015. chron: Chronological Objects which Can Handle Dates and Times. Available at: <http://cran.r-project.org/package=chron>.
- Johnson, D.M. et al., 2010. Climatic warming disrupts recurrent Alpine insect outbreaks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(47), pp.20576–20581.
- Körner, C., 2003. Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*
- Larcher, W., 2001. Ökophysiologie der Pflanzen. 6. Aufl. *Stuttgart, Ulmer*.
- Linderholm, H.W., 2006. Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137(1-2), pp.1–14.
- Loris, K., 1981. Dickenwachstum von Zirbe, Fichte und Lärche an der alpinen Waldgrenze/ Patscherkofel. Ergebnisse der Dendromessungen 1976-79. *Mitt. Forstl. Bundes-Veranst. Wien* 142:416-446, pp.416–446.
- McCarroll, D. et al., 2003. Multiproxy dendroclimatology: a pilot study in northern Finland. *The Holocene*, 13(6), pp.829–838.
- Menzel, A. & Fabian, P., 1999. Growing season extended in Europe. *Nature*, 397(6721), p.659. A
- Muller-Landau, H.C. et al., 2006. Testing metabolic ecology theory for allometric scaling of tree size, growth and mortality in tropical forests. *Ecology Letters*, 9(5), pp.575–588.
- Paine, C.E.T. et al., 2012. How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: An update for ecologists. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(2), pp.245–256.
- Pretzsch, H., 1992. Zunehmende Unstimmigkeit zwischen erwartetem und wirklichem Wachstum unserer Waldbestände - Konsequenzen für zukünftige ertragskundliche Informationssysteme. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 111(1), pp.366–382.
- Rebetez, M., 2001. Changes in daily and nightly day-to-day temperature variability during the twentieth century for two stations in Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, 69(1-2), pp.13–21.
- Sachs, L. & Hedderich, J., 2012. Angewandte Statistik Methodensammlung mit R, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*
- Schweingruber, F., 1996. Tree rings and environment. Dendroecology. *Snow and Landscape Research*, p.609. Berne, Stuttgart, Wien Haupt. 472 p.
- Schweingruber, F., 1989. Tree Rings Basics and Applications of Dendrochronology, *Kluwer Academic Publishers*
- Schweingruber, F.H., 1993. Trees and Wood in Dendrochronology, *Berlin/Heidelberg, Springer*. 402 S.

- Scott, P.A. et al., 1987. Crown Forms and Shoot Elongation of White Spruce at the Treeline, Churchill, Manitoba, Canada. *Arctic and Alpine Research*, 19(2), pp.175–186.
- Sillett, S.C. et al., 2010. Increasing wood production through old age in tall trees. *Forest Ecology and Management*, 259(5), pp.976–994.
- Speer, J.H., 2010. *Fundamentals of tree-ring research*, University of Arizona Press
- Spiecker, H., 1999. Overview of recent growth trends in European forests. *Water, Air, and Soil Pollution*, 116(1-2), pp.33–46.
- Stokes, M.A. & Smiley, T.L., 1968. An introduction to tree-ring dating. *The University of Chicago Press, Chicago and London*.
- Thomas, S.C., 1996. Asymptotic height as a predictor of growth and allometric characteristics in Malaysian rain forest trees. *American Journal of Botany*, 83(5), pp.556–566.
- Weber, U.M., 1997. Dendroecological reconstruction and interpretation of larch budmoth (*Zeiraphera diniana*) outbreaks in two central alpine valley of Switzerland from 1470-1990. *Spinger Verlag Trees* 11:277-290, pp.277–290.
- Wickham, H., 2014. plyr: Tools for splitting, applying and combining data. *R package version 0.1*, 9. Available at: <http://cran.r-project.org/web/packages/plyr/>.
- Wilpert von, K., 1990. Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit von Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde. *Freibg. Bodenkd. Abh. H.24*.
- Winsor, C.P., 1932. The Gompertz Curve as a Growth Curve. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 18(1), pp.1–8.
- Zeide, B., 1993. Analysis of growth equations. *Forest Science*, 39(3), pp.594–616.
- Dobbertin unpubl., Manuskript über den Einfluss der Klimaveränderung auf die Nadellängen.

Anhang

R Code für das Wachstumsmodell

```

model_parameters <- function (DOY, Length, start) {
  # check for na
  DOY <- as.numeric(DOY)
  Length <- as.numeric(Length)

  # creating the if condition that the model will be run in case there is na, otherwise run the model
  if (is.na(sum(Length)) | length(Length) < 1) {
    a <- NA
    b <- NA
    c <- NA
    R2 <- NA
  } else{
    # combine "Length" and "DOY"
    data <- data.frame(cbind(Length, DOY))

    #rename the variables: "value" will be the dependent variable y, "hour" will be the independent variable t in the
    model
    colnames(data) <- c("y", "x")

    #create the model, define the starting values and imply the settings for running the model
    A <-
      try(nls(
        y ~ (y ~ a * exp(b * exp(c * x))), data = data, start = start, trace = FALSE, control = nls.control(maxiter =
500, minFactor = 1 / 5000000)
      ))
    #nls(y ~ a / (1 + exp(-(x-b)/c)), start = list( a=33.060, b =149.88, c=8.988), trace = TRUE)

    #creating the if condition that if the model running faces an error this yearid_doy will be skipped and filled
    with na
    if ('try-error' % n% class(A)) {
      a <- NA
      b <- NA
      c <- NA
      R2 <- NA
    } else{
      model A <-
        nls(
          y ~ a ^ (b * exp(c * x)), data = data, start = start, trace = FALSE, control = nls.control(maxiter =
500, minFactor = 1
/ 5000000)
        )

      #deriving the model parameters and calculating the R2 for a given yearid_doy
      A <- summary(model A)
      B <- A$parameters
      C <- B[, 1]
      RSS <- sum(residuals(model A) ^ 2)
      TSS <- sum((Length - mean(Length)) ^ 2)
      R2 <- 1 - (RSS / TSS)

      # create "parameters" with all the model parameters for every idyear_doy
      a <- C[1]
      b <- C[2]
      c <- C[3]
      R2 <- R2
    }
  }

  result <- list(A = a, B = b, C = c, R2 = R2)
  return(result)
}

data <-
  subset(ALLDATA_2, Site == "Brail" &
    Tree == "B1" & Year == 1978 & DOY < 210)
start = list(a = 33.060, b = -149.88, c = 8.988) # starting values for the model as a list
parameters <-
  ddply(
    data, c("Site", "Tree", "Year"), summarise, .progress = "text", .inform = TRUE,
    A = model_parameters(DOY, Length, start)$A,
    B = model_parameters(DOY, Length, start)$B,
    C = model_parameters(DOY, Length, start)$C,
    R2 = model_parameters(DOY, Length, start)$R2
  )

```

Datenformular

Nadelmessungen		Datum:				Aufnahmepers.:			
Messbeginn:		Messende:				Wetter:			
Ort:	Wolfgang		Flüela		Zuoz Paun Chod		Zuoz Castell		
	prox	dis	prox	dis	prox	dis	prox	dis	
Baum 1									
Baum 2									
Baum 3/3b/3/3									
Baum 4									

Ort:	Brail				Maria Sils		Sils Schadenherd	
	prox	dis	prox	dis	prox	dis	prox	dis
Baum 1b/9/1/1								
Baum 2/10/2/2								
Baum 3/11/3/3b								
Baum 4b/4/4								
Baum 5								
Baum 6								
Baum 7								
Baum 8/-/-/8b								

proximal (prox): zum Stamm hin

distal (dis): vom Stamm weg

Originales Datenformular

Jahresbeginn		1972		BRAIL																				
Baum	Höhe	Pos. Boden	P. d.	P. i.	P. d.	P. i.	P. d.	P. i.	P. d.	P. i.	P. d.	P. i.	P. d.	P. i.	P. d.	P. i.	P. d.	P. i.	P. d.					
1	E	3	gr. X gr. X	2	2	3	3	4	4	6	7	7	8	8	12	16	20	22	30	32	25	32	35	3
2	N	3	gr. X gr. X	2	2	3	4	4	7	7	8	8	9	9	12	13	19	20	23	27	25	32	32	abgeho
3	W	3	gr. L gr. L	1	1	1	3	4	5	8	5	6	6	10	10	17	13	21	16	16	30	25	30	15
4	W	3	gr. X gr. X	2	2	2	3	3	5	6	7	5	6	12	9	16	14	23	20	20	25	28	18	35

Persönliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Münchenbuchsee, 30.09.2015

Alexandra Blatter