

Bodenvegetation und Lichtverhältnisse: Veränderungen über fünfzehn Jahre auf den Langfristigen Waldökosystem-Forschungs-Flächen der Schweiz



Semesterarbeit im 6. Semester

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Von: Sabrina Maurer

Betreuerin: Dr. Anne Thimonier Rickenmann

27. September 2011

Abstract

Auf sieben Flächen der Langfristigen Waldökosystem-Forschung der Schweiz wurden seit 1994 Vegetationsaufnahmen und seit 1996 Lichtmessungen durchgeführt. Diese Aufnahmen fanden zuletzt 2011 statt. Die Vegetation wurde jeweils auf sechzehn 1 m^2 Quadraten auf einer $43 \times 43\text{ m}$ Fläche erhoben, sowie auf einen 500 m^2 Kreis. Auf den Vegetationsquadraten wurde die prozentuale Bedeckung aller vorhandener Moose, Kräuter, Sträucher und Bäume anhand eines $10 \times 10\text{ cm}$ Rasters geschätzt. Auf den Vegetationskreisen wurde die Abundanz-Dominanz der Arten auf der Braun-Blanquet Skala geschätzt. Mit den Vegetationsdaten wurden für jedes Erhebungsjahr und jede Fläche die Anzahl Arten in den Moos- und Krautschichten sowie die Zeigerwerte nach Landolt bestimmt, u.a. für Stickstoff, Licht, Bodensäuregrad und Temperatur. Anhand der Veränderungen dieser Zahlen wurde untersucht, ob Änderungen in den Umweltbedingungen im Zeitraum von 1994 bis 2011 ersichtlich sind. Da Licht ein wichtiger Faktor der Bodenvegetationsdynamik ist, wurden die Lichtverhältnisse ebenfalls regelmässig erfasst, um deren Einflüsse über Vegetationsveränderungen besser zu identifizieren. Für die Bestimmung der Lichtverhältnisse wurde der Blattflächenindex (LAI) verwendet. Dafür wurden zwei Techniken, die hemisphärische Fotografie und der LAI-2000 Plant Canopy Analyzer angewandt. Gemessen wurde jeweils auf den 16 m^2 Quadraten.

Es konnte über die fünfzehn Jahre ein Trend zur Abnahme der Artenzahlen festgestellt werden, deutlicher auf den 500 m^2 Kreisen als auf den sechzehn 1 m^2 Quadraten. Was die Zeigerwerte angeht, konnte kein allgemeiner Trend bestimmt werden. Zwischen den früheren Erhebungen und den Aufnahmen von 2011 hat die Zahl für den Bodensäuregrad tendenziell abgenommen, was auf eine Versauerung über eine Mehrheit der Flächen deuten würde. Allerdings gilt dieses Resultat nur für die 500 m^2 Kreise, nicht für die sechzehn Quadrate. Zudem ist die Differenz des berechneten Bodensäuregrads zwischen den früheren Aufnahmen und 2011 sehr niedrig. Auf fünf der sieben Flächen wurde eine Verdunkelung, auf drei eine Aufhellung beobachtet. Für die Artenzahlen, die berechneten LAI und die Lichtzahlen untereinander wurde kein klarer Zusammenhang gefunden. Dies kann auch an den Methoden liegen, da vor allem die berechneten LAI je nach Wetter und Tageszeit variieren. In einem weiteren Schritt wurden die berechneten LAI der hemisphärischen Fotografie und des LAI-2000 miteinander verglichen. Die beiden Methoden korrelieren gut miteinander.

Inhalt

Abstract	2
Abkürzungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis.....	5
1 Einleitung	6
2 Material und Methoden	7
2.1 Flächen	7
2.2 Vegetationsaufnahmen	7
2.3 Lichtmessungen – LAI-Messungen.....	9
2.3.1 LAI-2000 Plant Canopy Analyzer.....	10
2.3.2 Hemisphärische Fotografie.....	10
2.4 Auswertungen	11
2.4.1 Vegetation.....	11
2.4.2 LAI-2000 Plant Canopy Analyzer.....	11
2.4.3 Hemisphärische Fotografie.....	12
3 Ergebnisse	13
3.1 Trends über fünfzehn Jahre	13
3.2 Vergleich LAI-2000 mit hemisphärischer Fotografie	19
4 Diskussion und Ausblick	21
Literaturverzeichnis	22
Anhang	23

Abkürzungsverzeichnis

LAI	Blattflächenindex (vom Englisch Leaf Area Index)
LWF	Langfristige Waldökosystem-Forschung
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

Die siebzehn LWF Flächen:

ALP	Alptal
BEA	Beatenberg
BET	Bettlachstock
CEL	Celerina
CHI	Chironico
DAV	Davos
ISO	Isonne
JUS	Jussy
LAU	Lausanne
LEN	Lens
NAT	Nationalpark
NEU	Neunkirch
NOV	Novaggio
OTH	Othmarsingen
SCH	Schänis
VIS	Visp
VOR	Vordemwald

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Trends über fünfzehn Jahre.....	16
Tabelle 2: Übersicht Datenaufnahme LWF-Flächen	23
Tabelle 3: Eigenschaften der siebzehn LWF-Flächen.....	24

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schweizer Karte mit LWF-Flächen (Quelle: www.wsl.ch)	7
Abbildung 2: Vegetationsquadrat C1 in Davos (Quelle Foto: WSL)	8
Abbildung 3: Aufbau einer LWF Fläche. (Quelle Foto: WSL).....	9
Abbildung 4: LAI-2000 Plant Canopy Analyzer	10
Abbildung 5: Canon EOS 60D mit Fischaugenlinse. (Quelle Foto: WSL)	11
Abbildung 6: Zunahme der Anzahl Arten in den Kraut- und Moosschichten.....	13
Abbildung 7: Abnahme der Anzahl Arten in den Kraut- und Moosschichten.....	14
Abbildung 8: Zunahme des LAI	14
Abbildung 9: Abnahme des LAI.....	15
Abbildung 10: Zunahme der Lichtzahl nach Landolt	15
Abbildung 11: Abnahme der Lichtzahl nach Landolt.	16
Abbildung 12: Anzahl Arten und Landolt Zeigerwerte für Licht (L), Stickstoff (N), Bodensäuregrad (R) und Temperatur (T) in 2011, gegenüber der Anfangswerte (Mittelwert der entsprechenden Zahlen für die Erhebungen 1994-1998). Links: Werte für die 16 1 m ² Quadrate; rechts: Werte für die 500 m ² Vegetationskreise.	18
Abbildung 13: Trend des LAI.....	19
Abbildung 14: Mittlerer LAI pro Fläche.	20

1 Einleitung

Der Wald besteht nicht nur aus Bäumen, die Bodenvegetation ist ein wichtiger Bestandteil des Waldökosystems. Sie gibt Aufschluss über die Biodiversität. Sie ist auch massgeblich am Wasser- und Nährstoffkreislauf beteiligt und ist unverzichtbar für viele waldbewohnende Tiere. Die Bodenvegetation wird durch verschiedene Faktoren wie zum Beispiel Boden, Klima, Feuchte oder Nährstoffe beeinflusst. Die Artenzusammensetzung der Bodenvegetation dient daher als Indikator der Standortbedingungen und deren zeitlichen und räumlichen Veränderungen (Diekmann, 2003). Verschiedene Studien konnten zum Beispiel zeigen, durch den Vergleich alter und neuer Vegetationsaufnahmen an gleichen Standorten, dass die Bodenvegetation eine Zunahme der Stickstoffverfügbarkeit widerspiegelte (Thimonier et al., 1992). Diese Vegetationsveränderungen wurden auf Stickstoffdeposition zurückgeführt, die wegen menschlich verursachten Stickstoffemissionen in die Luft ab den 1950er-Jahren stark zugenommen hat. Wegen dieser Eigenschaften der Bodenvegetation werden in der Langfristigen Waldökosystem-Forschung (LWF) der Schweiz regelmässig – neben zahlreichen anderen Parametern – die Vegetation aufgenommen. Ein wichtiger Zusammenhang besteht ausserdem zwischen den Lichtverhältnissen und der Bodenvegetation. Ist viel Licht vorhanden, entwickelt sich die Bodenvegetation stärker, als bei einem geschlossenen Kronendach. Um die Vegetationsveränderungen zu identifizieren, die von Änderungen von Lichtverhältnissen verursacht werden, werden die Lichtverhältnisse ebenfalls regelmässig gemessen.

Im Zeitraum von 1995 bis 2003 wurden laut Thimonier et al. (2011) auf siebzehn untersuchten LWF-Flächen, mehrheitlich keine signifikanten Änderungen der Bodenvegetation beobachtet. Als einziger klarer Trend wurde in einem ehemaligen Buchenniedermwald eine Schliessung des Kronendaches beobachtet. Auf einer anderen Fläche reagierte die Bodenvegetation auf einen Windwurf durch den Sturm Lothar im Jahr 1999.

Im Jahr 2011 wurden, das erste Mal nach 2003 wieder für alle 17 LWF-Flächen sowohl Vegetationsaufnahmen, als auch Lichtmessungen durchgeführt. Diese erhobenen Daten erweitern den Untersuchungszeitraum sprunghaft von acht auf sechzehn Jahre. Es stellt sich die Frage, ob nach der doppelten Anzahl Jahre vermehrt Trends auf den LWF-Flächen sichtbar sind. Die Vegetationskundler äusserten nach den Aufnahmen die Meinung, nach ihrer Einschätzung würde der Wald zunehmend dunkler. Dies soll auch mit wissenschaftlichen Daten überprüft werden.

In dieser Arbeit werden zuerst die Langfristigen Waldökosystemforschungs-Flächen vorgestellt und anschliessend die Methoden der Vegetationsaufnahme und der Lichtmessungen erläutert. Im Hauptteil werden die erhobenen Daten auf Trends untersucht und anschliessend in der Diskussion in einen Zusammenhang gesetzt. Des Weiteren werden zwei Methoden der LAI-Messung miteinander verglichen, nämlich die hemisphärische Fotografie und der LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Diese beiden Methoden wurden zwar schon von Thimonier et al. (2010b) einander gegenüber gestellt, doch im 2011 wurde ein neuerer Fotoapparat verwendet. Das neue Modell hat eine viel höhere Auflösung (17 anstatt 4 Megapixel) und mehr mögliche Belichtungszeiten. Es folgen die Diskussion und ein Ausblick auf zukünftigen Forschungsbedarf.

2 Material und Methoden

2.1 Flächen

Die Vegetationsaufnahmen wurden auf siebzehn in der ganzen Schweiz verteilten Flächen der Langfristigen Waldökosystem-Forschung durchgeführt (siehe Abbildung 1). Diese Flächen sind (ausser Davos) seit Mitte der Neunzigerjahre in Betrieb. Die Eigenschaften dieser Flächen sind im Anhang in Tabelle 3 aufgelistet. Zwei wichtige Kriterien für die Auswahl der Forschungsflächen waren die Homogenität der Waldgesellschaft und die strukturelle Gleichförmigkeit der Bestände. Die LWF ist Teil des ILTER, des International Long-Term Ecological Research Networks, sowie des Europäischen ICP-Forests Netzwerks (International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects) (N.N., 22.09.2011). Zuständig für die Langfristige Waldökosystem-Forschung ist die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in Birmensdorf (ZH). Die einzelnen LWF-Flächen werden nach ihrem Ort benannt und in der Regel durch dessen erste drei Buchstaben dargestellt. Die jeweiligen Kürzel sind im Abkürzungsverzeichnis aufgelistet.



Abbildung 1: Schweizer Karte mit LWF-Flächen (Quelle: www.wsl.ch)

2.2 Vegetationsaufnahmen

Auf allen Forschungsflächen wird die Vegetation sowohl auf sechzehn Vegetationsquadraten (siehe Abbildung 2: Vegetationsquadrat C1 in Davos (Quelle Foto: WSL)) als auch auf einem, respektive zwei Vegetationskreisen aufgenommen. Die jeweiligen Aufnahmedaten sind im Anhang in Tabelle 2 aufgelistet. Die sechzehn Vegetationsquadrate umfassen, wie in Abbildung 3 dargestellt, je 1 m² und sind auf einer Fläche von 43 x 43 m im Abstand von elf Meter systematisch verteilt. Die Vegetationskreise sind unterteilt in konzentrische Kreise zu 30, 200, 400 und 500 m² (Thimonier et al. 2011)

Damit ein langfristiges Monitoring garantiert werden kann, sind die Quadrate und die Mittelpunkte der Kreise auf den Flächen mit Pflöcken markiert. Auf den sechzehn Quadraten werden auch Lichtmessungen durchgeführt.

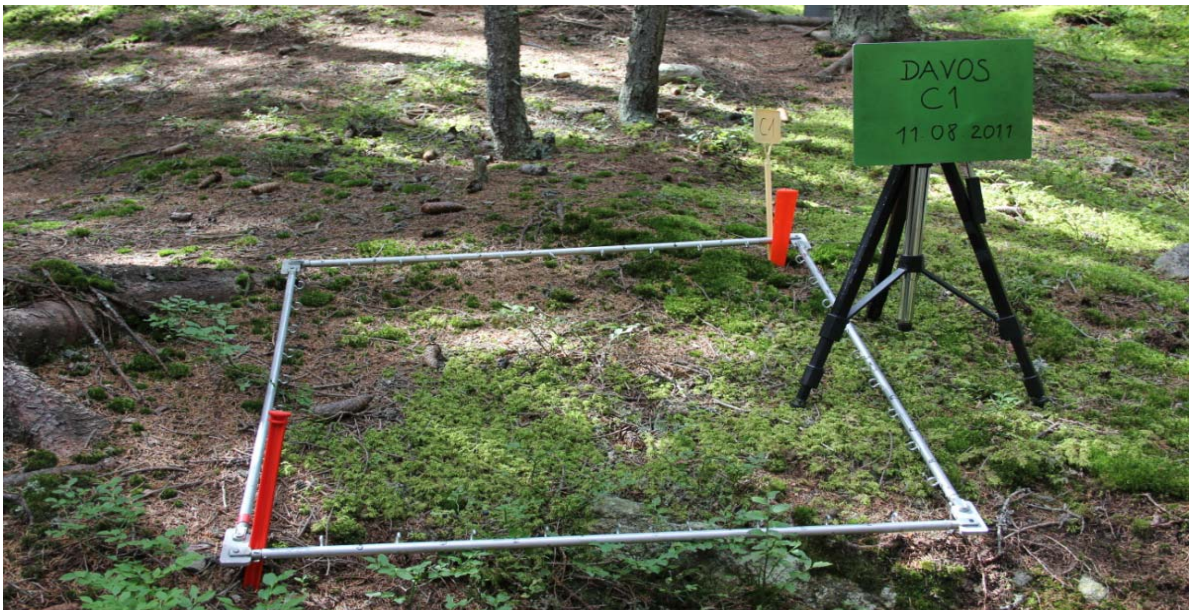


Abbildung 2: Vegetationsquadrat C1 in Davos (Quelle Foto: WSL)

Auf den Vegetationsquadraten wird die prozentuale Bedeckung aller vorhandener Moose, Kräuter, Sträucher und Bäume anhand eines 10 x 10 cm Rasters geschätzt. Die Anteile von offenem Boden, Steinen, Streu, lebendem sowie totem Holz werden ebenfalls in Prozenten kalkuliert.

Auf den Vegetationskreisen wird die Abundanz-Dominanz von Moosen, Kräutern, Sträuchern und Bäumen mittels der Braun-Blanquet-Skala geschätzt (Braun-Blanquet, 1964). Diese Vegetationsaufnahmen werden jeweils von erfahrenen Botanikern alleine oder zu zweit durchgeführt.

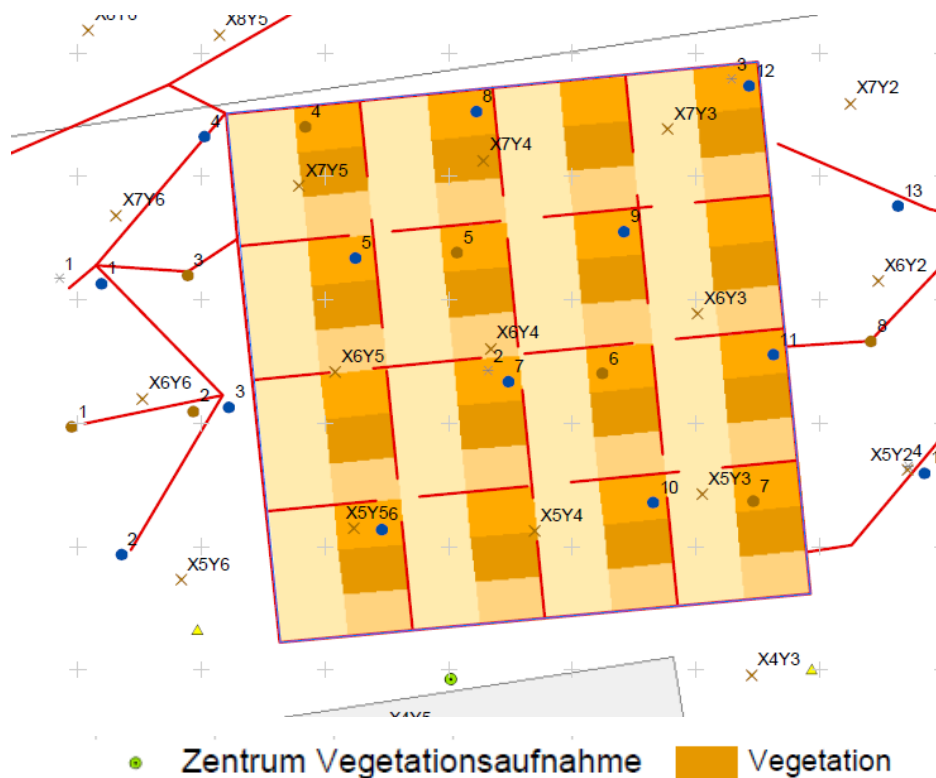


Abbildung 3: Aufbau einer LWF Fläche. (Quelle Foto: WSL)

2.3 Lichtmessungen – LAI-Messungen

Für die Bestimmung der Lichtverhältnisse wird der Blattflächenindex verwendet. Der Blattflächenindex oder LAI (vom Englisch Leaf Area Index) ist definiert als Blattoberfläche über Bodenoberfläche. Für Wälder in der Schweiz sind Werte bis 8 normal (Schleppi et al., 2011).

Eine direkte Messung des LAI ist sehr zeit- und arbeitsintensiv. Deshalb wird oft auf eine direkte Bestimmung verzichtet und stattdessen eine indirekte Methode verwendet. Am weitesten verbreitet sind Techniken, die den LAI durch eine Inversion eines Modells, welches die Strahlungsverminderung durch die Beschirmung beschreibt, bestimmt (Thimonier et al., 2010b). Diese Methode benützt die Messung der Lücken im Kronendach. Dafür verwendet die LWF zwei Techniken, die hemisphärische Fotografie und den LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (LiCor Inc, Lincoln, Nebraska, USA). Im Fall der hemisphärischen Fotografie erhält man die Daten zu den Lücken im Kronendach durch eine Quantifizierung des jeweiligen Anteils der Blätter und des Himmels. Die Fotos werden im Bestand mit dem Objektiv nach oben aufgenommen. Beim LAI-2000 werden Lichtmessungen innerhalb und ausserhalb des Bestandes durchgeführt. So kann der LAI durch das Verhältnis des gefilterten Lichts zum einfallenden Licht berechnet werden. Die beiden Techniken berechnen einen „effektiven LAI“, da das Inversionsmodell von einer zufälligen Verteilung der Blätter aus geht, obwohl dies meistens nicht der Fall ist (die Blätter sind oft aggregiert). Der reale LAI ist höher, doch der effektive LAI widerspiegelt die Lichtbedingungen besser. Der LAI wurde auf den siebzehn Forschungsflächen im Sommer 2011 mit diesen zwei Methoden kurz nach Sonnenaufgang oder vor Sonnenuntergang 1m oberhalb der sechzehn Vegetationsquadrate gemessen. Die Messungen der beiden Geräte fanden jeweils gleich nacheinander statt, um möglichst gleiche Rahmenbedingungen zu haben und somit Verzerrungen durch das Wetter und andere tagesabhängige Faktoren zu vermeiden.

2.3.1 LAI-2000 Plant Canopy Analyzer



Abbildung 4: LAI-2000 Plant Canopy Analyzer

Der in nebenstehender Abbildung 4 zu sehende LAI-2000 Plant Canopy Analyzer ist ein tragbares System mit Lichtsensoren, welche die diffuse Strahlung ($<490\text{ nm}$, da es bei dieser Wellenlänge bei den Blättern keine Transmission des Lichts gibt) messen. Es besteht aus einer Linse mit einem fast hemisphärischen Blickwinkel (150°), die in fünf konzentrische Ringe à je 15° aufgeteilt ist. Ein Gerät, durch ein Operator bedient, misst unter dem Kronendach, während ein zweites Gerät über der Baumschicht respektive im Freiland automatisch misst. Das Gerät im Freiland bildet die Nullreferenz zu den Messungen im Bestand und misst alle 15 oder 30 Sekunden. Unter dem Kronendach bestehen die einzelnen Daten pro Vegetationsquadrat aus dem Mittelwert von vier einzelnen Messungen im Umkreis von ungefähr 20 cm. Die Linse wird mittels einer Libelle waagrecht gehalten, um die Daten mit den Fotos vergleichen zu können.

2.3.2 Hemisphärische Fotografie

Die hemisphärischen Fotos wurden mit einer Digitalkamera (siehe Abbildung 5) vom Modell Canon EOS 60D (Canon Inc, Tokyo, Japan) mit einer zirkularen Fischaugenlinse (Sigma 4,5mm /2.8 EX DC HSM, Sigma Corporation, Tokyo, Japan) aufgenommen (Blickwinkel 180°). Die Kamera wurde mit einer Wasserwaage waagrecht justiert und Mithilfe eines Kompasses nach Norden ausgerichtet. Auf jedem Quadrat wurden mehrere manuelle Fotos und ein automatisches Foto aufgenommen. Für die manuellen Fotos wurde immer ein Blendenwert von 5.6 verwendet und die Lichtempfindlichkeit bei ISO 200 festgelegt. Mit einem Spotmeter, das in einer Kronenlücke, möglichst senkrecht oberhalb des Quadrats, gerichtet wurde, wurde die anfängliche Belichtungszeit festgelegt. Ein Spotmeter, oder Spotbelichtungsmesser, ist ein Gerät, mit dem man den Lichtwert eines sehr engen Bereichs ermitteln kann. Anschliessend wurde in Dreierschritten bis zum Einfachen und weiter bis zum Zweifachen überbelichtet. Insgesamt resultierten auf diese Weise (inklusive automatischem Foto) ungefähr acht Fotos pro Quadrat. Zur Verhinderung von Verzitterungen wurde der Selbstauslöser verwendet. Der Wind kann jedoch durch das Bewegen der Äste bei grösseren Belichtungszeiten eine Unschärfe bewirken.



Abbildung 5: Canon EOS 60D mit Fischaugenlinse. (Quelle Foto: WSL)

2.4 Auswertungen

2.4.1 Vegetation

Für die Vegetationsanalysen wurden nur erste Auswertungen verwendet. Arten, die nicht eindeutig identifiziert werden konnten, wurden von den Auswertungen ausgeschlossen. Für jedes Aufnahmejahr und jede LWF-Fläche wurden die Anzahl Arten in der Moos- und Krautschicht berechnet (jeweils für die 16 Quadrate und die 500 m² Fläche(n)). Ausserdem wurden die mittleren Landolt Zeigerwerte (Landolt, 1977) für Licht (L), Stickstoff (N), Bodenfeuchtigkeit (F), Bodensäuregrad (R), und Temperatur (T) berechnet. Die Werte können die Ziffern 1 bis 5 annehmen, wobei tiefe Zahlen eine geringe, grosse Zahlen hohe Ansprüche für den betreffenden Faktor bedeuten. Die Landolt Zeigerwerte wurden nur anhand der Arten der Krautschicht ohne Sträucher und Bäume berechnet. Trends wurden für jede einzelne LWF-Fläche mit einer linearen Regression über alle Jahre von der ersten Messung bis 2011 ermittelt. Dazu wurde ein Vorzeichen-Rang-Test verwendet, um das Aufnahmejahr 2011 und die Anfangsaufnahmen (Mittelwerte der 1994-1997 Aufnahmen) für alle LWF-Flächen zu vergleichen. Somit konnte untersucht werden, ob ein allgemeiner Trend (d.h. für die meisten Flächen gültig) ersichtlich ist.

2.4.2 LAI-2000 Plant Canopy Analyzer

Da sich viele LWF-Flächen am Hang befinden und es oft keine grosse offene Fläche für die Referenzmessung in der Nähe gibt, wurden für die Auswertungen nur die innersten drei Ringe benutzt. Dies entspricht einem minimalen Anspruch von 50 Gon der Referenzmessung. Es darf höchstens in einem Winkel von 50 Gon bzw. 45 Grad zu einem Hindernis stehen.

Die Daten vom LAI-2000 wurden mit der dazugehörigen Software Li-Cor 1992 verarbeitet. Diese Software berechnet standardmässig den LAI mit der Methode von Miller. Genauere Informationen zu diesen Berechnungen finden sich in (Thimonier et al., 2010b).

2.4.3 Hemisphärische Fotografie

Bei den hemisphärischen Fotos wurde der LAI für die innersten drei Ringe berechnet, um ihn mit den Daten vom LAI-2000 vergleichen zu können. Die hemisphärischen Fotos wurden mit der Software Hemisfer (Schleppi et al., 2007) ausgewertet. Von den unterschiedlich hellen Fotos wurde jeweils dasjenige ausgewählt, welches noch nicht vom Blooming-Effekt beeinträchtigt wurde. Blooming bezeichnet besonders überbelichtete Bildstellen. Die einzelnen Pixel können nur eine beschränkte Anzahl Photonen aufnehmen. Deshalb springen bei steigender Lichtsättigung die überzähligen Lichtquanten auf den benachbarten Pixel über und lassen diesen heller erscheinen (Thimonier et al., 2010b). Es scheint dadurch, als ob die Lücken grösser würden. Da dies eine Verzerrung zur Folge hätte, können diese Fotos nicht für die Auswertungen gebraucht werden. Das ausgewählte Foto wird mit einem Algorithmus von Nobis und Hunziker (2005) in ein Schwarz (Blätter) Weiss (Himmel)-Foto umgewandelt (Thimonier et al., 2010b). Dies geschieht, indem das Programm nach Grenzen mit maximalem Kontrast sucht. Diese Schwellenwerte wurden für jeden Ring einzeln erfasst. In diesem Fall wurde für die Bestimmung des Schwellenwertes nur der blaue Kanal verwendet, da sich dies für den Übergang vom blauen Himmel zur grünen Vegetation eignet (Thimonier et al., 2010b). Bei besonders dunklen Fotos oder Fotos mit vielen dunklen Wolken wurde der Schwellenwert manuell eingestellt, da das Programm Schwierigkeiten hatte, Himmel von Vegetation zu unterscheiden. Zur Berechnung des LAI verwendet Hemisfer neben anderen Methoden auch diejenige von Miller, welche auch von Li-Cor benützt wird.

Viele LWF-Flächen befinden sich am Hang. Wenn der Sensor horizontal gehalten wird, hat das Licht auf der hangabgewandten Seite einen kürzeren Weg durch den Schirm als auf der hangzugewandten Seite. Der Schirm erscheint deshalb hangabwärts lichter und hangaufwärts dunkler. Um diesen Effekt auszugleichen, wird der Winkel nach dem Einzeichnen der Hanglinie auf dem Foto von Hemisfer entsprechend angepasst. Dieser Algorithmus zur Umwandlung des Zenitwinkels in den entsprechenden Einfallswinkel wird in Schleppi et al. (2007) beschrieben.

Einige Fotos mussten vor der LAI-Berechnung mit Hemisfer noch bearbeitet werden. Auf ein paar Fotos sind Flecken vorhanden. Diese Fotos wurden mit der Software IrfanView bearbeitet. Wenn klar ersichtlich war, ob die einzelnen Pixel zur Vegetation oder zum Himmel gehören, wurden sie dunkel bzw. hell eingefärbt. Falls dies nicht der Fall war, wurden die entsprechenden Problemstellen mit roter Farbe übermalt. In Hemisfer wurde anschliessend festgelegt, die roten Stellen nicht in die Berechnungen mitein zu beziehen. Auf wenigen Fotos ist die Sonne direkt sichtbar und erscheint sternförmig in der Nähe des Bildrandes. Diese Blendsterne wurden ebenfalls rot eingefärbt und für die Berechnungen nicht verwendet.

Auf einigen Bildern ist in den äusseren Ringen zusätzlich zum Hang noch ein weiteres Gebirge oder ein Hügel zu sehen. Sie verdunkeln Bereiche, die Himmel wären, so dass diese fälschlicherweise als Vegetation erscheinen. Diese Gebiete wurden ebenfalls rot eingefärbt und von den Berechnungen ausgenommen.

Ein Vorteil der hemisphärischen Fotografie ist, dass keine Referenzmessung benötigt wird. Es kann auch bei helleren Bedingungen gemessen werden (wobei Wolken immer noch ein Problem sind). Es können Hang- und Klump-Effekte korrigiert werden. Die Resultate sind jedoch abhängig von der Wahl des Fotos. Bei dieser Auswahl ist nicht immer klar, welches das geeignetste Foto ist. Die Messungen und Auswertungen mit dem LAI-2000 sind

wesentlich schneller als mit der hemisphärischen Fotografie, was von grossem Vorteil ist. Ein genauerer Vergleich der beiden Methoden findet sich bei Thimonier et al. (2010b).

3 Ergebnisse

3.1 Trends über fünfzehn Jahre

Für den Vergleich der Änderungen des LAI und der Vegetation werden nur die sechzehn Quadrate verwendet. Die Daten der LWF-Fläche in Davos wurden nicht in die Auswertungen miteinbezogen, da die Fläche erst seit 2008 zur Langfristigen Waldökosystem-Forschung gehört und sich deshalb nicht für Trendbestimmungen über Jahre hinweg eignet.

Auf den fünf LWF-Flächen CHI, NAT, NEU, OTH und VIS wurde eine Zunahme der Artenanzahl festgestellt (Abbildung 6). Die rot markierten Flächenkürzel kennzeichnen die Signifikanz. Die Werte von VIS wurden zur besseren Darstellung halbiert. Nur die Zunahme in Othmarsingen ist signifikant.

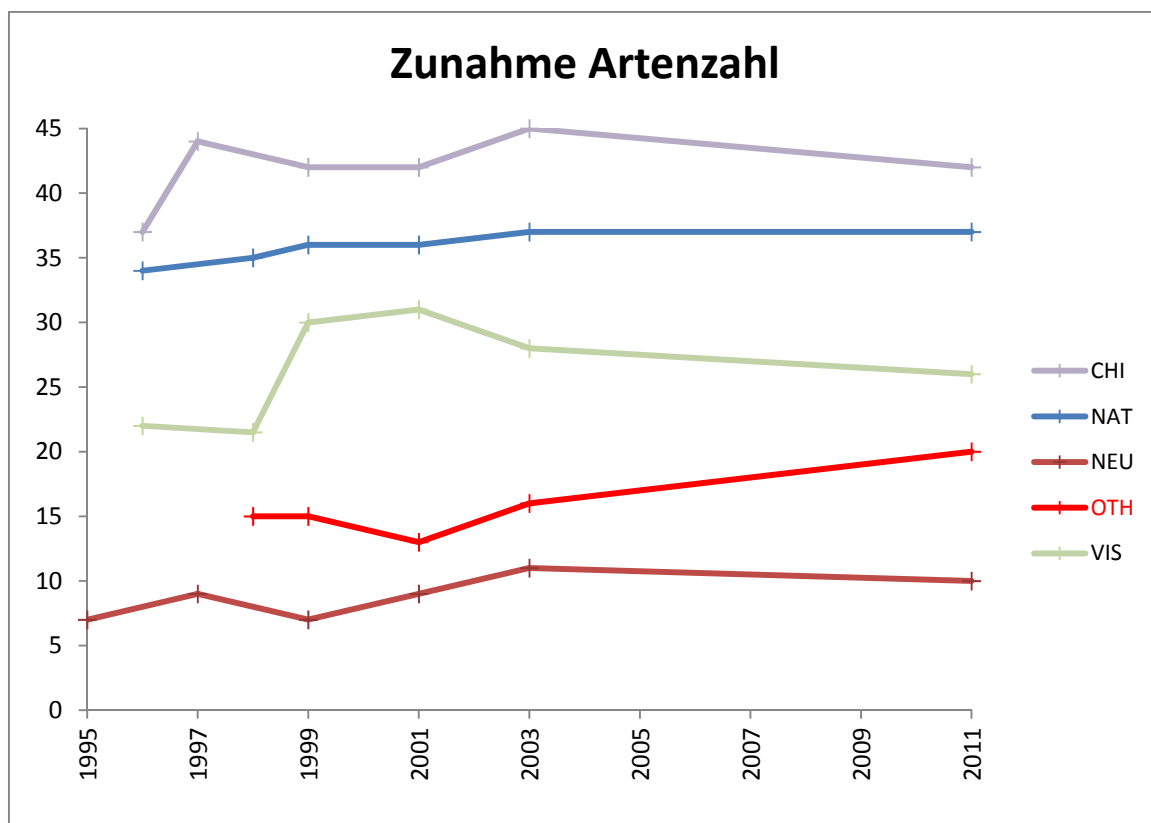


Abbildung 6: Zunahme der Anzahl Arten in den Kraut- und Moosschichten.

Auf den restlichen elf Flächen wurde ein Rückgang der Artenzahl beobachtet (Abbildung 7). Die rot gestrichelten Linien und die rot markierten Flächenkürzel kennzeichnen die Signifikanz. Die Artenzahlen in ALP sind viermal so hoch, wurden hier jedoch zur besseren Darstellung halbiert. Die Abnahme ist in BET, ISO, JUS und NOV signifikant.

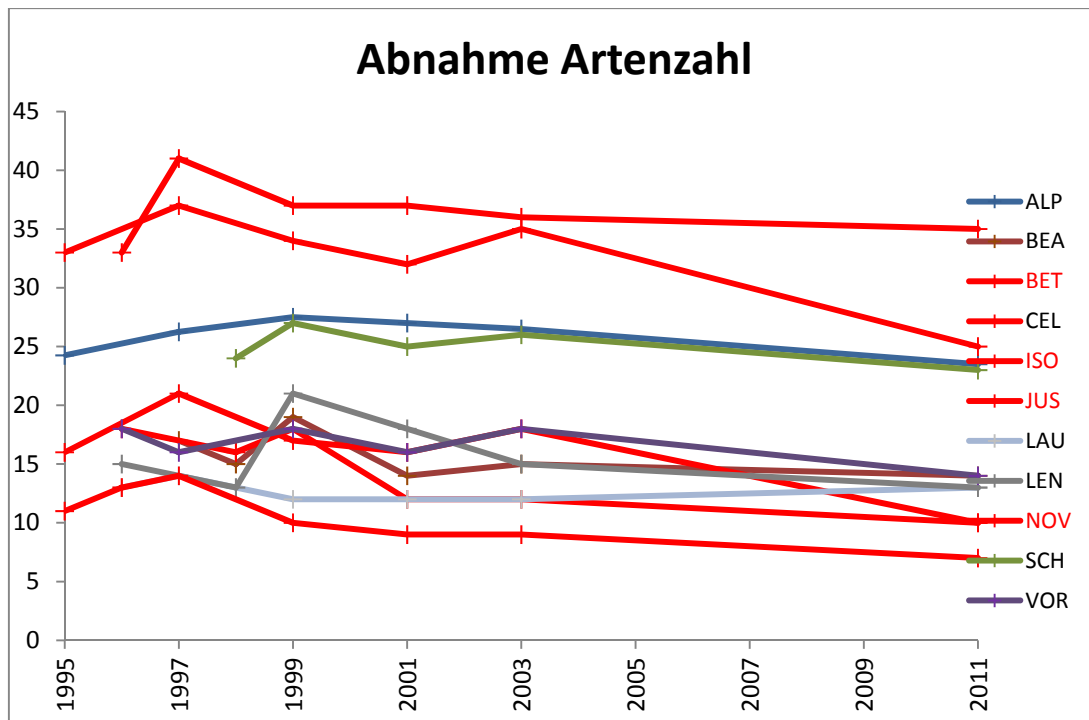


Abbildung 7: Abnahme der Anzahl Arten in den Kraut- und Moosschichten.

Die LAI-Daten von Jussy wurden in den Auswertungen nicht berücksichtigt, da nur zwei anstatt drei oder vier Messresultate für diese Fläche vorlagen. Der mit dem LAI-2000 gemessene Blattflächenindex nimmt auf den Flächen ALP, BEA, BET, CEL, CHI, SCH und VOR zu (Abbildung 8).

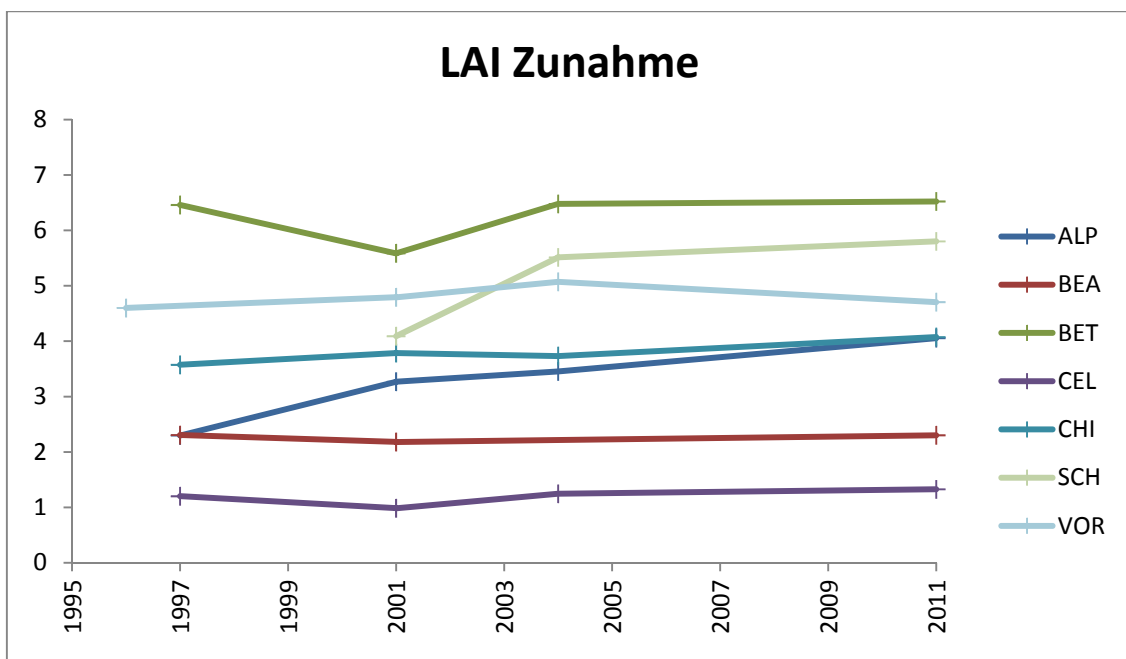


Abbildung 8: Zunahme des LAI

Der LAI nimmt auf den restlichen acht LWF-Flächen von 1995 bis 2011 ab (Abbildung 9).

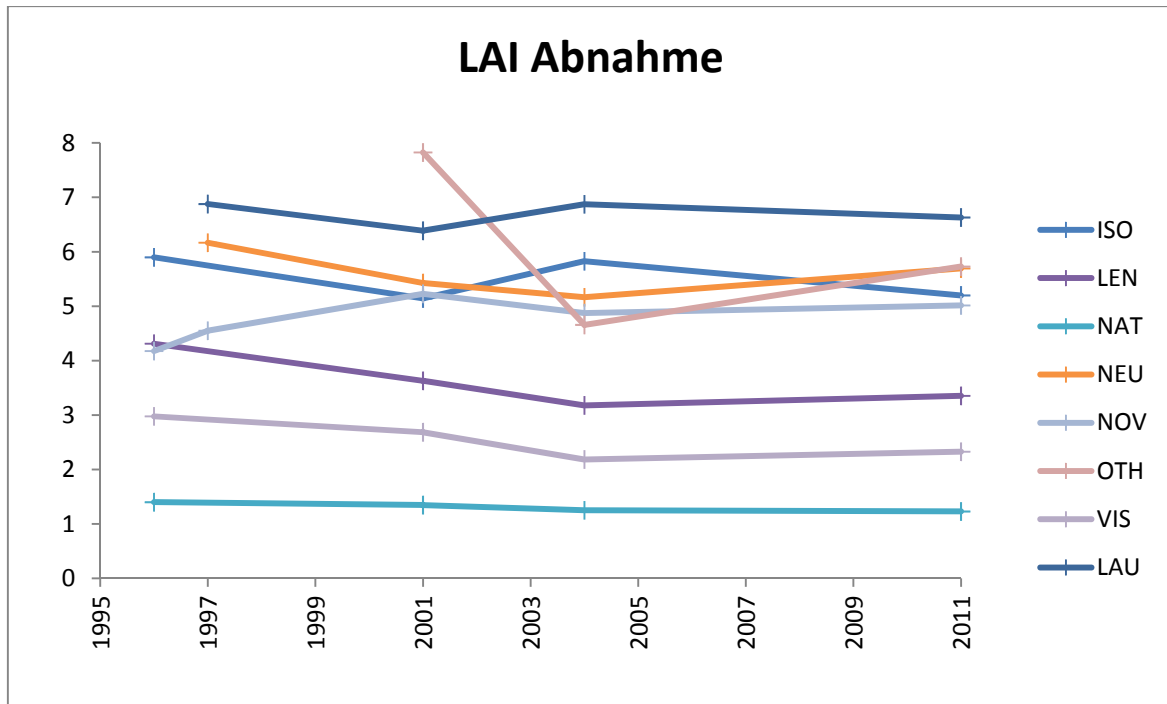


Abbildung 9: Abnahme des LAI.

Die Lichtzahl der ökologischen Zeigerwerte nach Landolt nimmt in BEA, CHI, LAU, LEN, NAT, NEU, OTH und VOR zu (Abbildung 10). Die rot gestrichelten Linien und die rot markierten Flächenkürzel kennzeichnen hier wiederum die Signifikanz. Eine hohe Lichtzahl steht für viele Lichtzeiger, eine tiefe Lichtzahl zeugt von dunkleren Orten. Signifikant sind hier die Zunahmen im Nationalpark und in Othmarsingen.

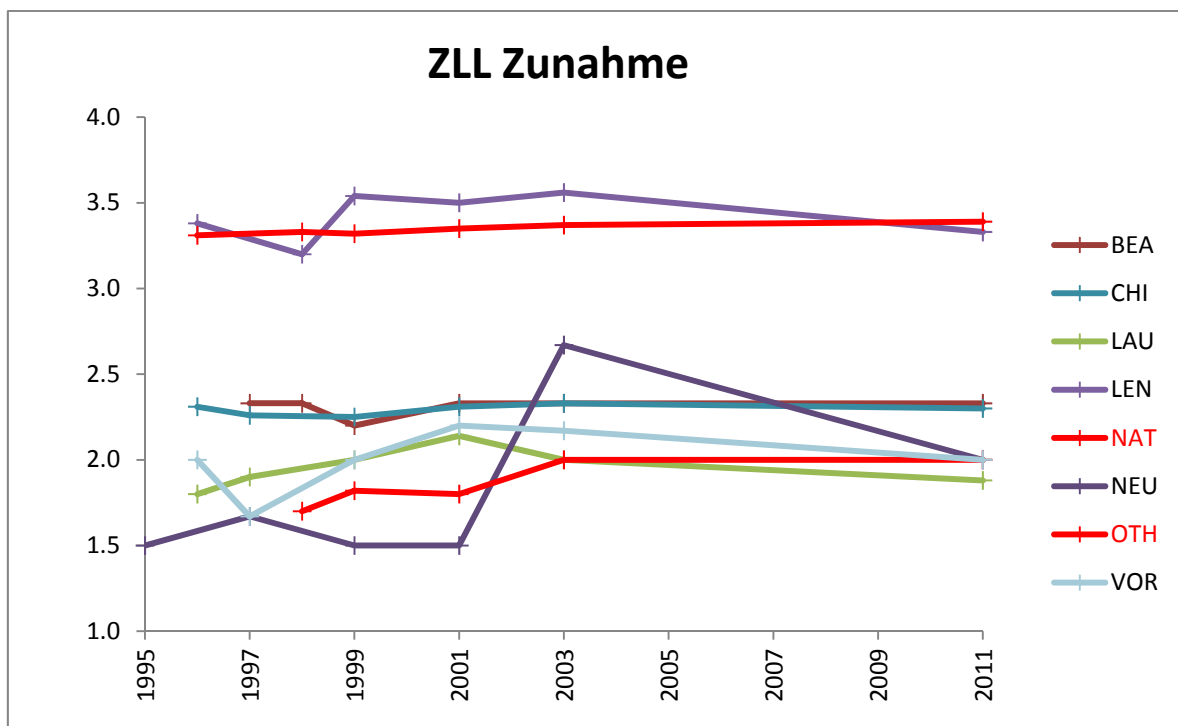


Abbildung 10: Zunahme der Lichtzahl nach Landolt

Auf den anderen acht Flächen (siehe Abbildung 11) verringert sich die Lichtzahl jeweils, wobei die Abnahme in ALP, BET, NOV und JUS signifikant ist (rote Linie sowie rotes Flächenkürzel).

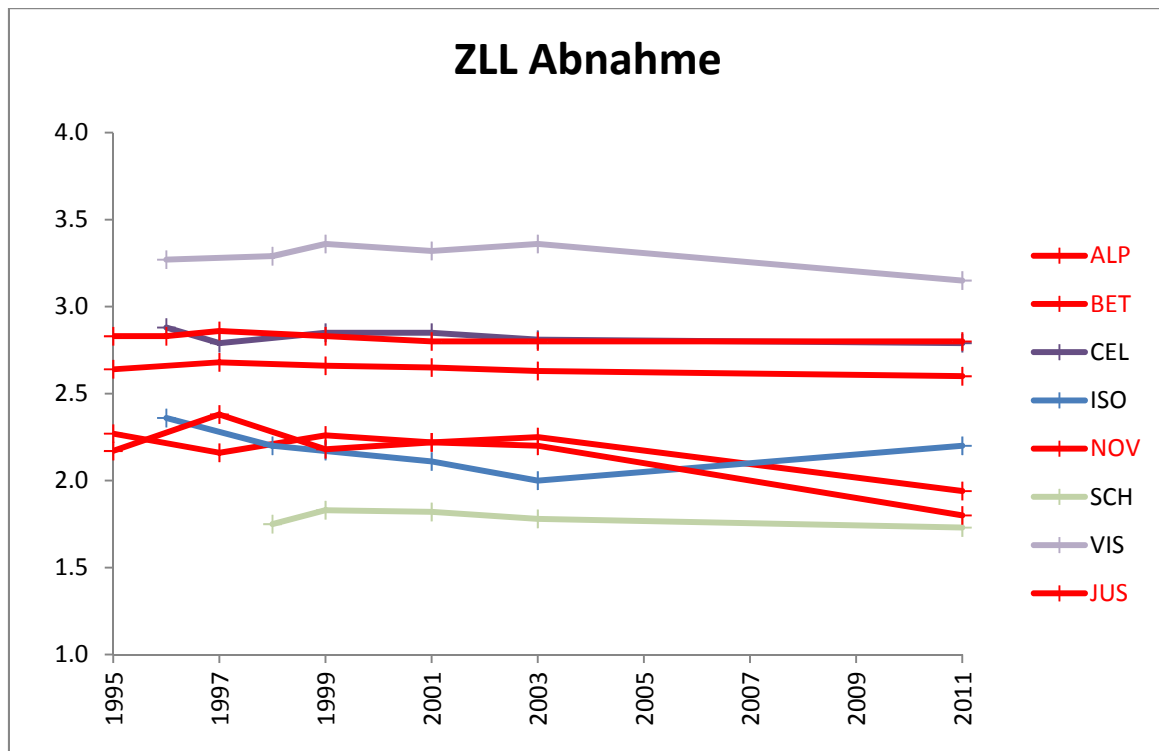


Abbildung 11: Abnahme der Lichtzahl nach Landolt.

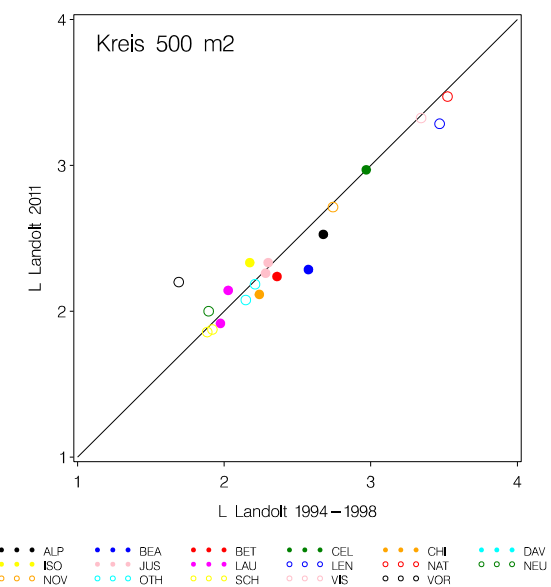
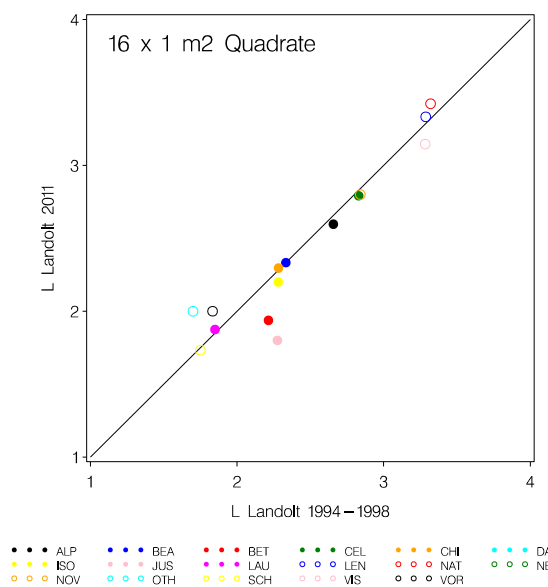
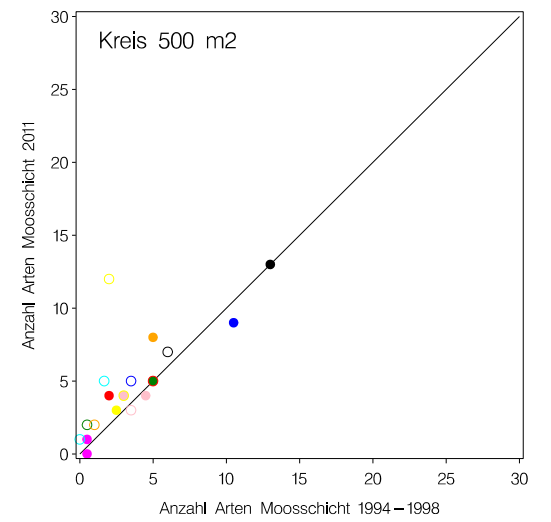
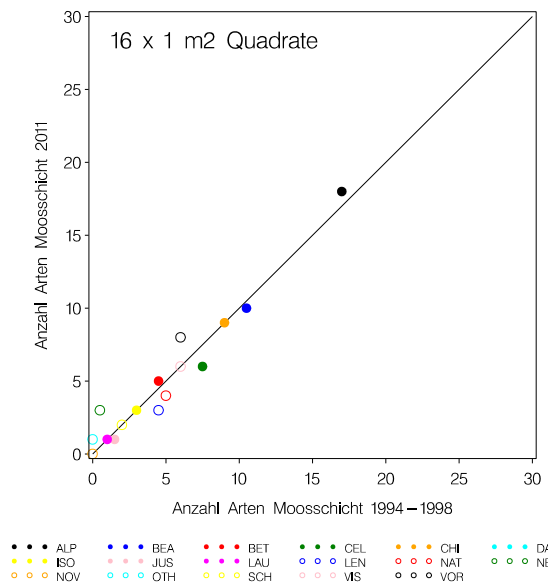
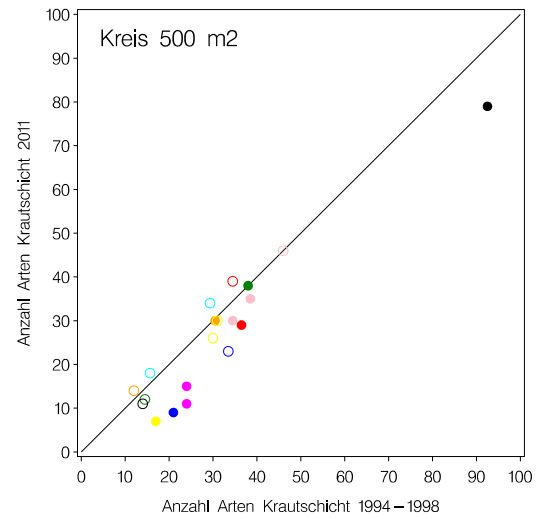
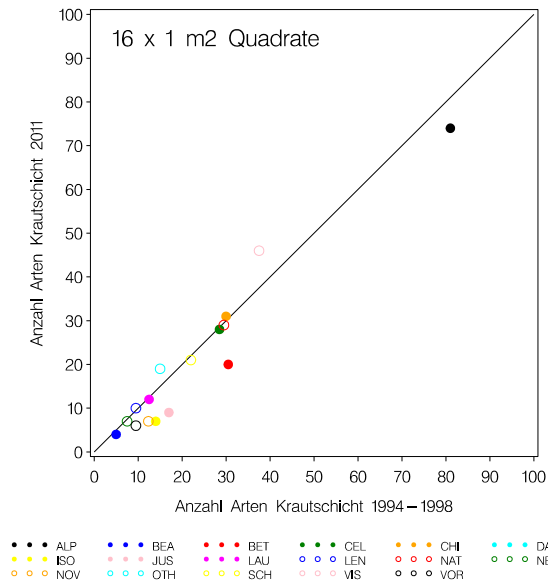
In der untenstehenden Tabelle 1 sind die Veränderungen des LAI, der Artenzahl und der Lichtzahl für die sechzehn Flächen zusammengetragen. Ein + bedeutet eine Zunahme und ein - eine Abnahme. Falls keines der beiden Zeichen vorhanden ist, konnte weder eine Abnahme noch eine Zunahme festgestellt werden. Rote Zeichen bedeuten eine Signifikanz.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Trends über fünfzehn Jahre.

	ALP	BEA	BET	CEL	CHI	ISO	JUS	LAU	LEN	NAT	NEU	NOV	OTH	SCH	VIS	VOR
LAI	+		+	+	+	-	+		-	-	-	-	-	+	-	+
Artenzahl	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	-
Lichtzahl	-	+	-	-	+	-	-	+		+	+	-	+	-	-	+

In ALP, BET, CEL, JUS und SCH findet eine Verdunkelung statt. Der Blattflächenindex steigt, die Lichtzahl nimmt ab und die Anzahl der Moos- und Krautpflanzen geht zurück. Auf den Flächen NAT, NEU und OTH hingegen laufen die Prozesse in die entgegengesetzte Richtung, es wird heller. In CHI, ISO, LEN und NOV ist kein Zusammenhang zwischen Licht und Vegetation sichtbar.

In der untenstehenden Abbildung 12 sind die Artenzahlen und Landolt Zeigerwerte über alle LWF-Flächen von 2011 sowie von den früheren Erhebungsjahren gegeneinander aufgetragen. Wenn ein Punkt oberhalb der 1:1 Linie steht, hat die Zahl für die entsprechende LWF-Fläche zwischen den früheren Erhebungsjahren (1994-1998) und 2011 zugenommen.



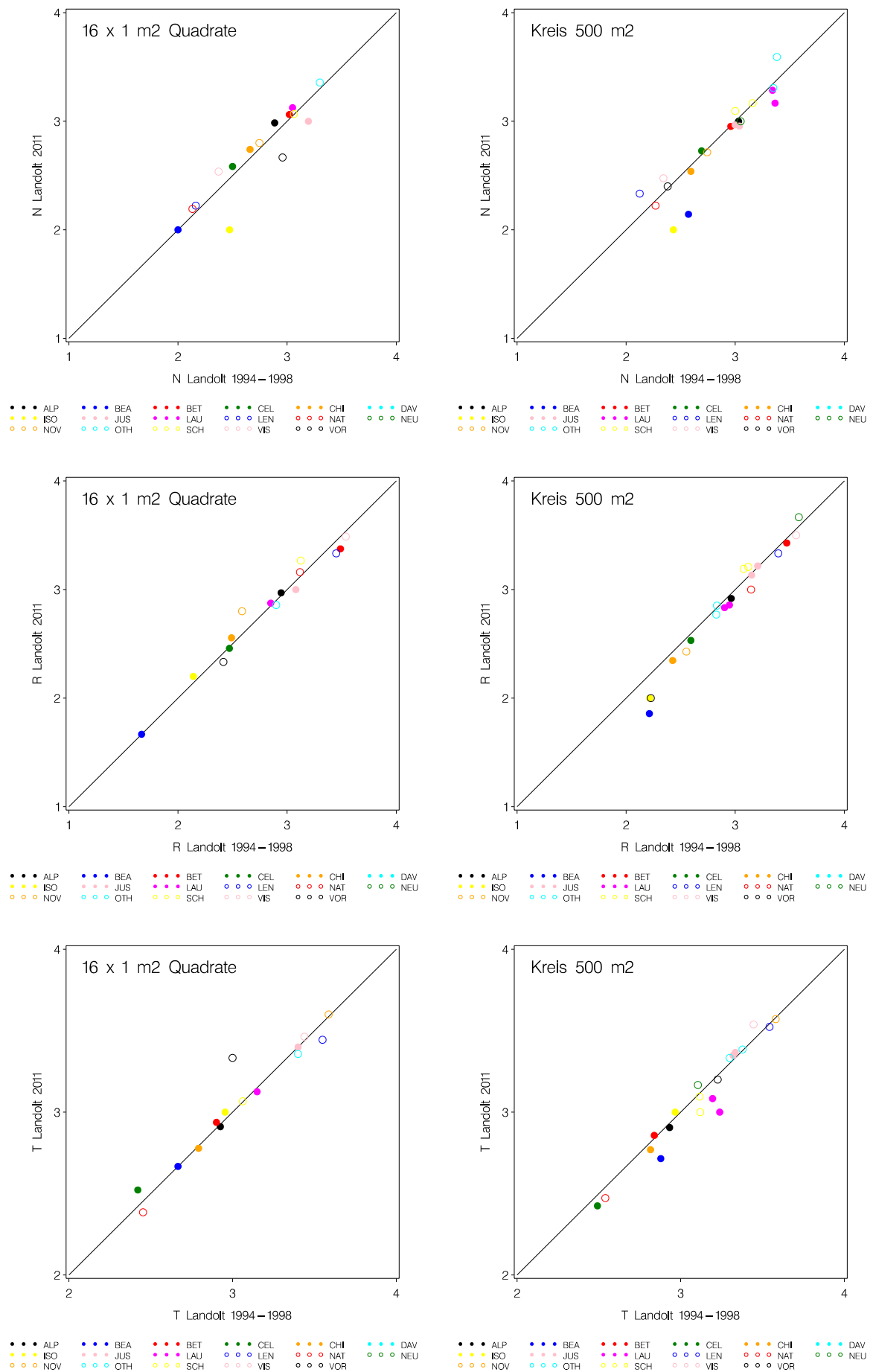


Abbildung 12: Anzahl Arten und Landolt Zeigerwerte für Licht (L), Stickstoff (N), Bodensäuregrad (R) und Temperatur (T) in 2011, gegenüber der Anfangswerte (Mittelwert der entsprechenden Zahlen für die Erhebungen 1994-1998). Links: Werte für die 16 1 m² Quadrate; rechts: Werte für die 500 m² Vegetationskreise.

Bei den Vegetationsquadraten ist keine der Veränderungen zwischen den früheren Erhebungsjahren und 2011 statistisch signifikant (Vorzeichen-Rang-Test). Die Anzahl Arten in der Krautschicht hat aber tendenziell ($P < 0.10$) auf der Mehrheit der LWF-Flächen abgenommen. Die Stickstoffzahl ist für die Mehrheit der Flächen im 2011 höher als von 1994-1998, aber die Mediandifferenz ist niedrig (+0.06) und knapp nicht signifikant ($P = 0.06$).

Bei den Vegetationskreisen ist die Abnahme der Anzahl Arten in der Krautschicht signifikant ($P < 0.01$). Dafür hat die Anzahl Arten in der Moosschicht zugenommen ($P < 0.01$). Insgesamt ist die Anzahl Arten in der Moos- und Krautschicht, verglichen mit den früheren Erhebungsjahren, tendenziell tiefer im Jahr 2011 ($P < 0.10$). Die einzige Landoltzahl, die einen Trend zeigt, ist die R-Zahl, die in 2011 signifikant tiefer ist ($P < 0.05$), was einer Versauerung des Bodens auf den meisten LWF-Flächen entsprechen würde. Die Mediandifferenz zwischen 1994-1998 und 2011 ist aber geringfügig (-0.06).

Für die Jahre 1999 und 2011 ist kein klarer Trend bezüglich des LAI sichtbar (Abbildung 13).

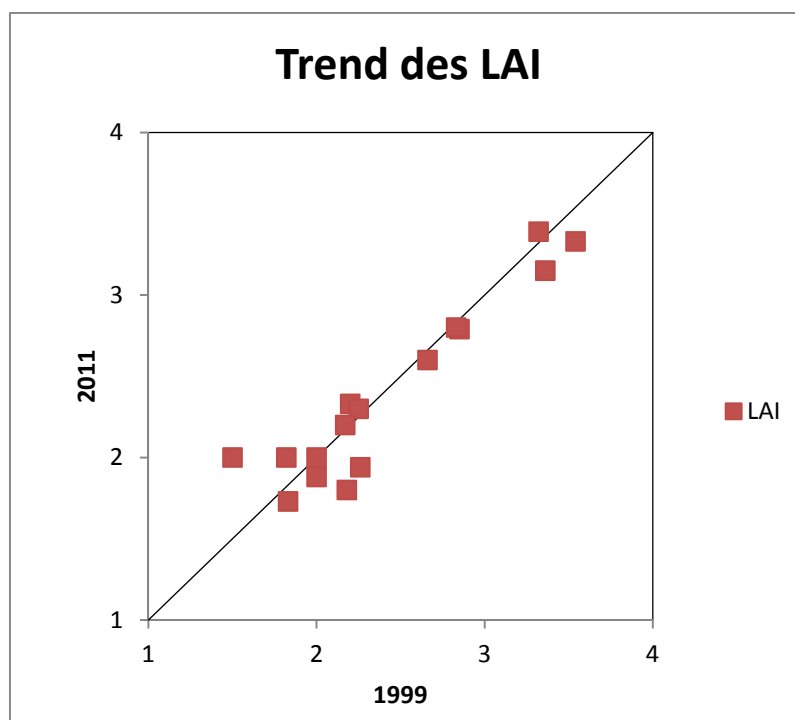


Abbildung 13: Trend des LAI.

3.2 Vergleich LAI-2000 mit hemisphärischer Fotografie

In der untenstehenden Abbildung 14 ist der mittlere LAI pro Fläche dargestellt. Die blaue Linie gibt das Ergebnis der Auswertungen der hemisphärischen Fotografie mit Hemisfer und die rote Linie die Resultate des LAI-2000 Plant Canopy Analyzer wieder. Der berechnete LAI ist von 2011.

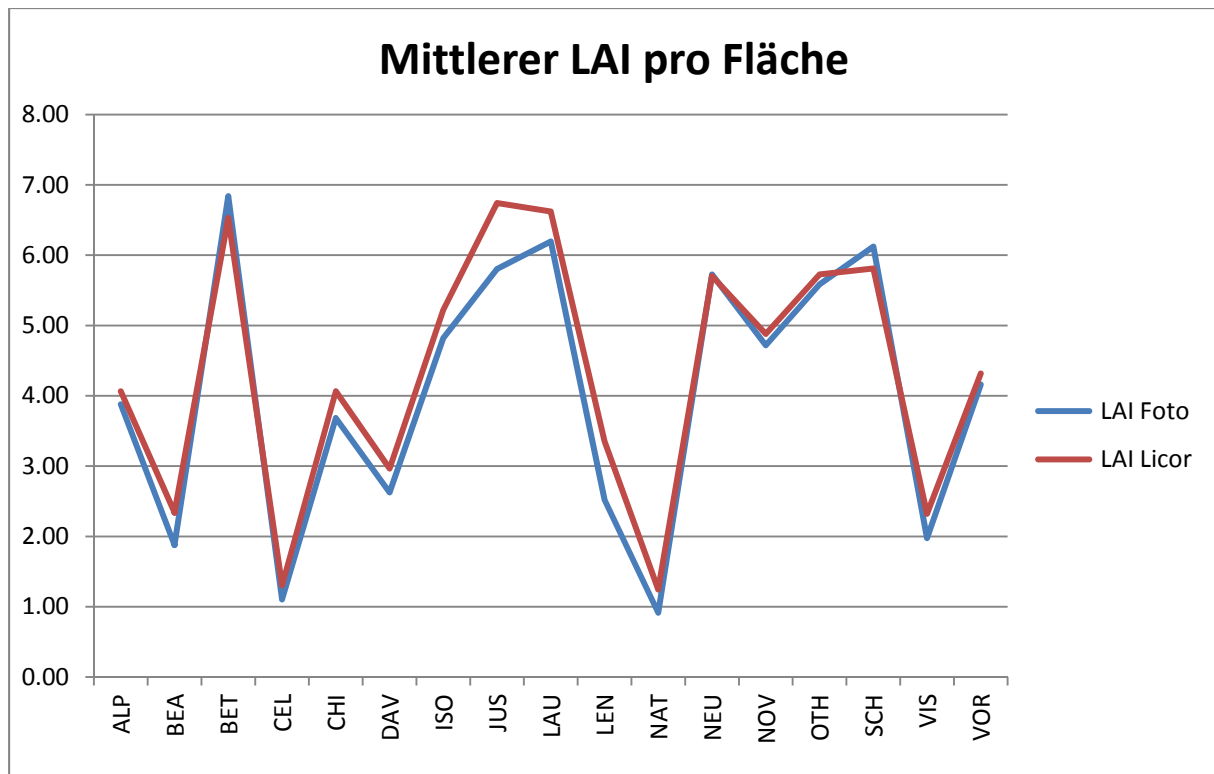


Abbildung 14: Mittlerer LAI pro Fläche.

Die berechneten Blattflächenindexe der beiden Methoden korrelieren gut miteinander. Die Messdaten des LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (LAI Licor) sind tendenziell etwas höher als die Daten der hemisphärischen Fotografie (LAI Foto). In BET, NEU und SCH ist der LAI Foto jedoch höher als der LAI Licor. Diese Messungen wurden bei dunkleren Bedingungen durchgeführt. In Lens und Jussy hingegen ist der Unterschied der zwei Methoden am grössten. Die Differenz der hemisphärischen Fotografie und des LAI-2000 variiert zwischen 0.02 und 0.94.

4 Diskussion und Ausblick

Insgesamt hat sich die Bodenvegetation im Zeitraum von 1995 bis 2003 wenig verändert. Es wird aber über die fünfzehn Jahre ein allgemeiner Trend zur Abnahme der Artenzahlen festgestellt. Dieser Trend ist auf den 500 m² Kreisen deutlicher als auf den sechzehn 1 m² Quadraten. Zwischen den früheren Erhebungen und den Aufnahmen von 2011 hat zudem die Zahl für den Bodensäuregrad tendenziell abgenommen, was auf eine Versauerung über eine Mehrheit der Flächen deuten würde. Allerdings gilt dieses Resultat nur für die 500 m² Kreise. Denn der bei den Quadraten ersichtliche leichte Trend einer Zunahme des N, was auf eine erhöhte Stickstoffverfügbarkeit deuten würde, ist bei den Kreisen nicht erkennbar. Dies begrenzt die Bedeutung dieser Veränderungen stark. Möglicherweise ist der Zeitraum von fünfzehn Jahren zu kurz, um eindeutige Veränderungen zu beobachten. Zudem haben die ersten Aufnahmen in einer Periode stattgefunden, die lange nach dem sprunghaften Anstieg der Luftschadstoffemissionen in den 1950er-Jahren liegt. Zwischen 1995 und 2005 nahmen die Stickstoffemissionen in der Schweiz tendenziell sogar ab.

Dazu unterliegen die Messungen einigen Unsicherheiten. Die Vegetationsaufnahmen sind abhängig von der Anzahl der Botaniker und von der jeweiligen Person. Das Datum der Aufnahme, ob Anfangs, Mitte oder gegen Ende der Vegetationsperiode, ist ebenfalls von Bedeutung. Im Jahr 2011 konnten sich zudem die Vegetationskundler aufgrund des beschränkten Budgets weniger Zeit für die Aufnahmen lassen. Dies hat wahrscheinlich einen grösseren Einfluss auf die Ausführlichkeit der Artenliste bei den Vegetationskreisen als bei den Quadraten (wegen der grösseren Aufnahmefläche), und könnte ein möglicher Grund für die Abnahme der Artenzahl sein. Da aber nur die Anzahl Kräuter abgenommen hat, während die Anzahl Moose im Gegenteil zugenommen hat, ist die Abnahme der gesamten Artenzahl vermutlich real.

Die Abnahme der Artenzahl kann aber auch auf dunklere Lichtverhältnisse zurückgeführt werden. Die LWF-Flächen werden nicht bewirtschaftet, was diesen Effekt noch verstärken sollte. Auf fünf der elf Flächen mit einer Abnahme der Anzahl Arten, nämlich in ALP, BET, CEL, JUS und SCH nahm konsistenterweise der LAI zu und der Lichtfaktor ab. Auf den drei Flächen NAT, NEU und OTH hingegen wurde eine Aufhellung beobachtet – in NEU und OTH durch Sturmschäden verursacht. Bei den restlichen acht Flächen, und damit genau der Hälfte, kann aber keine Gesetzmässigkeit festgestellt werden.

Zum Vergleich: Die Ergebnisse von Thimonier et al. (2010a), welche die Daten bis 2003 beinhalten, zeigen nur zwei Trends, nämlich eine Verdunkelung in ISO und eine Lichtung in NEU. In ISO konnte auch für den verlängerten Zeitraum bis 2011 ein Verlust von Arten und Lichtzeigern festgestellt werden, was für eine Verdunkelung spricht. Der LAI nahm jedoch leicht ab. Die Fläche in Isone ist an sich schon dunkel. Es könnte deshalb gut sein, dass die LAI Unterschiede an der Methode liegen.

Die Unterschiede zwischen den beiden Methoden hemisphärische Fotografie und LAI-2000 Plant Canopy Analyzer könnten mit dem Zeitpunkt der Datenerhebung zusammenhängen. Die Aufnahmen in Bettlachstock, Neunkirch und Schänis ergeben einen höheren LAI auf den Fotos. Auf diesen drei Flächen wurden die Messungen bei dunkleren Bedingungen durchgeführt. In Lens und Jussy hingegen war es bei den Erhebungen schon bzw. noch ziemlich hell. Es ist deshalb anzunehmen, dass bei dunkleren Bedingungen der LAI von den Fotos höher ist und bei helleren Bedingungen der LAI-2000 auf einen höheren Wert kommt. Es stellt sich die Frage, welcher Wert besser der Realität entspricht.

Bei den Lichtmessungen spielen die durchführende Person und vor allem das Wetter eine grosse Rolle. Bei den Auswertungen ist die Wahl der Fotos relevant. Diese und weitere

Faktoren verzerren die Ergebnisse. Deshalb ist es wichtig, dass die Langfristige Waldökosystem-Forschung weitergeführt wird. Mit immer grösseren Datenmengen werden die störenden Effekte zunehmend kleiner und die Ergebnisse aussagekräftiger.

Danksagung

Ich bedanke mich bei Frau Anne Thimonier für ihre tatkräftige Unterstützung bei dieser Arbeit und die spannenden Einblicke in ihre Forschung. Ebenfalls bin ich ihr dankbar für die Möglichkeit meine Arbeit an der WSL schreiben zu dürfen.

Mein Dank geht auch an die verschiedenen Personen, die bei den Vegetationserhebungen und den LAI-Messungen beteiligt waren. Die Vegetation wurde von Herrn Peter Kull (1994-1999), Herrn Walter Keller (2001, 2003, 2011), Herrn Thomas Wohlgemuth, Frau Barbara Moser und Herrn Martin Schütz (2011) aufgenommen. Frau Moser, Herr Wohlgemuth, Frau Maria Schmitt, Herr Peter Waldner und Herr Marco Walser haben bei den LAI-Messungen 2011 mitgeholfen. Herr Patrick Schleppi hat bei der Auswertung der hemisphärischen Fotos mit seiner Software Hemisfer nützliche Hinweise gegeben. Und Herr Peter Jakob hat es ermöglicht, dass die Vegetationsdaten schnell in die Oracle Datenbank eingelesen werden konnten.

Literaturverzeichnis

N.N.: "ICP Forests." www.icp-forests.org, zuletzt am 22.09.2011.

Braun-Blanquet, J. (1964). Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. New York: Springer.

Diekmann, M. (2003). Species indicator values as an important tool in applied plant ecology - a review. *Basic and Applied Ecology* 4: 493-506.

Landolt, E. (1977). Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. Veröffentlichungen des geobotanischen Institutes der Eidg. Techn. Hochschule (Vol. 64), Stiftung Rübel, Zürich.

Nobis, M., & Hunziker, U. (2005). Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128:243-250.

Schleppi, P., Conedera, M., Sedivy, I., & Thimonier, A. (2007). Correcting non-linearity and slope effects in the estimation of the leaf area index of forests from hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144:236-242.

Schleppi, P., Thimonier, A., & Walthert, L. (2011). Estimating leaf area index of mature temperate forests using regressions on site and vegetation data. *Forest Ecology and Management*, 261:601-610.

Thimonier, A., Dupouey, J.L., Timbal, J. (1992). Floristic changes in the herb-layer vegetation of a deciduous forest in the Lorraine Plain under the influence of atmospheric deposition. *Forest Ecology and Management* 55:149-167.

Thimonier, A., Kull, P., Keller, W., Moser, B., & Wohlgemuth, T. (2011). Ground vegetation monitoring in Swiss forests: comparison of survey methods and implications for trend assessments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 147:147-163.

Thimonier, A., Sedivy, I., & Schleppi, P. (2010). Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: A comparison of methods. *European Journal of Forest Research*, 129:543-562.

Anhang

Tabelle 2: Übersicht Datenaufnahme LWF-Flächen

LWF Fläche	# Kreis- flächen	# Quadrate	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2001	2003	2008	2011
ALP	1	16		15-18.08.		06-08.8. *		04-10.08.	07-09.08. *	29-30.07. **		26.-30.07. *
BEA	1	16				29.07. *	29.07.	02.08.	30.07. *	25-28.07.		14.07. *
BET	1	16		18-19.07.		28.07. *		02.07.	03.07. *	02.07. **		01.07. *
CEL	1	16			10-12.09.	04-05.08. *		27-28.07.	25.07. *	21-23.07. **		21.07. *
CHI	1	16			16-18.09.	22.07. *		20-21.07.	23.07. *	18.07. **		05.07. *
DAV	2	16									11.08. *	11.08. *
ISO	1	16			05-06.08. *		13.07.	23.07.	20.07. *	15.07. **		10.08. *
JUS	2	16		24-25.07.		15-16.07.		06.07.	05.07.	04.07. **		28.07. *
LAU	2	16	14-15.07.		24.09.	09-10.07. *		05.07.	06.07. *	07.07. **		29.07. *
LEN	1	16			24-25.07. *		07.07.	12.07.	11.07. *	08.07. **		11.07. *
NAT	1	16			13-14.08. *	22-23.07.		29-30.07.	26.07. *	23-24.07. **		26.08. *
NEU	1	16		28-29.08.		08.07. *		30.06.	02.07. *	30.06. **		28.06. *
NOV	1	16		11.07.		21.07. *		22.07.	17.07. *	17.07. **		04.07. *
OTH	2	16	13.07.			10.07.	20.07.	29.06.	29.06. *	26.06. **		26.06. *
SCH	2	16					21.07.	26.07.	19.07. *	16.07. **		08.07. *
VIS	1	16			22-26.07. *		08.07.	14-15.07.	12.07. *	10.07. **		12.07. *
VOR	1	16			11-12.06. *	17.07.		09.07.	16.07. *	11.07. **		01.08. *

* Die LAI Messungen wurden im gleichen Jahr und der gleichen Saison wie die Vegetationsaufnahmen durchgeführt

** Die LAI Messungen wurden im Sommer 2004 durchgeführt. Es wurden keine grösseren Störungen auf den einzelnen LWF-Flächen beobachtet zwischen dem Sommer 2003 und dem Sommer 2004.

Tabelle 3: Eigenschaften der siebzehn LWF-Flächen

Region und Ort	Code	Breitengrad	Längengrad	Höhe m.ü.M. (m)	Orientierung	Mittlere Neigung (%)	Mittlere Jahres- temperatur (°C)	Mittlerer Jahres- niederschlag (mm)	Hauptbaumart	Bodentyp	Waldgesellschaft (Ellenberg und Klötzli, 1972)
Jura											
Bettlachstock	BET	07°25' E	47°14' N	1149	S	66	6.0	1454	<i>Fagus sylvatica</i>	Rendzic Leptosol	13: <i>Cardamino-Fagetum tilietosum</i>
Neunkirch	NEU	08°32' E	47°41' N	582	N	58	8.3	1020	<i>Fagus sylvatica</i>	Rendzic Leptosol	13: <i>Cardamino-Fagetum tilietosum</i>
Swiss Plateau											
Jussy	JUS	06°17' E	46°14' N	501	flach	3	9.5	960	<i>Quercus robur</i>	Eutric Gleysol	35: <i>Galio silvatici-Carpinetum</i>
Lausanne	LAU	06°40' E	46°35' N	807	NE	7	8.6	1062	<i>Fagus sylvatica</i>	Dystric Cambisol	8: <i>Milio-Fagetum</i>
Othmarsingen	OTH	08°14' E	47°24' N	484	S	27	8.6	1045	<i>Fagus sylvatica</i>	Haplic Acrisol	7: <i>Galio odorati-Fagetum typicum</i>
Vordemwald	VOR	07°53' E	47°17' N	480	NW	14	8.4	1106	<i>Abies alba</i>	Dystric Planosol	46: <i>Bazzanio-Abietetum</i>
Schänis	SCH	09°04' E	47°10' N	733	W	60	7.0	1965	<i>Fagus sylvatica</i>	Eutric Cambisol	13: <i>Cardamino-Fagetum tilietosum</i>
Prealps											
Alptal	ALP	08°43' E	47°03' N	1160	NW	23	5.3	2129	<i>Picea abies</i>	Mollic Gleysol	49: <i>Equiseto-Abietetum</i>
Beatenberg	BEA	07°46' E	46°43' N	1511	SW	33	4.7	1725	<i>Picea abies</i>	Podzol	57: <i>Sphagno-Piceetum calamagrostietosum villosae</i>
Alps											
Davos	DAV	09°51' E	46°49' N	1650	*	22	2.8	1082	<i>Picea abies</i>	Ferralic podzol, Humic Cambisol	58: <i>Larici-Piceetum</i>
Celerina	CEL	09°53' E	46°30' N	1871	NE	34	0.7	816	<i>Pinus cembra</i>	Podzol	59: <i>Larici-Pinetum cembrae</i>
National Park	NAT	10°14' E	46°40' N	1899	S	11	0.9	895	<i>Pinus mugo</i>	Calcaric Fluvisol	67: <i>Erico-Pinetum montanae</i>

Lens	LEN	07°26' E	46°16' N	1063	SE	75	8.0	954	<i>Pinus sylvestris</i>	Haplic Calcisol	64: <i>Cytiso-Pinetum sylvestris</i>
Visp	VIS	07°52' E	46°18' N	695	N	80	8.8	615	<i>Pinus sylvestris</i>	Calcaric Phaeozem	38: <i>Arabidi turritae-Quercetum pubescentis</i>
Southern Alps Chironico	CHI	08°49' E	46°27' N	1365	N	35	5.8	1427	<i>Picea abies</i>	Podzol	47: <i>Calamagrostio villosae-Abietetum</i>
Isonne	ISO	09°01' E	46°08' N	1220	NE	58	7.5	1819	<i>Fagus sylvatica</i>	Podzol	4: <i>Luzulo niveae-Fagetum dryopteridetosum</i>
Novaggio	NOV	08°50' E	46°01' N	950	S	68	9.1	1887	<i>Quercus cerris</i>	Dystic Cambisol	42: <i>Phyteumo betonicifoliae-Quercetum castanosum</i>

* Davos: Hänge mit verschiedener Orientierung (heterogenes Relief)