



AMT FÜR UMWELTSCHUTZ
FÜRSTENTUM LIECHTENSTEIN

Luftqualitätsuntersuchung mit Flechten im Fürstentum Liechtenstein

Dritterhebung 2009





evaluationen

Dr. Kathrin Peter
Spitalgasse 14
CH-3011 Bern

Fon 031 372 20 25
Fax 031 372 00 24

info@evaluationen.ch
www.evaluationen.ch

Bearbeitung des Projektes

>Evaluationen

Kathrin Peter (Projektleitung)
Rebekka Strasser
Andrea Troxler

Meteotest

Beat Rihm, Gradientenkarten

puls

Martin Urech (Stellvertretung Projektleitung)

Martin Dietrich, Kartierung

Bern, Februar 2011

Zusammenfassung

Erstmals wurde 1989 in Liechtenstein die Luftbelastung mit Hilfe der Flechtenindikationsmethode charakterisiert. Die Zweituntersuchung erfolgte 1999. Der vorliegende Bericht beschreibt die Dritterhebung von 2009 und ist mit den beiden ersten Erhebungen in einem 10-Jahresrhythmus abgestimmt.

Baumbewohnende Flechten sind empfindliche Zeiger der Luftverschmutzung. Wegen ihrer Reaktion auf chronische und kleinste Schadwirkungen gelten sie als Frühwarnsysteme. Flechtenuntersuchungen ergänzen technische Immissionsmessungen dadurch, dass sie die Wirkungen der Belastungen messen.

Die Bündner Rheintaler Flechtenmethode ist die spezifische Adaption an die klimatischen Voraussetzungen des Rheintales und angrenzender Gebiete der kalibrierten Flechtenindikationsmethode, welche für das Schweizer Mittelland entwickelt wurde. Sie ermöglicht validierte sowie fein abgestimmte Aussagen über die Flechtensituation in Liechtenstein. Bei der Erhebung werden die Flechten am Stamm von freistehenden Laubbäumen gezählt. Untersucht werden freistehende Laubbäume, deren Stamm nicht beschattet ist. Die Bäume sollen senkrecht gewachsen sein, eine ungestörte Rinde aufweisen sowie einen Stammumfang zwischen 100 und 280 cm haben. Bäume in bewaldeten Gebieten und über 1000 Höhenmeter werden nicht untersucht. Die Bäume, an welchen Flechten gezählt werden, heissen Trägerbäume.

Für die Untersuchungen wurden 2009 426 Bäume erhoben. Diese sind regelmässig über die unbewaldeten Teile des Tal- und Hügelgebiets von Liechtenstein verteilt.

Die Flechten werden innerhalb einer standardisierten Aufnahmefläche gezählt, welche in zehn gleich grosse Flächen geteilt ist. Die Aufnahmefläche umfasst stets den halben Stammumfang und befindet sich immer in Richtung des grössten Flechtenbewuchses. An jedem Trägerbaum wird der Luftgütwert (Index of Atmospheric Purity Bündner Rheintal oder IAPBR) ermittelt. Der IAPBR ist die Summe der Frequenzen der Flechtenarten in der Aufnahmefläche. Die Frequenz einer Flechte kann die Zahl 0 bis 10 annehmen, abhängig von der Anzahl Flächen, in welchen sie vorkommt.

Tiefe Luftgütwerte bedeuten, dass wenig Flechtenarten mit kleinen Frequenzen am Baum vorkommen. Ein tiefer IAPBR-Wert kann auch entstehen, wenn eine oder zwei Arten mit hohen Frequenzen gezählt werden. Die Luft ist bei tiefen Luftgütwerten stark belastet. Hohe Luftgütwerte ergeben sich an Bäumen mit zahlreichen Flechtenarten und hohen Frequenzen. Diese Bäume stehen in unbelasteten Gebieten.

Für die Erstellung der Luftgütekarte werden die Trägerbäume zu Gruppen zusammengefasst. Die Gruppen setzen sich in der Regel aus fünf, stets benachbarten Trägerbäumen zusammen und werden Georäume genannt. Die Luftgütwerte der Einzelbäume werden zum Georaum-IAPBR gemittelt, um eine statistisch abgesicherte Aussage zu erhalten.

Die Bilanz von 1999 über die Luftqualität in Liechtenstein ergab eine grossräumige Verbesserung der Luftqualität seit 1989 in der Talsohle. Die Luftqualität in den Hanglagen hingegen hatte sich seit 1989 bereits verschlechtert. Die Ursachen der veränderten Luftbelastung konnten 1999 durch die Zunahme von Siedlungen, veränderten Emissionsmustern sowie als Erfolge von umgesetzten Massnahmen weitgehend erklärt werden. Bereits bei der zweiten Untersuchung von 1999 zeigte sich die Tendenz, dass

sich die Zusammensetzung des Flechtenbewuchses in Richtung basenliebender Arten verschiebt.

Die Luftgütekarte von 2009 zeigt wie bereits 1999 nur drei von fünf möglichen Luftgütezonen. Die rote Zone mit sehr wenig Flechtenbewuchs sowie die blaue Zone mit normalem Flechtenbewuchs sind nicht mehr vorhanden. Orange Gebiete mit wenig Flechtenbewuchs machen die grösste Fläche aus. Beinahe die ganze Talsohle von Liechtenstein inklusive ein kleines Gebiet in Ruggell gehören dazu. Das übrige Gebiet ist, mit Ausnahme eines kleinen grünen Gebietes oberhalb von Triesenberg, gelb eingefärbt. Dies steht im Gegensatz zu den Luftgütekarten von 1989 und 1999, wo gelbe Zonen jeweils die grössten Anteile der Untersuchungsfläche bedeckten.

In der Differenzkarte 2009 sind die Veränderungen der Luftgüte von 1999 zu 2009 dargestellt. In mehr als drei Viertel der untersuchten Landesfläche ist der Luftgütewert nachweislich gesunken.

Im ganzen Untersuchungsgebiet verbesserte sich die Situation nur an einem Ort, nämlich im Siedlungsgebiet von Schaan.

Laut Gradientenkarte 2009 gehören die Autobahnzufahrten bei Buchs und Sevelen sowie die Hauptverkehrsachse nach wie zu den grössten Belastungsquellen in Liechtenstein.

Die Acidoidindexkarte zeigt, an welchen Standorten die basentolerierenden Flechtenarten im Verhältnis zu den säuretolerierenden Arten überwiegen. Basische Bedingungen herrschen in Liechtenstein vor. Der basische Einfluss ist nicht lokal verbreitet. Es handelt sich dabei um ein landesweites Phänomen. Dieses dringt vom Süden her nach Norden in den letzten 20 Jahren vor.

Die Karte des Nitroindex 2009 (NH3SCORE) zeigt, dass die grössten Ammoniakbelastungen in den landwirtschaftlich genutzten Gebieten im Tal zu finden sind. Am stärksten belastet sind locker besiedelte, verkehrsreiche und landwirtschaftlich intensiv genutzte Gebiete bei Nendeln, Eschen und Mauren.

Die Anzahl der gefundenen Flechtenarten ist seit 1989 gleich hoch geblieben. Verändert hingegen haben sich ihre Häufigkeiten. Zwei Drittel der Flechten kommen weniger häufig vor als noch vor 10 Jahren.

Toxitolerante Flechten widerstehen Schadstoffen besser als empfindliche Arten. Im Gegensatz zur Zeit von 1989 bis 1999, wo Zu- und Abnahme der Häufigkeiten von Flechtenarten im Gleichgewicht war, verlief die Entwicklung von 1999 bis 2009 einseitig. Die empfindlichen nehmen stärker ab als die unempfindlichen Flechtenarten.

Die Toxitoleranz der Flechten ist gestiegen. Im 1989 und im 1999 waren die meisten Flechtenarten noch als wenig empfindlich einzustufen. Im 2009 sind die toleranten und somit die unempfindlichen Flechten am häufigsten. Sehr empfindliche und empfindliche Flechtenarten gibt es gar keine mehr.

Entropie ist ein Mass für die Informationsdichte eines Systems. Je höher die Informationsdichte desto grösser ist die Flechtenvielfalt. Die Vielfalt von 2009 ist kleiner als 1989 und 1999. 1999 und 1989 war die Vielfalt gleich hoch.

Wir vermuten, dass Extremwerte der Feinstaub- und Ozonbelastungen von 2003 und 2006 zusammen mit den Ammoniakimmissionen in den vergangenen Jahren einhergehend mit den steigenden Temperaturen und der vermehrter Trockenheit nun mehr als einen kritischen Level für Flechten erreicht haben könnten.

Durch den Klimawandel, verbunden mit Temperaturanstieg und Trockenheit, stehen die an die früheren Bedingungen zonal angepassten Flechten unter zusätzlichen Anpassungsstress. Es ist möglich, dass unter solch raschen Standortveränderungen kleinere und chronische Schadstoffkonzentrationen auch weniger toleriert werden als unter klimatisch normalen Bedingungen.

Die Degradation der Flechten scheint zonal-regionalen Regeln zu folgen. Vermutet wird, dass neben der Gesamtbelastung der Luft als Ursache, die regionalen Auswirkungen des Klimawandels beim Rückgang der Flechten ebenfalls eine Rolle spielen könnten.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	7
2	Ziele	9
3	Methode	10
4	Erhebungsdaten	12
4.1	Trägerbäume	12
4.2	Georäume	14
5	Luftgüte	15
5.1	Einzelbaumauswertung 2009	15
5.2	Einzelbaumauswertungen im Vergleich	18
5.3	Berechnung der Luftgütezonen	21
5.4	Luftsituation 2009	22
5.5	Luftgüte im Vergleich	23
5.5.1	Luftsituation 1999	23
5.5.2	Luftsituation 1989	23
5.5.3	Vergleich der Luftsituation von 1989 bis 2009	24
5.6	Luftgütekarten 1989 – 2009	25
6	Gradientenkarten	27
6.1	Berechnung	27
6.2	Gradienten 2009	28
6.3	Gradientenkarten im Vergleich	29
6.4	Gradientenkarten 1999 und 2009	30
7	Differenzkarten	32
7.1	Berechnung	32
7.2	Beschreibung der Differenzkarte 2009	33
7.3	Beschreibung der Differenzkarte 1999	34
7.4	Vergleich der Differenzkarten	35
7.5	Differenzkarten 1999 und 2009	36
8	Liechtensteiner Acidoindex	38
8.1	Berechnung	38
8.2	Acidoindex 2009	40
8.3	Vergleich der Acidoindexkarten	41
8.4	Acidoindexkarten 1989 – 2009	42
9	Flechten-Nitroindex (NTOTSCORE und NH3SCORE)	44
9.1	Grundlagen der Methodenentwicklung (CH-Daten)	44
9.2	Berechnung der Scores	46
9.3	Stickstoff- und Ammoniakbelastung in Liechtenstein	47
9.3.1	Belastung Gesamtstickstoff (NTOTSCORE)	47
9.3.2	Belastung Ammoniak (NH3SCORE)	49
10	Flechten-Diversität	52
10.1	Häufigkeit der Flechtenarten	52
10.2	Toxitoleranz	55
10.2.1	Berechnung	55
10.2.2	Toxitoleranz 2009	55
10.2.3	Veränderung der Toxitoleranz	57
10.3	Entropie	58
11	Schlussfolgerungen	59
11.1	Klären methodischer Ursachen	61
11.2	Natürliche Veränderungsprozesse	64
11.2.1	Einzelbaumauswertung	64

11.2.2	Artenzahl pro Baum und Zone.....	64
11.2.3	Artenvielfalt pro Zone	64
11.2.4	Acidindex.....	65
11.2.5	Artenzahl und mittlere Frequenzen einzelner Flechtenarten und -gruppen	65
11.2.6	Entropie	65
11.3	Änderung Standortfaktoren	66
11.4	Lufthygiene	68
11.4.1	Lufthygiene in Liechtenstein.....	68
11.4.2	Immissionsdaten	69
11.4.3	Lufthygiene in der Schweiz	73
11.4.4	Vergleich Liechtenstein – Schweiz.....	75
11.5	Empfehlungen.....	76
11.5.1	Extremereignisse.....	76
11.5.2	Ammoniak	76
11.5.3	Klima	77
11.5.4	Wissenslücken	77
12	Literaturverzeichnis	78
13	Anhang	80
13.1	Legende zu den Originaldaten	80
13.2	Tabelle Häufigkeit der Flechtenarten	83
13.3	Durchschnittliche Frequenz, Artenvielfalt und Anzahl Bäume der Baumklassen ...	84

1 Ausgangslage

Baumbewohnende Flechten sind empfindliche Zeiger der Luftverschmutzung. Der Luftgütewert IAPBR¹ ist das Messergebnis der Wirkungen aller Schadstoffe vor Ort auf die Vitalität von Flechten. Aufgrund ihrer Eigenschaften eignen sich Flechten zur Früherkennung auch chronischer und kleinster Schadwirkungen. Die Flechtenuntersuchungen ergänzen die klassischen Immissionsmessungen bestens. Mit der Bioindikationsmethode mit Flechten lassen sich als wichtigstes Produkt flächendeckende Karten der Gesamtluftbelastung herstellen.

Die Bioindikationsmethode mit Flechten wurde 1984 für das Schweizer Mittelland im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes 14 „Lufthaushalt und Luftverschmutzung in der Schweiz“ entwickelt (kalibrierte Flechtenindikationsmethode). Die Bündner Rheintaler Flechtenmethode (IAPBR) ist die spezifische Adaption an die klimatischen Voraussetzungen des Rheintales und angrenzender Gebiete. Sie wurde im Zusammenhang mit der ETH Fallstudie „Ökologische Planung – Bündner Rheintal“ 1985 – 1986 entwickelt und ermöglicht validierte sowie fein abgestimmte Aussagen über die Luftverschmutzung vor Ort. Eine Methodenevaluation für Liechtenstein ergab, dass die Bündner Rheintaler Methode im Gegensatz zur „Mittelland – Methode“ die Belastungssituation in Liechtenstein sehr differenziert darstellt (puls, vormals AGB, 1991).

1989 wurde in Liechtenstein die Luftbelastung erstmals mit Hilfe der Flechtenindikationsmethode charakterisiert. Zusätzlich zur Indikation der Gesamtbelastung wurde ein Monitoring der Einzelstoffbelastung durchgeführt (puls, vormals AGB 1991²). Die Zweituntersuchung mit der Bündner Rheintal Flechtenmethode erfolgte 1999 (puls 2000³). Die Resultate der biologischen Luftqualitätsuntersuchungen wurden der Öffentlichkeit und speziell der Presse anhand einer Broschüre und einer Veranstaltung mit Führung vorgestellt.

Die Bilanz der Luftqualität in Liechtenstein von 1989 – 1999 ergab eine grossräumige Verbesserung der Luftqualität in der Talsohle, insbesondere in den Siedlungsgebieten. Verschlechtert hatte sich hingegen die Luftqualität in den Hanglagen. Die Ursachen der veränderten Luftbelastung konnten mit der Zusammensetzung der Emissionen und als Erfolge der umgesetzten Massnahmen weitgehend erklärt werden. Der Vergleich der Flechtenvegetation 1989 mit 1999 dokumentiert ebenfalls, dass sich die Flechtenartenzusammensetzung in Richtung basenliebender Arten verschoben hatte.

¹ Index of Atmospheric Purity, Luftgütewert, Bündner Rheintal: Summe der Frequenzen aller berücksichtigten Flechtenarten in Liechtenstein. Der IAPBR-Wert ist ein Mass für Immissionsbelastungen. Je höher der IAPBR-Wert, desto geringer ist die Gesamtimmisionsbelastung der Luft.

² puls, vormals AGB 1991, Luftqualitätsuntersuchungen mit Flechten im Fürstentum Liechtenstein, Schlussbericht.

³ puls 2000, Erhebung der Immissionsbelastung im Fürstentum Liechtenstein – Zweiterhebung, Projektbericht zuhanden des Amtes für Umweltschutz des Fürstentums Liechtenstein.

Der vorliegende Bericht beschreibt die Dritterhebung und ist mit den beiden ersten Erhebungen in einem 10-Jahresrythmus abgestimmt. Ebenfalls fügt sich die Flechtenuntersuchung optimal als Puzzlestein in eine mögliche Erhebung des benachbarten Rheintales ein.

Der Bericht gliedert sich in drei Teile. Der erste Teil (Kapitel 2-3) beschreibt die Ziele der vorliegenden Untersuchung erklärt, wie die Flechtenerhebungen und die Auswertungen erfolgen. Im zweiten Teil (Kapitel 4-10) werden die Resultate der aktuellen und vorangegangenen Untersuchungen dargestellt und verglichen. Im dritten Teil (Kapitel 11-12) werden die Schlussfolgerungen und die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst sowie erklärt. Ein Ausblick schliesst zusammen mit Empfehlungen den Bericht ab. Im Anhang sind die Legende des Protokollblattes, die Tabelle mit der Häufigkeit der Flechtenarten, die durchschnittliche Frequenz, Artenvielfalt und Anzahl Bäume der Baumklassen sowie sämtliche Erhebungsdaten aufgeführt.

2 Ziele

Die dritte Flechtenuntersuchung hat zum Ziel:

- die aktuelle Luftsituation von 2009 vergleichbar mit den Erst- und Zweituntersuchungen (1989 und 1999) zu erheben
- die Luftqualität von 2009 aufzuzeigen, zu erklären und zu den Veränderungen seit 1989 – 1999 in einen plausiblen Zusammenhang zu stellen
- als Erfolgskontrolle die Wirksamkeit der getroffenen lufthygienischen Massnahmen zu belegen
- mögliche Erklärungen der gewonnenen Resultate aufzuzeigen
- den Bedarf an weiteren Massnahmen darzulegen und räumlich zu differenzieren
- als Grundlage für die Öffentlichkeitsarbeit zur Luftreinhaltung zu dienen.

Die Untersuchungen sind ausserdem abgestimmt zu benachbarten Flechtenerhebungen, z.B. Bündner Rheintal und Appenzell Ausserrhoden und weiteren möglichen Flechtenuntersuchungen im Rahmen der Ostluft.

3 Methode

Die Flechtenvegetation von 2009 wurde wie bereits in den Jahren 1989 und 1999 mit der Bioindikationsmethode mit Flechten aufgenommen. Da die Methode mit technischen Messdaten geeicht wurde, wird sie als kalibrierte Flechtenindikationsmethode bezeichnet. Sie wurde im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 14 „Lufthaushalt und Luftverschmutzung in der Schweiz“ für das Schweizer Mittelland entwickelt. Im Zusammenhang mit der ETH Fallstudie „Ökologische Planung – Bündner Rheintal“ wurde diese zur Bündner Rheintaler Methode weiterentwickelt. Wie eine Methodenevaluation ergab, eignet sich letztere sehr gut für die Untersuchung der Belastungssituation in Liechtenstein (puls vormals AGB 1991).

Die Methode basiert auf der einmaligen Auszählung der Vielfalt und Häufigkeit der Flechten auf ausgewählten Laubbäumen. Ideale Trägerbäume stehen frei, ausserdem sind sie möglichst senkrecht gewachsen, weisen eine ungestörte Aufnahme­fläche sowie keine tief hängenden Äste auf. Einheimische Linden (Winter- und Sommerlinden), Eschen und Eichen werden bevorzugt. Zudem kommen auch Walnuss, Spitzahorne, Bergahorne und ausländische Linden als Trägerbäume in Frage.

Die Flechtenmethode erfasst die Flechtenvegetation innerhalb einer standardisierten Aufnahme­fläche am Baum. Diese ist durch ein Frequenzgitter mit zehn gleich grossen Flächen begrenzt (Abb. 1). Das Frequenzgitter ist 50 cm hoch, umfasst den halben Stammumfang und wird immer in Richtung des grössten Flechtenbewuchses am Baum befestigt. Die Aufnahme­fläche ist je nach Baumdicke unterschiedlich breit. Idealerweise werden Bäume verwendet, welche einen Stammumfang zwischen 100 und 280 cm aufweisen.



Abbildung 1: Trägerbaum mit Frequenzgitter

Zu dicke (Umfang > 330 cm) oder zu dünne Bäume (Umfang < 80 cm) werden nicht berücksichtigt. Für jeden Trägerbaum wird ein bestimmter IAPBR-Wert⁴, der Luftgütwert, ermittelt: Die Frequenz ist die Anzahl Flächen des Frequenzgitters, in welchen eine Flechtenart vorkommt. Jede Flechtenart kann so eine Frequenz von 0 bis 10 aufweisen. Der IAPBR-Wert ist die Frequenzsumme der im Frequenzgitter vorkommenden Flechtenarten. Die Abbildung 2 stellt schematisch ein Flechtengitter mit dem Vorkommen verschiedener Flechtenarten und die Berechnung des IAPBR-Wertes dar.

● ¹ ▲ ¹ □ ¹		Berechnung: ● 4 x ▲ 5 x □ 4 x IAPBR: 4 + 5 + 4 = 13
▲ ² □ ²	● ²	
▲ ³	□ ³	
▲ ⁴ ● ³	▲▲▲ ⁵	
□ ⁴	● ⁴	

Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Frequenzgitters mit der Frequenzsumme IAPBR. Die Zahlen bedeuten die Anzahl der Flechten.

Einige Flechtenarten wurden nach der Aufnahme zur Nachbestimmung im Labor untersucht. Die Erhebungsdaten wurden für die Auswertung digitalisiert und kontrolliert. Die Auswertungen sowie die Interpretationen und Vergleiche sind unter den entsprechenden Kapiteln beschrieben.

⁴ Index of Atmospheric Purity, Luftgütwert, Bündner Rheintal: Summe der Frequenzen aller berücksichtigten Flechtenarten in Liechtenstein. Der IAPBR-Wert ist ein Mass für Immissionsbelastungen. Je höher der IAPBR-Wert, desto geringer ist die Gesamtimmisionsbelastung der Luft.

4 Erhebungsdaten

4.1 Trägerbäume

Bei der Dritterhebung von 2009 handelt es sich um dasselbe Gebiet, welches bereits in den Jahren 1999 und 1989 untersucht wurde. Es wurden möglichst dieselben Trägerbäume der beiden vorangegangenen Untersuchungen übernommen. Pro km² wurden mindestens sechs Bäume aufgenommen. Alle untersuchten Bäume wurden fotografiert und auf einer Standortskizze eingezeichnet. Der Standort der Bäume wurde mit Koordinaten festgehalten. Ein Wiederauffinden bei weiteren Untersuchungen ist somit gewährleistet.

Die Untersuchung von 2009 umfasst 426 Trägerbäume. In den vorangegangenen Erhebungen von 1999 und 1989 wurden 423 beziehungsweise 424 Bäume aufgenommen. Die gleichen Aufnahmeflächen wurden an 167 Bäumen (39%) wieder erhoben. Bei 19% der ganzen Untersuchung (80 Bäumen) wurde derselbe Trägerbaum untersucht, jedoch eine neue Aufnahmefläche bestimmt. Insgesamt wurden 42% oder 179 Bäume nicht wieder gefunden oder erfüllten die Qualität nicht mehr und wurden durch Trägerbäume mit der geforderten Qualität ersetzt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die höchsten und tiefsten IAPBR-Werte der Trägerbäume der drei Untersuchungen. Im Vergleich zu 1989 und 1999 sind der höchste und der tiefste IAPBR-Wert von 2009 weniger hoch und weniger tief, d.h. die Luftgüte hat eine engere Spannweite.

Jahr	1989	1999	2009
Höchster IAPBR-Wert	145	138	112
Tiefster IAPBR-Wert	0	1	6

Tabelle 1: Vergleich der höchsten beziehungsweise tiefsten IAPBR-Werte der Trägerbäume

Der IAPBR-Mittelwert der Trägerbäume für das ganze Untersuchungsgebiet liegt 2009 bei 51.10. In den Jahren 1999 und 1989 lag er bei 64.76 beziehungsweise bei 65.33 (vgl. Abbildung 3).

Im Vergleich zu den ersten beiden Erhebungen ist der IAPBR-Mittelwert 2009 der Trägerbäume abgefallen. Auch der Wert der Standardabweichung ist zurückgegangen.

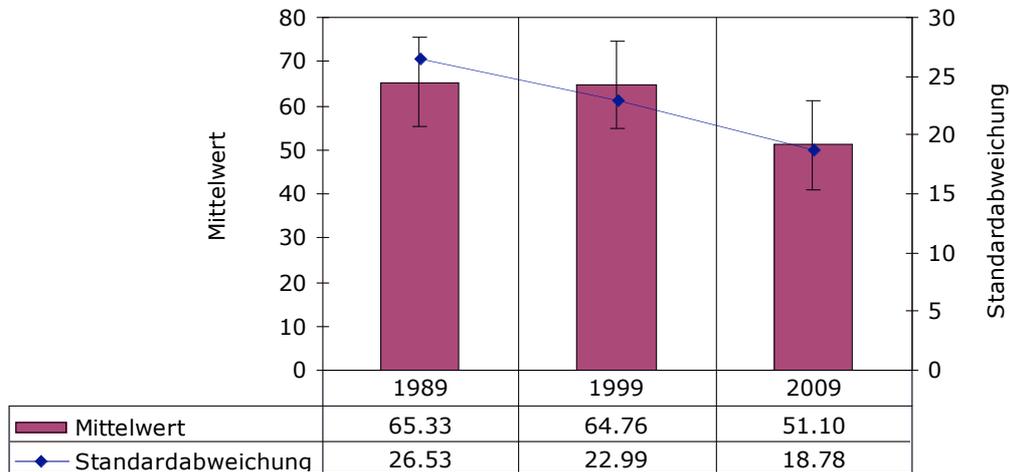


Abbildung 3: Vergleich der IAPBR-Mittelwerte und Standardabweichungen der Trägerbäume

4.2 Georäume

Zur Erstellung der Luftgütekarte (Kapitel 5) werden Georäume gebildet. Für die Auscheidung der Georäume werden Kriterien wie Überbauungsdichte, Nutzungsart, Topographie und Höhenlage berücksichtigt. Ein Georaum umfasst in der Regel fünf (+/- 1) benachbarte Trägerbäume.

Die 426 Trägerbäume wurden basierend auf den früheren Untersuchungen zu insgesamt 85 Georäumen zusammengenommen. Bei den Untersuchungen der Jahre 1999 und 1989 wurden die Bäume je 80 Georäumen zugeordnet. Die Anzahl Georäume ist 2009 gestiegen, da auf eine gleichmässige Verteilung der Stichproben geachtet wurde.

Für jeden Georaum wurde der Mittelwert aus den IAPBR-Werten der dazugehörigen fünf (+/- 1) Trägerbäume berechnet und im geometrischen Schwerpunkt des Georaumes eingetragen. Der höchste IAPBR-Georaummittelwert beträgt 88.2 und liegt in Triesenberg. Der tiefste IAPBR-Georaummittelwert beträgt 24 und liegt zwischen Vaduz und Triesen in der Talsohle. Bei den früheren Untersuchungen wurden als höchste Georaummittel ein IAPBR-Wert von 104.8 (1999) und 118.5 (1989) berechnet. Die tiefsten IAPBR-Werte lagen bei 27.7 (1999) und 11.5 (1989).

Der höchste Georaummittelwert hat im Vergleich zu den vorangegangenen Jahren kontinuierlich abgenommen. Gleichzeitig ist das tiefste Georaummittel von 1989 bis 2009 angestiegen und dann konstant geblieben. Die Spannweite zwischen dem höchsten und tiefsten Georaummittel hat sich verkleinert (Abb. 4).

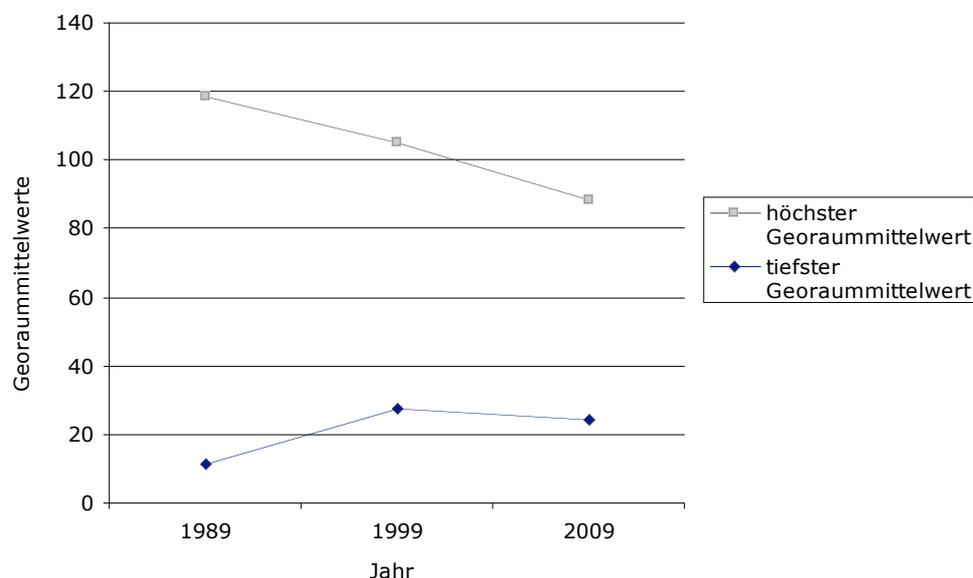


Abbildung 4 zeigt die höchsten und tiefsten IAPBR- Georaummittelwerte von 1989 bis 2009

5 Luftgüte

In diesem Kapitel wird anhand der Luftgütekarten die lufthygienische Situation dargestellt. Die Karten stellen flächendeckend die Gesamtbelastung des untersuchten Gebietes von 1989, 1999 und 2009 dar. Die Veränderungen der Luftgüte von 1989 zu 1999 und 1999 zu 2009 werden in Kapitel 6 beschrieben und in zwei Differenzkarten dargestellt.

In den folgenden Kapiteln 5.1. und 5.2. werden die Artenvorkommen der fünf Baumklassen visualisiert und interpretiert.

5.1 Einzelbaumauswertung 2009

Die folgenden Graphiken zeigen die Kennzahlen zum Artenvorkommen im Jahr 2009. Die IAPBR-Klassen fassen Bäume mit ähnlichem Flechtenvorkommen zusammen: von sehr wenig (IAPBR 0-26), wenig (IAPBR 26-53), mittlerem (IAPBR 53-81), viel (IAPBR 81-108) bis normalem Flechtenbewuchs (IAPBR >108).

Die Klasse mit normalem Flechtenbewuchs ist in den folgenden drei Graphiken nicht dargestellt. Da nur noch zwei Trägerbäume in dieser Baumklasse vorkommen, ist sie für eine Auswertung zu klein und wird deshalb bei den folgenden Auswertungen und Darstellungen vernachlässigt.

Für die Berechnung der durchschnittlichen Artenzahl pro Baum wird für jeden Trägerbaum die Artenzahl erhoben, summiert und durch die Anzahl Bäume der entsprechenden IAPBR-Klassen dividiert. Anschliessend wird der Mittelwert für die entsprechende Klasse gebildet. Wie Abbildung 5 zeigt, steigt die Artenzahl mit zunehmendem Flechtenbewuchs in den Klassen.

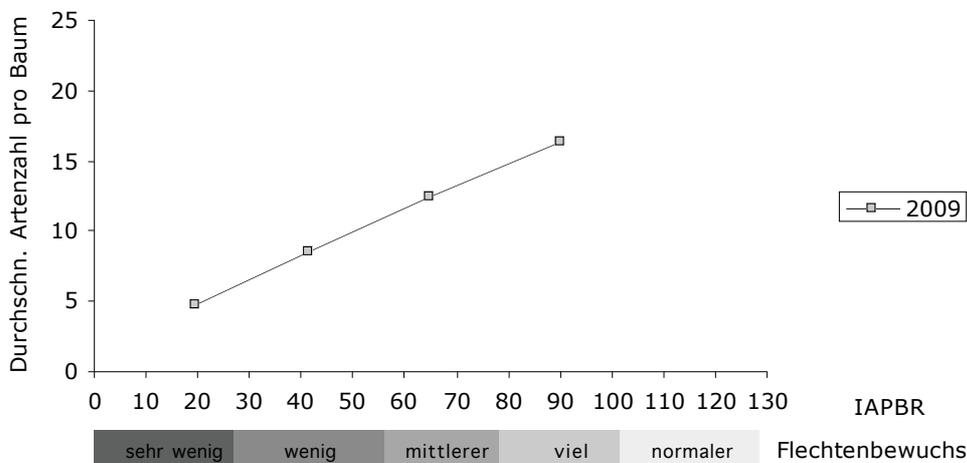


Abbildung 5: durchschnittliche Artenzahl pro Baum innerhalb einer Baumklasse

Die folgende Graphik der Artenvielfalt beschreibt die Anzahl Arten, welche an mindestens 5% der Trägerbäume innerhalb der jeweiligen Baumklasse vorkommen. Die Abbildung 6 zeigt die Artenvielfalt der Untersuchung von 2009. Auffällig ist der starke Anstieg der Artenvielfalt von der Klasse mit sehr wenig Flechtenbewuchs zu der Klasse mit wenig Flechtenbewuchs: Die Artenvielfalt verdoppelt sich.

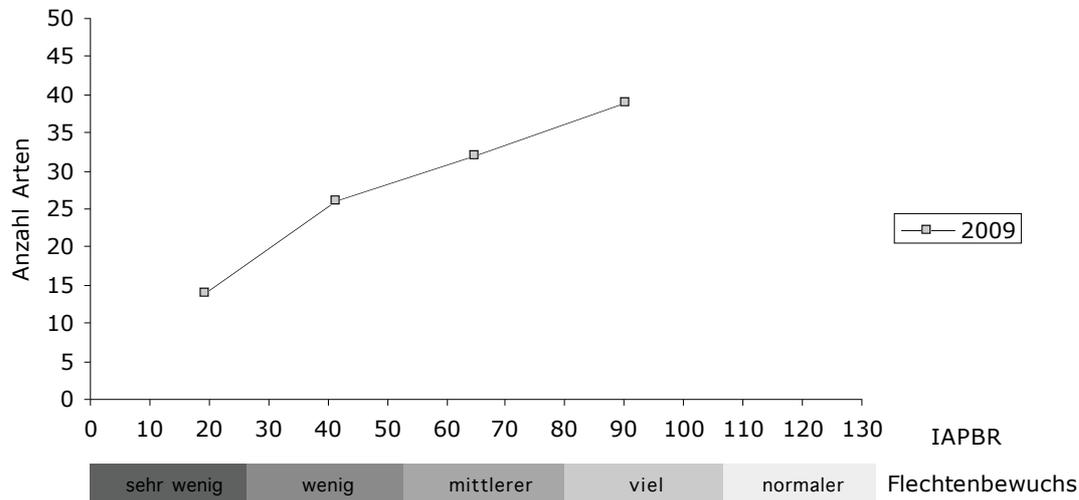


Abbildung 6: Artenvielfalt innerhalb einer Baumklasse

In Abbildung 7 ist die durchschnittliche Frequenz pro Flechtenart innerhalb der verschiedenen Baumklassen von 2009 dargestellt. Für die durchschnittliche Frequenz werden die Mittelwerte der Artenfrequenzen pro Baumklasse gebildet.

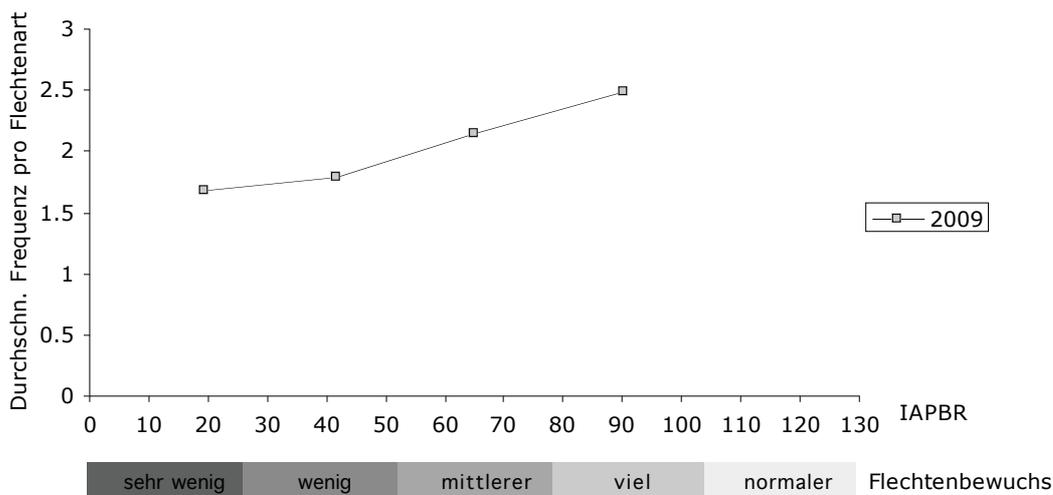


Abbildung 7: Durchschnittliche Frequenz pro Flechtenart 2009

Die nachfolgende Tabelle fasst die oben dargestellten Ergebnisse zusammen.

Baumklasse mit	IAPBR-Bereich	IAPBR-MW der Baumklassen	Ø Artenzahl pro Baum	Artenvielfalt pro Klasse	Ø Frequenz pro Art
sehr wenig Flechtenbewuchs	0 – 26	19.4	4.8	14	1.7
wenig Flechtenbewuchs	26 – 53	41.6	8.6	26	1.8
mittlerem Flechtenbewuchs	53 – 81	65	12.4	32	2.1
viel Flechtenbewuchs	81 – 108	90.3	16.4	39	2.5
normalem Flechtenbewuchs	108 <	111	-	-	-

Tabelle 2: Zusammenfassung der IAPBR-Bereiche, IAPBR-Mittelwerte der Baumklassen, durchschnittliche Artenzahl pro Baum, Artenvielfalt pro Klasse und durchschnittliche Frequenz pro Art

Die insgesamt 426 Bäume werden den fünf Baumklassen zugeordnet:

Baumklasse mit sehr wenig Flechtenbewuchs

Die Klasse mit sehr wenig Flechtenbewuchs umfasst 35 Bäume mit IAPBR-Werten von 0-26. Dies entspricht 8% aller Trägerbäume. Durchschnittlich kommen in dieser Klasse 4.8 Arten an einem Baum vor. Die Artenvielfalt liegt bei 14 Arten. Die durchschnittliche Frequenz pro Art in dieser Baumklasse beträgt 1.7. Die häufigsten Arten sind *Phaeophyscia orbicularis*-Gr., *Candelaria concolor* und *Candelaria xanthostigma*-Gr.

Baumklasse mit wenig Flechtenbewuchs

IAPBR-Werte von 26 - 53 sind der Baumklasse mit wenig Flechtenbewuchs zugeordnet. Sie ist mit 213 Bäumen die grösste Klasse dieser Untersuchung. 50% der Trägerbäume sind somit in dieser Klasse einzuordnen. Die durchschnittliche Artenzahl pro Baum beträgt 8.6. Es kommen 26 Arten in dieser Klasse vor. Die durchschnittliche Frequenz dieser Baumklasse liegt bei 1.8.

Baumklasse mit mittlerem Flechtenbewuchs

Insgesamt 153 Trägerbäume mit IAPBR-Werten von 53 - 81 sind in der Klasse mit mittlerem Flechtenbewuchs zusammengefasst. 36% aller Trägerbäume weisen IAPBR-Werte dieser Baumklasse auf. Die durchschnittliche Artenzahl pro Baum beträgt 12.4 bei einer Vielfalt von 32 Arten. Der durchschnittliche Frequenzwert in dieser Klasse ist 2.1.

Baumklasse mit viel Flechtenbewuchs

Die Klasse mit viel Flechtenbewuchs beinhaltet 23 Bäume mit den IAPBR-Werten von 81 - 108. Dies entspricht 5,5% aller Trägerbäume. Die durchschnittliche Anzahl Arten pro Baum liegt bei 16.4 bei einem durchschnittlichen Frequenzwert von 2.5. Die Artenvielfalt in dieser Klasse beträgt 39 Arten.

Baumklasse mit normalem Flechtenbewuchs

Von der ganzen Untersuchung weisen lediglich zwei Bäume (0,5% der Trägerbäume) einen normalen Flechtenbewuchs und somit IAPBR-Werte über 108 auf und können dieser Klasse zugeteilt werden.

5.2 Einzelbaumauswertungen im Vergleich

Anhand der nachfolgenden Abbildungen werden die Artenvorkommen der Untersuchungen von 1989, 1999 und 2009 verglichen. Die Baumklasse mit normalem Flechtenbewuchs von 2009 wird in diesem Kapitel vernachlässigt.

Die Artenzahlen sind von 1989 zu 2009 praktisch gleich geblieben. Lediglich die Klasse mit sehr wenig Flechtenbewuchs wies im Jahr 1989 eine geringere Artenzahl und einen tieferen Mittelwert auf als in den Jahren 1999 und 2009.

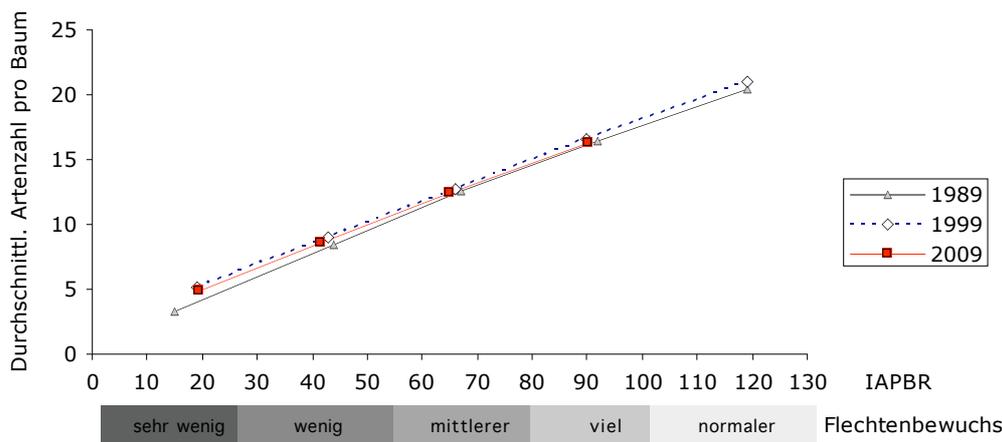


Abbildung 8: durchschnittliche Artenzahl pro Baum innerhalb einer Baumklassen im Vergleich

Aus der folgenden Abbildung 9 geht hervor, dass die Artenvielfalt in den Klassen mit wenig, mittlerem und viel Flechtenbewuchs gleich geblieben ist. In der Klasse mit sehr wenig Flechtenbewuchs (IAPBR-Werte von 0-26) hat die Artenvielfalt im Vergleich zu 1999 und 1989 leicht abgenommen.

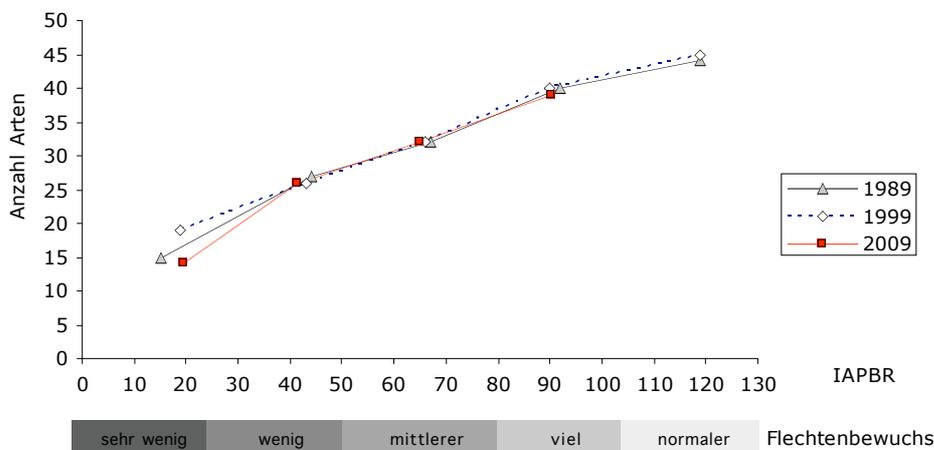


Abbildung 9: Artenvielfalt der Baumklassen im Vergleich

Die höchsten Werte der durchschnittlichen Frequenzen pro Flechtenart wurden 2009 gemessen. In den Klassen von sehr wenig bis viel Flechtenbewuchs ist die Frequenz in den letzten zehn Jahren angestiegen. Da die mittleren Begleitartenzahlen einer Flechtenart gesunken sind (vgl. 10.2 Toxizität) müssen die Frequenzen steigen, damit sich der gleiche IAPBR-Wert ergibt. In der Baumklasse mit normalem Flechtenbewuchs war die durchschnittliche Frequenz von 1989 bis 1999 angestiegen. Zu der Frequenz dieser Klasse im Jahr 2009 können aufgrund der lediglich zwei Trägerbäume mit normalem Flechtenbewuchs keine Aussagen gemacht werden.

Die durchschnittlichen Frequenzwerte der Klassen sind in folgender Abbildung 10 dargestellt.

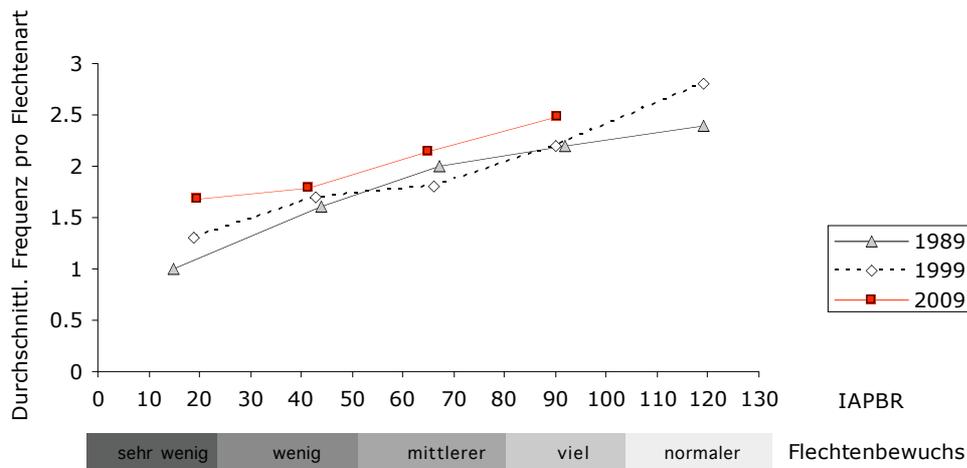


Abbildung 10: Durchschnittlichen Frequenz pro Flechtenart der Baumklassen im Vergleich

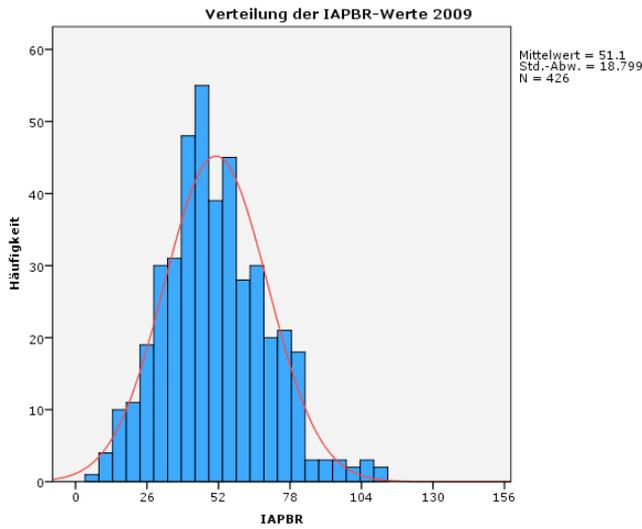


Abbildung 11: Verteilung der IAPBR-Werte 2009

Die Abbildungen 11 - 13 zeigen die Normalverteilungen der IAPBR-Werte der Trägerbäume im Vergleich von 2009 bis 1989 in Liechtenstein.

Die Verteilungskurven (in rot) werden von 1989 zu 2009 zunehmend enger und steiler. Die Häufigkeit der IAPBR-Werte der Trägerbäume von 26.1 – 53 (Klasse mit wenig Flechtenbewuchs) und 53.1 – 81 (Klasse mit mittlerem Flechtenbewuchs) hat zugenommen.

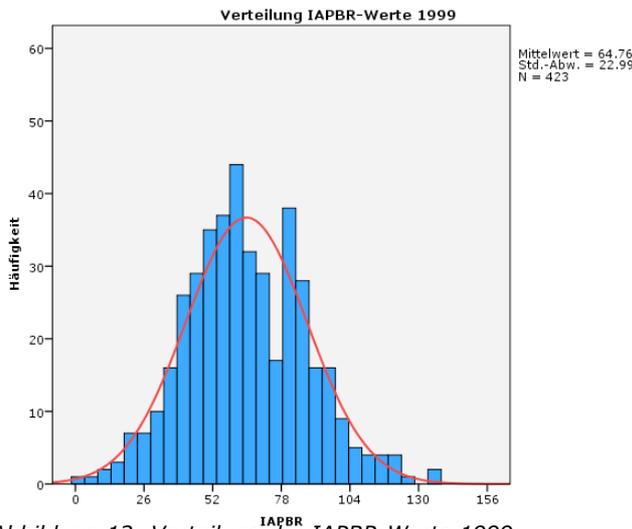


Abbildung 12: Verteilung der IAPBR-Werte 1999

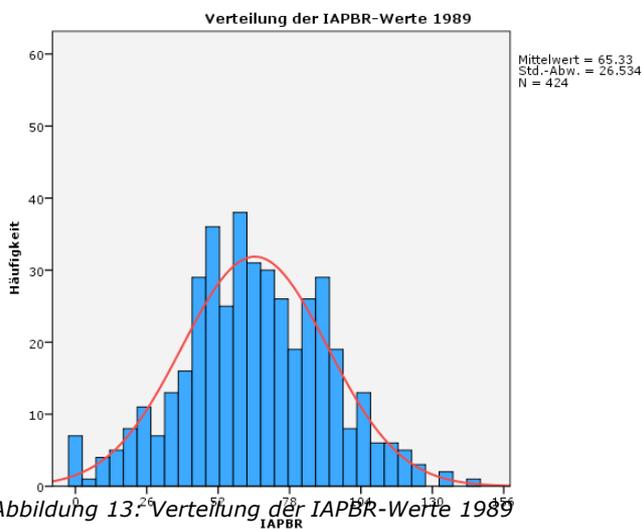


Abbildung 13: Verteilung der IAPBR-Werte 1989

5.3 Berechnung der Luftgütezonen

Die Luftgütekarte unterscheidet entsprechend der fünf Baumklassen fünf Zonen mit unterschiedlichem Flechtenbewuchs, was wiederum fünf Zonen mit unterschiedlicher Luftqualität entspricht (vgl. dazu Tabelle 3). Die Luftgütekarte wird mithilfe der Georäume und der linearen Interpolation erstellt.

Auf der Verbindungsgeraden zwischen zwei Georäumen unterschiedlicher Zonen werden mittels linearer Interpolation die Zonengrenzen berechnet. Gleiche Zonengrenzen werden zu Isolinien verbunden. Die Linien stellen keine exakten Grenzen dar, sondern stehen für fließende Übergänge. Wenn der Verlauf der Isolinie nicht genügend abgestützt werden kann, sind die Isolinien gestrichelt dargestellt.

Die Luftgütezonen mit unterschiedlichem Flechtenbewuchs entsprechen den folgenden IAPBR-Werten:

Zone mit	IAPBR-Bereich
sehr wenig Flechtenbewuchs	0 – 26
wenig Flechtenbewuchs	26 – 53
mittlerem Flechtenbewuchs	53 – 81
viel Flechtenbewuchs	81 – 108
normalem Flechtenbewuchs	108 <

Tabelle 3: Luftgüte zonen mit den entsprechenden IAPBR-Bereichen

5.4 Luftsituation 2009

Die Luftgütekarte beinhaltet fünf IAPBR-Zonen mit unterschiedlicher Beeinträchtigung der Flechtenvegetation. Im Jahr 2009 kommen in Liechtenstein noch drei Luftgütezone vor. Die Zone mit sehr wenig Flechtenbewuchs sowie die Zone mit normalem Flechtenbewuchs treten 2009 wie bereits im Jahr 1999 nicht mehr auf. Die Luftgütekarte 2009 ist in Abbildung 16 dargestellt.

Zone mit	Farbe	IAPBR-Bereich	Fläche [km ²]	Fläche [%]
sehr wenig Flechtenbewuchs	rot	0 – 26	0	0
wenig Flechtenbewuchs	orange	26 – 53	39.5	61
mittlerem Flechtenbewuchs	gelb	53 – 81	25	38.3
viel Flechtenbewuchs	grün	81 – 108	0.5	0.7
normalem Flechtenbewuchs	blau	108 <	0	0
Total			65	100

Tabelle 4: Luftgütezone und ihre Flächenanteile 2009

Gebiete mit wenig Flechtenbewuchs (orange Zone):

Die orange Zone, welche Gebiete mit wenig Flechtenbewuchs darstellt, macht die grösste Fläche des Untersuchungsgebietes (61%) aus. Sie umfasst beinahe die ganze Talsohle von Liechtenstein, einschliesslich der Siedlungen Gamprin, Bendern, Eschen, Mauren, Schaan, einen Teil von Vaduz, Triesen sowie auch Balzers. Ein kleines Gebiet mit wenig Flechtenbewuchs befindet sich zusätzlich rund um den Dorfkern von Ruggell in Richtung Rhein.

Gebiete mit mittlerem Flechtenbewuchs (gelbe Zone):

Insgesamt umfassen Gebiete mit mittlerem Flechtenbewuchs 38.3% des Untersuchungsgebietes. Der Norden des Gebietes, mit Ausnahme des Dorfkerns von Ruggell, ist der gelben Zone zuzuordnen. Noch weitere Gebiete mit mittlerem Flechtenbewuchs befinden sich in der Talsohle: Eine kleine Zone bildet eine „Insel“ südlich von Bendern, an den Rhein grenzend. Auch Nendeln weist mittleren Flechtenbewuchs auf. Das dritte Gebiet mit mittlerem Flechtenbewuchs in der Talsohle befindet sich ganz im Süden des Landes und umfasst Mäls sowie das Gebiet Äule - Oberau am Rhein bis zur Landesgrenze. Gebiete mit mittlerem Flechtenbewuchs sind auch die Hanglagen bei Nendeln und Plancken. Dieses Gebiet reicht noch in die Ebene hinein. Zwei weitere Gebiete liegen am Hang oberhalb von Vaduz und Schaan und bei Triesenberg und umfassen einen Teil des Dorfes Triesen.

Gebiete mit viel Flechtenbewuchs (grüne Zone):

Nur ein Gebiet oberhalb von Triesenberg weist noch viel Flechtenbewuchs auf. Es umfasst 0.7% der Gesamtfläche und wird landwirtschaftlich genutzt.

5.5 Luftgüte im Vergleich

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse von 2009 mit den Ergebnissen aus den vorangegangenen Untersuchungen von 1999 und 1989 verglichen und interpretiert. Als Grundlage für den Vergleich werden jeweils am Anfang der Unterkapitel die wichtigsten Resultate von 1999 und 1989 kurz zusammengefasst.

5.5.1 Luftsituation 1999

Bereits im Jahr 1999 wurden keine Gebiete mehr den Zonen mit sehr wenig und normalem Flechtenbewuchs zugeordnet. Die Talsohle konnte hauptsächlich zur Zone mit mittlerem Flechtenbewuchs gerechnet werden. Im Dorfkern von Eschen und einem Teil von Mauren und Bendern sowie in dem Gebiet nahe dem Rhein mit den Zentren von Schaan, Vaduz und Triesen wurde wenig Flechtenbewuchs festgestellt. Auch der Dorfkern von Balzers wurde dieser Zone zugeordnet. Die Hanglagen bei Triesenberg, Balzers, Mäls sowie eine kleine Fläche bei Planken wurden der Zone mit viel Flechtenbewuchs zugeordnet. Auch das Gebiet zwischen Schellenberg und Ruggell bis Gamprin und nördlich von Ruggell gehörten dieser Zone an.

Die Luftsituation von 1999 ist in der Luftgütekarte 1999 (Abbildung 15) dargestellt.

5.5.2 Luftsituation 1989

In der Luftgütekarte von 1989 waren noch alle fünf Zonen der Luftgüte enthalten. Hauptsächlich die Zentren der besiedelten Gebiete wiesen relativ grosse bis grosse Gesamtbelastungen auf: Der Dorfkern von Schaan und Vaduz wurden der Zone mit sehr wenig Flechtenbewuchs zugeordnet. Gebiete bei Eschen und Nendeln, Schaan, Vaduz und Triesen nahe dem Rhein, sowie der Dorfkern von Balzers gehörten zur Zone mit wenig Flechtenbewuchs. Die Talsohle konnte hauptsächlich der Zone mit mittlerem Flechtenbewuchs zugeordnet werden. Die Hanglagen wiesen vorwiegend viel Flechtenbewuchs auf. Auch Schellenberg, Hinterschellenberg und das Gebiet südlich von Mäls wurde dieser Zone zugeordnet. Das Gebiet nordöstlich von Triesenberg bei Gnalp und die südlichsten Spitzen von Liechtenstein konnten noch zu der Zone mit normalem Flechtenbewuchs gerechnet werden.

Abbildung 14 visualisiert die Luftsituation von 1989.

5.5.3 Vergleich der Luftsituation von 1989 bis 2009

Im Jahr 1989 wurden noch Zonen mit sehr wenig Flechtenbewuchs verzeichnet, in den neueren Untersuchungen nicht mehr.

Die Zone mit wenig Flechtenbewuchs hat stark zugenommen und ist 2009 flächenmässig die grösste (61%). Von 1989 bis 1999 hatte sie an Fläche verloren. Seit 1999 hat sie jedoch um 40% zugenommen.

Die Zone mit mittlerem Flechtenbewuchs hatte sich von 1989 bis 1999 von 54.5% auf 65% Flächenanteil vergrössert. Nach 1999 bis 2009 ist sie jedoch stark zusammengeschrumpft (- 26.7%).

In den Hanglagen hat sich seit 1989 die Zone mit viel Flechtenbewuchs verkleinert und ist seit 1999 bis auf ein kleines Gebiet oberhalb von Triesenberg zusammengeschrumpft (- 13.3%). Auch bei Hinterschellenberg hat die Zone mit viel Flechtenbewuchs von 1989 bis 1999 an Fläche verloren und ist wie auch in den Gebieten nördlich von Ruggell, südlich von Mäls bei Anaresch, bei Triesen, Bendern und Planken im Jahr 2009 ganz verschwunden.

Sowohl 1999 als auch 2009 konnten keine Gebiete mehr der Zone mit normalem Flechtenbewuchs zugeordnet werden.

Es zeigt sich die Tendenz, dass sich Liechtenstein hauptsächlich in Zonen mit wenig und mittlerem Flechtenbewuchs unterteilen lassen wird. Der Zone mit mittlerem Flechtenbewuchs sind vorwiegend die Hanglagen zuzuordnen. Die Talsohle wird hauptsächlich der Zone mit wenig Flechtenbewuchs zugeschrieben. Da sich die Zone mit viel Flechtenbewuchs auf eine einzige Fläche verkleinert hat, ist anzunehmen, dass diese Zone ganz verschwinden wird.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Flächengrösse der Luftgütezonen.

Zone	1989		1999		2009		Differenz von 1999 zu 2009
Flechtenbewuchs	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]	[%]
sehr wenig (rot)	1.2	1.8	0	0	0	0	0
wenig (orange)	16.5	25.4	13.4	21	39.5	61	40
mittel (gelb)	35.4	54.5	42.6	65	25	38.3	-26.7
viel (grün)	10.9	16.8	9	14	0.5	0.7	-13.3
normal (blau)	1	1.5	0	0	0	0	0
Total	65	100	65	100	65	100	

Tabelle 5: Vergleich der Luftgütezonen 1989 - 2009

Die nachfolgenden Abbildungen visualisieren von links nach rechts die Luftgütekarten von 1989 bis 2009.

5.6 Luftgütekarten 1989 – 2009

- LUFTGÜTEKARTE 1989

Abbildung 14: Luftgütekarte 1989

- LUFTGÜTEKARTE 1999

Abbildung 15: Luftgütekarte 1999

- LUFTGÜTEKARTE 2009

Abbildung 16: Luftgütekarte 2009

6 Gradientenkarten

6.1 Berechnung

Die Gesamtbelastung kann als Relief dargestellt werden. Hohe Georäummittelwerte bilden Berge, tiefe liegen in Tälern. Die Pfeile der Gradientenkarte verdeutlichen Richtung und Zunahme der Gesamtbelastung, sie zeigen Veränderungen an. Die Pfeile weisen in die Richtung der vermuteten Quelle. Je grösser ein Pfeil, desto grösser ist die Zunahme der Luftbelastung in IAPBR/100m (Gradient). In der nachfolgenden Legende sind die Pfeile den Gradienten zugeordnet. Pfeile erscheinen nur dann, wenn sich eine wesentliche Veränderung im räumlichen Gesamtbelastungsmuster einstellt. Über weite Gebiete gleich bleibende, hohe Belastungen werden nicht ausgewiesen. Ebenso werden über weite Strecken tief bleibende Belastungen nicht angezeigt. Grossflächig hohe Belastungen sind entweder auf eine disperse Emittentenstruktur (ohne herausragende Grosse mittenten) zurückzuführen oder sind das Resultat einer starken Quelle mit Fernwirkung. Je grösser der Gradient, desto grösser ist der Einfluss einer Emissionsquelle auf die Luftqualität der Umgebung.

Gradienten	
	2.7 - 5.5 IAPBR / 100m
	5.5 - 8.2 IAPBR / 100m
	> 8.2 IAPBR / 100m

Abbildung 17: Legende der Gradientenkarten

Die Gradientenkarte 2009 zeigt, in welche Richtung und wie stark der Flechtenbewuchs 2009 abnimmt. Sie ist in nachfolgendem Kapitel dargestellt und beschrieben.

6.2 Gradienten 2009

Für die starke Belastung von Ruggell zeigt die Gradientenkarte, dass die Belastungsquellen in Ruggell selbst liegen müssen. Die starke Belastung in Schellenberg und Mauren ist auf eine Vielzahl kleiner lokalen Quellen zurückzuführen. Denkbar sind verstärkte Verkehrsaufkommen und Bautätigkeiten. Die Verschlechterung der Luftsituation der Talsohle wirkt sich auch auf Planken aus. Kleine Pfeile zeigen in Richtung Ebene.

In Schaan deuten grosse Pfeile auf die Verkehrsachse Buchs – Schaan – Planken als grosse Belastungsquelle. Die Gradientenpfeile zeigen ausserdem die Belastungsquelle der Verkehrsachse Schaan – Vaduz – Triesen bis nach Balzers und weiter nach Luzissteig an. Als grosse Quelle weist ein Pfeil zur Kreuzung in Vaduz. Eine mögliche Belastungsquelle war die Grossbaustelle, welche sich zur Zeit der Flechtenerhebung an diesem Ort befand.

Dasselbe Phänomen wie beim Ruggeller Riet zeigt sich auch im Riet zwischen Bendern, Eschen und Schaan. Die Belastungen sind entweder auf zerstreute Quellen im Gebiet selbst zurückzuführen oder grossräumig verursacht. Das gleiche Phänomen kann im Gebiet bei Äule – Oberau in Mäls festgestellt werden.

Die Gradientenpfeile bei Triesenberg weisen in Richtung der bewohnten Gebiete. Sie zeigen, dass dort der Dorfkern die Quelle der Belastung ist. Mögliche Ursachen dafür können verstärkte Bautätigkeiten und das damit verbundene grössere Verkehrsaufkommen sein.

Wie die grossen Pfeile zeigen, liegen grosse Belastungsquellen im Dorfkern von Balzers selbst. Sie zeigen deutlich die Strasse durch Balzers an. Die Belastung bei Mäls wird beeinflusst von Emissionen des überwiegend landwirtschaftlich genutzten Gebietes bei Äule - Oberau den Rhein entlang.

Abbildung 19 zeigt die Gradientenkarte 2009.

6.3 Gradientenkarten im Vergleich

Der Vergleich der beiden Gradientenkarten zeigt, dass die Gradientenkarte 1999 (Abbildung 18) mehr Pfeile aufweist als die Karte von 2009 (Abbildung 19). Dies bedeutet, dass die Gradienten zwischen den Georäumen abgenommen haben. Die Belastung verteilt sich somit grossflächiger und die Quellen sind disperser.

1999 zeigten die Pfeile das Ruggeller Riet als Quelle an. Im Jahr 2009 treten dort die Pfeile nicht mehr auf. Dies kann einerseits bedeuten, dass kleinere Quellen noch zerstreuter liegen oder andererseits das ganze Gebiet grossräumig von Feldkirch beeinflusst wird. Die Quellen im Gebiet bei Schellenberg – Mauren haben sich hingegen verstärkt.

Das Dorf Triesenberg ist 2009 im Vergleich zu 1999 zur stärkeren Belastungsquelle geworden. Dort sind durch die zunehmende Belastung in der Karte neu Gradientenpfeile auszumachen.

Im Vergleich zu 1999 hat im Jahr 2009 der Dorfkern von Schaan mit den Verkehrsachsen, die von Buchs und von Vaduz herführen, einen stärkeren, negativen Einfluss auf die Belastungssituation der Umgebung. Die gleiche Gradientensituation ist auch in Vaduz bei der Kreuzung zur Autobahnzufahrt Sevelen sowie im Dorfkern von Balzers zu beobachten. Kreuzungspunkte wie in Schaan, Vaduz und Balzers haben als Quellen generell an Bedeutung gewonnen. Auch Dorfkerne (Schellenberg – Mauren, Triesenberg und Triesenberg) sind stärkere Belastungsquellen geworden. Die Verkehrsachsen und Kreuzungspunkte stellen die Hauptbelastungsquellen dar.

6.4 Gradientenkarten 1999 und 2009

- *Gradientenkarte 1999*

Abbildung 18: Gradientenkarte 1999

- Gradientenkarte 2009

Abbildung 19 zeigt die Gradientenkarte 2009

7 Differenzkarten

7.1 Berechnung

Die Differenzkarte 2009 visualisiert die räumliche Veränderung der Luftbelastung zwischen 1999 und 2009. Für die Erstellung der Differenzkarte werden die Luftgütwerte 2009 von den Luftgütwerten 1999 abgezogen. Verschlechterungen der Luftqualität äussern sich durch negative IAPBR-Differenzen. Die Verbesserungen der Luftqualität zeigen sich generell durch positive IAPBR-Differenzen. Die Differenzen werden in fünf Klassen unterteilt, damit Zonen gleicher Veränderung gebildet werden können (Tabelle 6). Die Klassenbreite der Differenzkarte ist mit der Klassengrenze der Gradientenkarte abgestimmt. Diese wiederum entspricht einer halben Klassenbreite der Luftgütekarte und umfasst 13.5 IAPBR-Punkte.

Die IAPBR-Differenz von 0 entspricht dem Mittelpunkt der Differenzzoneneinteilung. Es ergeben sich folgende Differenzzonen:

IAPBR- Differenz	Veränderung	Zonenfarbe
> 20.3	starke Verbesserung	blau
20.3 – 6.7	wenig Verbesserung	hellblau
6.7 – -6.7	keine wesentliche Veränderung	weiss
-6.7 – -20.3	wenig Verschlechterung	hellrot
<-20.3	starke Verschlechterung	rot

Tabelle 6: Klassifikation der IAPBR-Differenzwerte zu Zonen gleicher Veränderung

Die Differenzkarte ist wie die Luftgütekarte eine Isolinienkarte und wird auch durch lineare Interpolation der Zonengrenzen konstruiert. Gebiete gleicher IAPBR-Differenzen befinden sich in der gleichen Zone. Verbesserungen der Luftqualität werden als blaue oder hellblaue Zone dargestellt. Die weisse Zone steht für Gebiete ohne wesentliche Veränderung der Luftbelastung. Verschlechterungen und starke Verschlechterungen zeigen sich hellrot beziehungsweise rot.

7.2 Beschreibung der Differenzkarte 2009

In der Differenzkarte 2009 (Abb. 21) sind die Veränderungen der Luftgüte von 1999 zu 2009 dargestellt.

In mehr als drei Viertel der untersuchten Landesfläche ist der Luftgütewert nachweislich gesunken.

Zwischen 1999 und 2009 hat sich die Situation in 26.7% des Untersuchungsgebietes - stark verschlechtert. Die Gebiete des Ruggeller Riet an den Rhein grenzend, die Talsohle zwischen Bendern und Schaan am Rhein, von Hinterschellenberg über Schellenberg nach Mauren sowie die Hanglagen bei Triesen, Balzers und Mäls fallen stark negativ auf. Auch im nördlichen Teil des Siedlungsgebietes von Balzers hat sich die Situation stark verschlechtert.

In etwa der Hälfte der untersuchten Fläche (57.3%) hat sich die Lage ebenfalls verschlechtert, jedoch nur wenig. Die Talsohle sowie das Gebiet rund um Triesenberg können dieser Zone mit wenig Verschlechterung zugeordnet werden.

In den Dorfkernen von Ruggell, Eschen, Planken, Schaan, Vaduz und Triesen lassen sich keine wesentlichen Veränderungen der Luftgüte (insgesamt 15.3%) seit 1999 beobachten. Oberhalb von Triesenberg ist ebenfalls eine kleine Zone mit keiner wesentlichen Veränderung zu finden.

Im ganzen Untersuchungsgebiet verbessert sich die Situation nur an einer Stelle und zwar wenig, nämlich im Siedlungsgebiet von Schaan mit einer Grösse von 0.5 km² (0.7% der Gesamtfläche). In der Differenzkarte 2009 können keine weiteren Gebiete den Zonen mit wenig oder starker Verbesserung der Luftsituation zugeordnet werden.

Die Tabelle 7 zeigt den Anteil der verschiedenen Zonen auf die gesamte Untersuchungsfläche.

Zone mit	Farbe	Fläche [km ²]	Fläche [%]
starke Verschlechterung	rot	17.3	26.7
wenig Verschlechterung	hellrot	37.2	57.3
keine wesentliche Veränderung	weiss	10	15.3
wenig Verbesserung	hellblau	0.5	0.7
starke Verbesserung	blau	0	0
Total		65	100

Tabelle 7: Flächenverteilung der Zonen in der Differenzkarte 2009

7.3 Beschreibung der Differenzkarte 1999

Wie die Differenzkarte 1999 zeigt, konnten von 1989 bis 1999 mehrere Verbesserungen der Luftsituation festgestellt werden: In Gebieten nördlich und südlich von Ruggell, einschliesslich der Gemeinden Gamprin und Bendern, am Rhein, wurde eine verbesserte Luftsituation erkannt. Südlich von Eschen verlief ein Gebiet mit einer Verbesserung von der westlichen zur östlichen Landesgrenze. Die Luftqualität hat sich auch in einem lang gezogenen Gebiet verbessert, das auf der Höhe von Schaan beim Rhein beginnt, den Dorfkern von Schaan mit einschliesst, über Vaduz und bis Triesen gegen den Rhein verläuft. Im Dorfzentrum von Mäls konnte die Luftsituation aufgewertet werden. In zwei kleinen Gebieten nördlich von Ruggell und bei Triesen, beide an den Rhein grenzend, sowie einem Gebiet südwestlich von Nendeln wurden sogar starke Verbesserungen der Luftsituation erkannt.

Die grösste Zone bildete diejenige ohne grosse wesentlichen Veränderungen der Luftsituation: Grosse Flächen der Talsohle sowie ein Teil von Triesenberg wurden dieser Kategorie zugeordnet.

Die Luftqualität der Hanglagen hatte sich in dieser Zeitspanne generell verschlechtert. Auch in einem Gebiet von Hinterschellenberg über Schellenberg und Mauren bis nördlich von Eschen verschlechterte sich die Luftsituation. In Triesenberg bei Gnalp und südlich von Mäls wurde sogar eine starke Verschlechterung der Luftsituation festgestellt.

Die Differenzkarte 1999 wird in Abbildung 20 dargestellt.

7.4 Vergleich der Differenzkarten

Die Differenzkarten bestätigen, was der Vergleich der Luftgütekarten ergab: Die beiden Zonen mit Verschlechterungen haben zugenommen (+25.3% für starke Verschlechterung und 37.9% für wenig Verschlechterung).

Die Zone ohne wesentliche Veränderungen und die beiden Zonen, welche Verbesserungen anzeigen, sind zurückgegangen. Die Zone mit starker Verbesserung ist verschwunden.

Tabelle 8 zeigt die Flächenanteile der Zonen in der Differenzkarte 99, in der Differenzkarte 09 und deren Vergleich in %.

Zone mit	Fläche 99 [km ²]	Fläche 99 [%]	Fläche 09 [km ²]	Fläche 09 [%]	Vergleich der Flächen 99-09 [%]
starke Verschlechterung	0.9	1.4	17.3	26.7	25.3
wenig Verschlechterung	12.6	19.4	37.2	57.3	37.9
keine wesentliche Veränderung	31.4	48.3	10	15.3	-33
wenig Verbesserung	18.3	28.1	0.5	0.7	-27.4
starke Verbesserung	1.8	2.8	0	0	-2.8
Total	65	100	65	100	

Tabelle 8: Flächenverteilung der Zonen und Differenzen von 1999 bis 2009

7.5 Differenzkarten 1999 und 2009

- DIFFERENZKARTE

Abbildung 20: Differenzkarte 1999

- Differenzkarte 2009

Abbildung 21: Differenzkarte 2009

8 Liechtensteiner Acidoindex

Die Reaktionsweise von Flechtenarten auf den Säuregrad ihres Habitats und damit die Artenzusammensetzung an einem Standort bilden die Grundlagen für die Berechnung des Acidoindex. Der Acidoindex ermöglicht Rückschlüsse auf die Art der Belastung und damit eine qualitative Differenzierung zwischen eher sauer oder eher neutral bis basisch geprägten Belastungen.

8.1 Berechnung

Die Berechnung des Liechtensteiner Acidoindex basiert auf 19 acidophilen (säure-liebenden) und 14 neutro- bis basiphilen (neutralen bis basenliebende) Flechtenarten (vgl. Tabelle 9). Für jeden Trägerbaum wird die Frequenzsumme der neutro- bis basiphilen Arten von der Frequenzsumme der acidophilen Arten abgezogen und durch den IAPBR- Wert des entsprechenden Trägerbaumes dividiert. Für jeden Georaum wird aus den Werten der zugehörigen Trägerbäume der Mittelwert berechnet und im jeweiligen Georaummittelpunkt in der Acidoindexkarte dargestellt.

negative (neutro- bis basiphile) Arten des Acidoindex			
Flechtenart	Toxitolanz	pH-Schwerpunkt*	Nitrotoleranz*
Anaptychia ciliaris	empfindlich	subneutrophil	mässig nitrotolerant
Parmelia exasperata	sehr empfindlich	neutrophil - mässig acidophil	nitrophil
Phaeophyscia ciliata	wenig empfindlich	subneutrophil - mässig acidophil	mässig nitrotolerant
Lecanora impudens	toxitolanz	subneutrophil - mässig acidophil	mässig nitrophil
Caloplaca holocarpa - Gr.	ziemlich toxitolanz	subneutrophil - basiphil	nitrophil
Caloplaca cerina	ziemlich toxitolanz	subneutrophil	mässig nitrophil
Physcia aipolia -Gr.	ziemlich toxitolanz	subneutrophil - mässig acidophil	mässig nitrophil
Leptogium saturninum	wenig empfindlich	subneutrophil	mässig nitrophil
Physconia distorta	toxitolanz	subneutrophil - mässig acidophil	mässig nitrophil
Collema cf. nigrescens	toxitolanz	subneutrophil - basiphil	mässig nitrophil
Parmelia subargentifera	toxitolanz	subneutrophil - basiphil	nitrotolerant
Xanthoria parietina	toxitolanz	subneutrophil - basiphil	nitrophil
Xanthoria fallax - Gr.	toxitolanz	subneutrophil	-
Hyperphyscia adglutinata	toxitolanz	subneutrophil	-

positive (acidophile) Arten des Acidoindex			
Flechtenart	Toxitoleranz	pH-Schwerpunkt*	Nitrotoleranz*
Usnea sp.	ziemlich toxitolerant	acidophil	anitrophil
Evernia prunastri	ziemlich toxitolerant	mässig acidophil	anitrophil
Parmelia quercina	wenig empfindlich	mässig acidophil - subneutrophil	anitrophil
Parmelia saxatilis	ziemlich toxitolerant	acidophil	anitrophil
Ramalina pollinaria	empfindlich	acidophil	anitrophil
Parmelia glabra	ziemlich toxitolerant	mässig acidophil - subneutrophil	mässig nitrotolerant
Parmelia caperata	toxitolerant	acidophil	anitrophil
Pertusaria albescens	toxitolerant	mässig acidophil - subneutrophil	nitrotolerant
Hypogymnia tubulosa	wenig empfindlich	mässig acidophil	anitrophil
Parmelia revoluta	toxitolerant	acidophil	nitrotolerant
Parmelia tiliacea	toxitolerant	mässig acidophil - subneutrophil	anitrophil
Parmelia flaventior	ziemlich toxitolerant	acidophil	anitrophil
Pseudevernia furfuracea	empfindlich	acidophil	anitrophil
Parmelia glabratula - Gr.	toxitolerant	acidophil	anitrophil
Parmelia subrudecta	toxitolerant	acidophil	anitrophil
Parmelia exasperatula	ziemlich toxitolerant	mässig acidophil - subneutrophil	mässig nitrotolerant
Hypogymnia physodes	ziemlich toxitolerant	acidophil	anitrophil
Parmelia sulcata	toxitolerant	subneutrophil - acidophil	mässig nitrotolerant
Phlyctis argena - Gr.	toxitolerant	-	-

*nach Wirth 1980 angepasst

Tabelle 9: Flechtenarten des Acidoindex mit ihrer ökologischen Charakterisierung nach Wirth (1980)

Treten in einem Georaum eher saure Belastungen auf, weisen die acidophilen Arten höhere Frequenzwerte auf als die basiphilen Arten. Der Acidoindexwert wird dadurch positiv. Bei eher basischen Belastungen sind die Frequenzwerte der basiphilen Flechtenarten höher und der Acidoindexwert resultiert daraus negativ.

8.2 Acidoindex 2009

Die Acidoindexkarte 2009 zeigt die aktuellen Verhältnisse der Belastungen. In der nachfolgenden Tabelle werden die Symbole der Acidoindexkarte erklärt: Die roten Quadrate stehen für Georaummittelpunkte mit einem positiven Acidowert und dominierenden, sauren Belastungen. Bei den Georäumen mit einem Acidoindex nahe Null besteht nahezu ein Gleichgewicht zwischen den neutro- bis basiphilen und acidophilen Arten. Sie sind in der Karte mit einem schwarzen Punkt dargestellt. Die blauen Kreise stehen für negative Acidowerte und basische Belastungen. Je grösser die Zahl des Acidoindex ist, umso grösser ist auch das Symbol in der Karte. Die gelb eingefärbten Zeilen kommen in der Acidoindexkarte 2009 vor.

Acidowert [+] / saure Belastungen	Acidowert [+/-] / neutrale Belastungen	Acidowert [-] / basische Belastungen
+0.5 - +0.7 		-0.11 - -0.3 
+0.3 - +0.49 	-0.1 - +0.09 	-0.31 - -0.5 
+0.1 - +0.29 		-0.51 - -0.7 

Tabelle 10: Kategorien der Acidoindexkarte

Wie die Abbildung 22 zeigt, kommen in der Acidoindexkarte 2009 (Abb. 26) nur Werte von -0.5 – +0.2 und somit die Belastungsklassen von leicht sauer bis mittel basisch vor. In der Tabelle 11 entsprechen diese Belastungsklassen den kleinen roten Quadraten, den schwarzen Punkten, sowie den kleinen und mittleren blauen Kreisen.

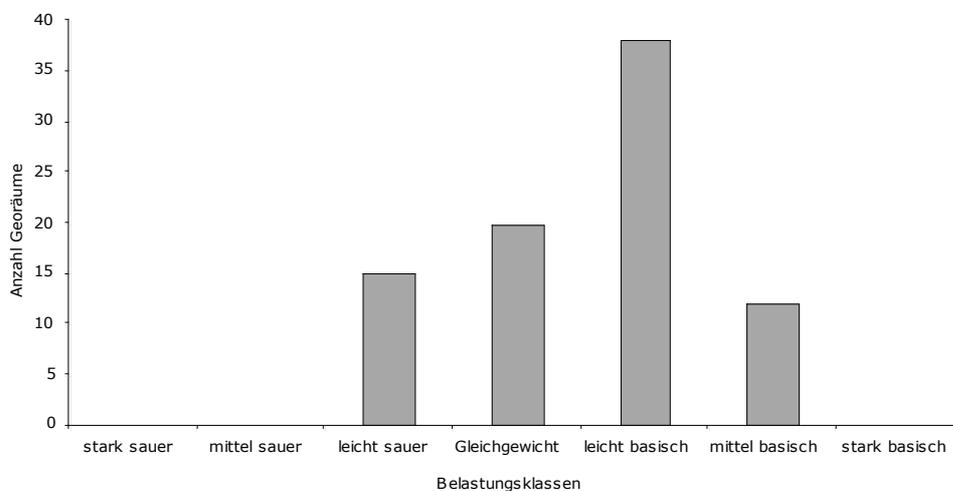


Abbildung 22: Vorkommen der Belastungsklassen im Jahr 2009

Generell betrachtet, weist die Talsohle mit Ausnahme der Region nördlich von Ruggell und Mauren eher basische Belastungen auf. Alle sauren Belastungen kommen im nördlichen Drittel Liechtensteins bis und mit Planken vor. Die Ausnahme bildet eine saure Belastung in Triesenberg. In den höheren Lagen bei Nendeln, Planken und einmal in Triesenberg sowie den Dorfkernen von Mauren und Eschen wurden saure Belastungen festgestellt.

Die stark besiedelten Gebiete von Schaan bis Triesen sind basisch belastet. Triesen, Mäls und ein kleines Gebiet zwischen Schaan und Vaduz bei Mölihholz weisen ein Gleichgewicht zwischen sauren und basischen Belastungen auf. In Triesenberg sind sowohl basische als auch neutrale und eine saure Belastungen festzustellen. Im südlichen Teil von Liechtenstein sind basische Belastungen erkennbar.

8.3 Vergleich der Acidoindexkarten

Der Vergleich der drei Acidoindexkarten 1989, 1999 und 2009 zeigt, dass sich die Tendenz einer Zunahme der basischen Belastungen von 1989 bis 1999 im Jahr 2009 noch verstärkt hat. Im südlichen Teil von Liechtenstein sind die Belastungen eher basisch. Dies kann unabhängig von der Höhenlage festgestellt werden.

Die sauren Belastungen haben von 1989 bis 1999 im Norden von Liechtenstein zugunsten neutralen und basischen Belastungen abgenommen. Die basischen Einflüsse haben sich auch in der Zeit von 1999 bis 2009 zunehmend gegen Norden ausgedehnt. 2009 sind nur noch wenige Standorte überwiegend sauer geprägt.

Generell haben von 1989 bis 2009 im ganzen Untersuchungsgebiet die basischen Belastungen zugenommen. Neutrale Belastungen, die ein Gleichgewicht zwischen basischen und sauren Belastungen darstellen, haben leicht abgenommen. Abbildung 23 veranschaulicht die Verschiebung der Georäume in Richtung einer basischen Belastung.

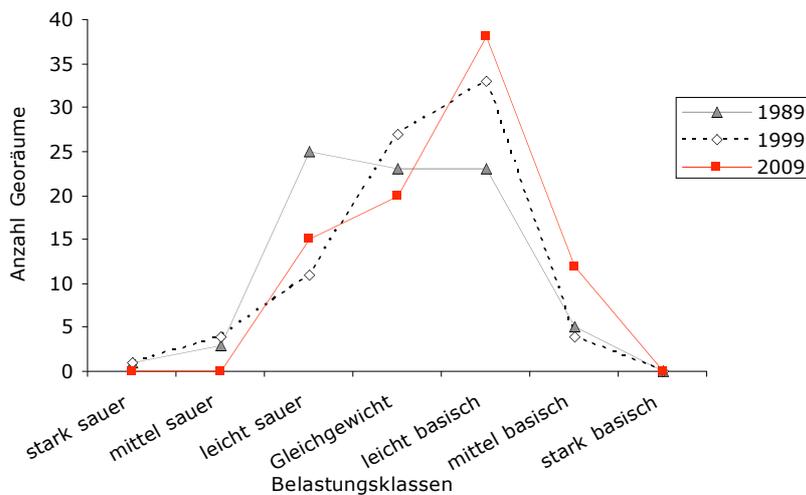


Abbildung 23: Verteilungen der Acidoindex in Richtung zunehmender basischer Belastung

Die Acidoindexkarten von 1989 bis 2009 werden in den folgenden Abbildungen 24 bis 26 von links nach rechts dargestellt.

8.4 Acidoindexkarten 1989 – 2009

- ACIDOINDEXKARTE 1989

Abbildung 24: Acidoindexkarte 1989

Acidoindexkarte 1999

Abbildung 25: Acidoindexkarte 1999

Acidoindexkarte 2009

Abbildung 26: Acidoindexkarte 2009

9 Flechten-Nitroindex (NTOTSCORE und NH3SCORE)

9.1 Grundlagen der Methodenentwicklung (CH-Daten)

Der Flechten-Nitroindex baut wie der Liechtensteiner Acidindex auf der Beobachtung auf, dass nährstoffhaltige Immissionen eine Verschiebung der Flechtenvegetation in Richtung nitrophiler Arten bewirken. Darauf basierend wird seit 2005 im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) für die Anzeige von Gesamtstickstoff und Ammoniak ein spezifisches Flechten-Mass entwickelt – der Flechten-Nitroindex. Messverfahren mit Flechten für Stickstoffbelastungen sind international anerkannt (VDI-Richtlinie 3957, 2004). Der Nitroindex zeigt einen signifikanten und hohen Zusammenhang zur gasförmigen Ammoniakbelastung⁵ (modelliert in Abb. 27).

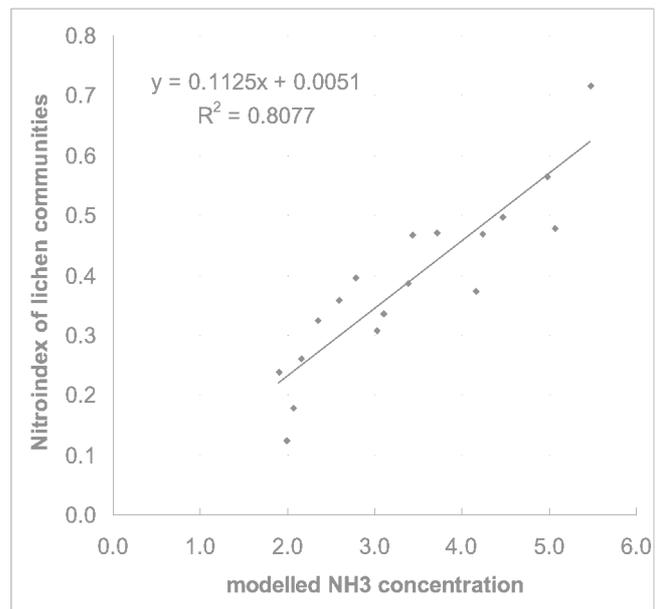


Abbildung 27: Zusammenhang zwischen Flechten-Nitroindex und modellierten NH₃-konzentrationen (Jahresmittel Jahr 2000) (Abbildung aus Rihm et al. 2009)

Zum Team der Methodenentwicklung des Flechten-Nitroindex und seinen Scores gehören neben Kathrin Peter, evaluationen und Martin Urech von puls, Beat Rihm von Meteotest für die Modellierung der Schadstoff- und Klimadaten und Dr. Christian Schindler vom Institute of Social and Preventive Medicine at Swiss Tropical Institute in Basel für die statistischen Auswertungen.

⁵ NH₃GAS ist eine Deposition, Einheiten kg N/ha*yr.

Für die Berechnung des NH₃Scores wurde die Deposition aus der NH₃-Konzentration (Mikrogramm NH₃ pro Kubikmeter) in der Luft mit einer konstanten Depositionsgeschwindigkeit (V_{dep}) von 12 mm/s berechnet. Die 12 mm/s sind etwas willkürlich gewählt (sie entsprechen der Landnutzung Acker/Gras). V_{dep} bezieht sich eigentlich auf eine vertikale Transportrichtung, von der Atmosphäre auf den Boden bzw. auf die Pflanze. Mit allen Einheiten-Umwandlungen geht das so: NH₃GAS = 12 * NH₃_Konzentration * 0.2597

>Evaluationen, Dr. Kathrin Peter zusammen mit puls, Bern

Als Folge der weiteren Methodenentwicklung wird der Nitroindex in zwei Formen gerechnet⁶: NTOTSCORE für die Anzeige des Gesamtstickstoff und NH3SCORE für die Anzeige von Ammoniak. Die statistischen Zusammenhänge stellen sich wie folgt dar (Tabelle 11):

adj. R ²	NTOTSCORE ⁷	NH3SCORE ⁸	Anzahl Stichproben [n]
Georäume (5 Bäume)	0.50	0.45	394
Grossräume (10 bis 35 Bäume)	0.76	0.75	61
Gebiete (ganze Regionen)	0.92	0.94	10

Tabelle 11: Übereinstimmung (adj. R²) der Scores zum Gesamtstickstoff respektive Ammoniak in unterschiedlich grossen Trägerbaumkollektiven

Die vorhandenen Flechtendaten (1829 Bäume aus den Kantonen Aargau, Appenzell, Luzern, Neuenburg, Schwyz, Zug und Zürich) wurden für das Jahr 2000 mit modellierten Schadstoffdaten (Tabelle 11) statistisch geprüft:

- Übereinstimmung bezüglich Gesamtstickstoff und Ammoniak
- Übereinstimmung verschieden grosser Trägerbaumkollektive (Georäume, Grossräume, Gebiete) mit der Belastung

Je grösser das Kollektiv der Bäume und damit das Gebiet, desto höher ist die Übereinstimmung der Scores mit der modellierten Belastung. Aus diesem Grunde werden für die Anzeige der Gesamtstickstoff- und Ammoniakbelastung Gebiete zu Grossräumen als Aussageeinheiten zusammengefasst. Wie beim Georaum handelt es sich beim Grossraum um Kollektive mit benachbarten Bäumen in vergleichbaren geografischen Situationen. Die Anzahl Bäume umfasst je nach Situation in der Regel 10 bis 35 Bäume.

Die Scores können rückwirkend berechnet werden, so werden Untersuchungen aus verschiedenen Jahren vergleichbar.

⁶ Stand der Methodenentwicklung Dezember 2010; Weiterentwicklungen und Anpassungen sind laufend aufgrund neuester Erkenntnisse möglich. Die Formeln sind so gehalten, dass sie jederzeit anpassbar sind.

⁷ basiert auf der Regression mit modellierten Total N (Mittel 2000) [kg N/(ha*yr)]

⁸ basiert auf der Regression mit modellierten Trockendeposition NH₃ Gas (soa00) [kg N/(ha*yr)]

9.2 Berechnung der Scores

Der Nitroindex wird mit zwei Formeln berechnet. Der NTOTSCORE für die Anzeige des Gesamtstickstoff und NH3SCORE für die Anzeige von Ammoniak.

Es gelten:

$$\begin{aligned} \text{NTOTSCORE} &= 0.3 \cdot \text{ORB} + 0.4 \cdot \text{LSUB} + 0.4 \cdot \text{PHLY} - (0.5 \cdot \text{XFAL} + 0.4 \cdot \text{GTUL} + \\ & 0.9 \cdot \text{GRIS} + 1.2 \cdot \text{AIP} + 0.7 \cdot \text{SUL}) \\ \text{NH3SCORE} &= 0.2 \cdot \text{ORB} + 0.1 \cdot \text{ADS} + 0.5 \cdot \text{PHLY} - (0.6 \cdot \text{GRIS} + 0.3 \cdot \text{GTUL} + \\ & 0.7 \cdot \text{AIP} + 0.8 \cdot \text{XFAL} + 0.4 \cdot \text{SUL}) \end{aligned}$$

Die Grossbuchstaben hinter den Koeffizienten sind Abkürzungen der in der Berechnung berücksichtigten Flechtenarten. Dies sind:

ORB	=	Phaeophyscia orbicularis-Gruppe
LSUB	=	Lecanora argentata-Gruppe
PHLY	=	Phlyctis argena-Gruppe
XFAL	=	Xanthoria fallax-Gruppe
GTUL	=	Parmelia glabratula-Gruppe
GRIS	=	Physconia grisea
AIP	=	Physcia aipolia-Gruppe
SUL	=	Parmelia sulcata
ADS	=	Physcia adscendens-Gruppe

Die Scorewerte der einzelnen Trägerbäume werden über ein Kollektiv von 10 – 35 Bäumen zu Grossräumen zusammengefasst und gemittelt. Die Zugehörigkeit der Trägerbäume zu den Grossräumen mit den entsprechenden Scores ist im Anhang unter dem Kapitel 13.6 einsehbar.

9.3 Stickstoff- und Ammoniakbelastung in Liechtenstein

9.3.1 Belastung Gesamtstickstoff (NTOTSCORE)

Die Spannweite der bisher gefundenen NTOTSCORE-Werte⁹ für die Gesamtstickstoffbelastung reicht von -6 bis +4. Die 10 Einheiten werden für Liechtenstein in 5 Klassen eingeteilt. Die Klassenbreite umfasst 2 Einheiten (Tabelle 12).

Belastung mit Gesamtstickstoff	Farbe in Karte	Einheiten
sehr wenig	blau	-6 - -4
wenig	grün	-3.99 - -2
mittel	gelb	-1.99 - 0
stark	orange	0.01 - 2
sehr stark	rot	2.01 - 4

Tabelle 12: Klassifizierung der Werte des NTOTSCOREs

Die Spannweite der in Liechtenstein gefundenen Grossraum-NTOTSCOREs beträgt -5.9 bis 1.4. Sie reicht also von sehr wenig bis stark belastet. Die Belastung in Liechtenstein reicht nicht an die am stärksten belasteten Gebiete der Schweiz heran.

Die Abbildung 28 zeigt die Verteilung der in Liechtenstein gefundenen NTOTSCOREs für die Jahre 1999 und 2009. Seit 1999 hat es weniger sehr wenig belastete Gebiete, weniger mittel belastete und gleich viel stark belastete. Sehr stark belastete Gebiete sind neu hinzugekommen. Die Belastung an Gesamtstickstoff hat insgesamt seit 1999 zugenommen.

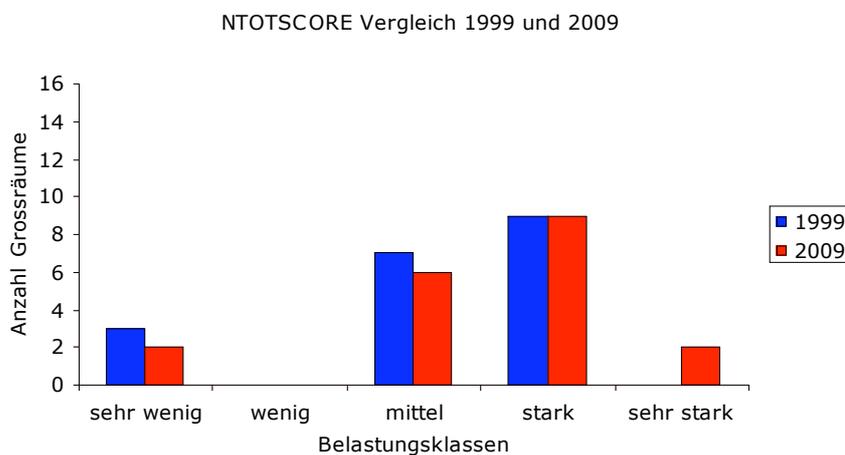


Abbildung 28: Verteilung der NTOTSCOREs 99 und 09

Anhand der Karte des NTOTSCOREs (Abbildung 29) ist ersichtlich, dass die grössten Belastungen an Gesamtstickstoff im Tal zu finden sind. Am stärksten belastet sind die verkehrsreichen, locker besiedelten und landwirtschaftlich genutzten Gebiete bei Eschen und Nendeln. Agglomerationsräume und höher gelegene Gebiete wie Planken und Triesenberg sind mittel und sehr wenig belastet.

⁹ entspricht dem Stand vom Herbst 2010

- Karte NTOTSCORE

Abbildung 29: Karte NTOTSCORE

9.3.2 Belastung Ammoniak (NH3SCORE)

Die Spannweite der bisher gefundenen NH3SCORE-Werte¹⁰ für die Ammoniakbelastung reicht von -4 bis +4. Die in Liechtenstein gefundenen Werte werden fünf Klassen zugeteilt, von -6 bis +4. Die Spannweite der gefundenen Grossraum-NH3SCOREs beträgt -6.12 bis 1.90.

Belastung mit Ammoniak	Farbe in NH3SCORE-Karte	Einheiten
sehr wenig	blau	-6.12 - -4
wenig	grün	-3.99 - -2
mittel	gelb	-1.99 - 0
stark	orange	0.01 - 2
sehr stark	rot	2.01 - 4

Tabelle 13: Klassifizierung der Werte des NH3SCOREs

Abbildung 30 zeigt die Verteilung der in Liechtenstein gefundenen NH3SCOREs für die Jahre 1999 und 2009. In beiden Untersuchungsjahren gab es je einen Grossraum mit sehr wenig und acht Räume mit wenig Belastung durch Ammoniak. Mittlere Belastungen finden sich 1999 noch in neun Räumen, 2009 in sieben Räumen. Hingegen hat die starke Ammoniakbelastung im Jahr 2009 zugenommen. In beiden Untersuchungsjahren gab es keine sehr stark belasteten Gebiete. Die Belastung durch Ammoniak hat sich somit von der mittleren zur starken Klasse verschoben.

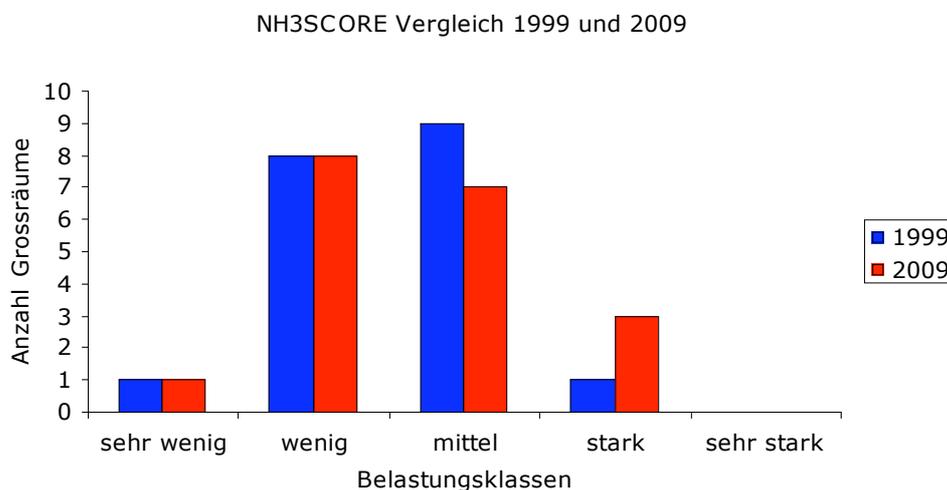


Abbildung 30: Vergleich der NH3SCOREs von 1999 und 2009

¹⁰ entspricht dem Stand vom Herbst 2010 mit Daten der Schweiz (ohne Liechtenstein)

Im Vergleich zu den Schweizer Standorten ordnen sich die in Liechtenstein gefundenen Belastungen mit dem höchsten NH₃SCORE (1.90, Grossraum in der landwirtschaftlich genutzten Ebene bei Nendeln) im mittleren Bereich und mit dem tiefsten NH₃SCORE (-6.12, Grossraum oberhalb Triesenberg) weit unten auf der Skala ein. Der tiefe Wert von -6.12 erstaunt kaum, da es sich bei diesem Wert um ein Gebiet im Übergang zur hochmontanen Stufe handelt, welches im Sommer beweidet wird und keine intensive Landwirtschaft zulässt.

Die Karte des NH₃SCORE (Abbildung 31) zeigt, dass die grössten Belastungen im Tal und in den landwirtschaftlich genutzten Gebieten zu finden sind. Die Dorfkerne und Zentren wie Schaan, Vaduz und Balzers weisen wenig Belastung durch Ammoniak auf. Am stärksten belastet sind locker besiedelte und landwirtschaftlich intensiv genutzte Gebiete bei Nendeln, Eschen und Mauren. Agglomerationsräume und höher gelegene Gebiete, wie Schellenberg, Planken, Triesen und Triesenberg sind mittel und wenig belastet. Die Landwirtschaft gilt als Hauptverursacher von Ammoniakbelastungen. Die höchsten Werte der Belastung im Gebiet Nendeln – Eschen – Mauren verdeutlichen somit die intensive landwirtschaftliche Nutzung dieses Raumes.

Karte NH3SCORE

Abbildung 31: Karte NH3SCORE

10 Flechten-Diversität

10.1 Häufigkeit der Flechtenarten

Bei den Untersuchungen von 2009 und 1999 wurden je 62 Flechtenarten gezählt. Im Jahr 1989 wurden 61 Arten aufgenommen. Die Zusammensetzung des Artenkollektivs hat sich nicht wesentlich verändert. Verändert haben sich die Häufigkeiten der Flechten. Rund zwei Drittel der Flechten treten weniger häufig auf als vor 10 Jahren. Die Tabelle der absoluten und relativen Häufigkeit der Flechtenarten von 1989 bis 2009 ist im Anhang, Kapitel 13.2 aufgeführt.

2009 ist die häufigste Flechte *Candelaria concolor* mit der absoluten Häufigkeit 365 und der relativen Häufigkeit 86% gefolgt von der *Candelariella xanthostigma*-Gruppe (absolute Häufigkeit 343 und relative Häufigkeit bei 81%). Die häufigste Flechte von 1999 war die *Candelariella xanthostigma*-Gruppe mit einer absolute Häufigkeit von 382 und einer relativen Häufigkeit 90%.

Im Jahr 1989 war die *Physcia adscendens*-Gruppe die häufigste Flechtenart mit der absoluten Häufigkeit bei 393 und der relativen Häufigkeit von 93%. Die *Candelariella xanthostigma*-Gruppe trat 392-mal auf mit einer relativen Häufigkeit von 92%. Bei der Untersuchung zur Häufigkeit der Flechtenarten zeigen sich keine erklärbaren Muster.

Die Flechtenarten, deren relative Häufigkeit zugenommen hat, sind schwarz dargestellt. Mehr als ⅔ aller Flechtenarten kommen 2009 weniger häufig vor als noch im Jahr 1999.

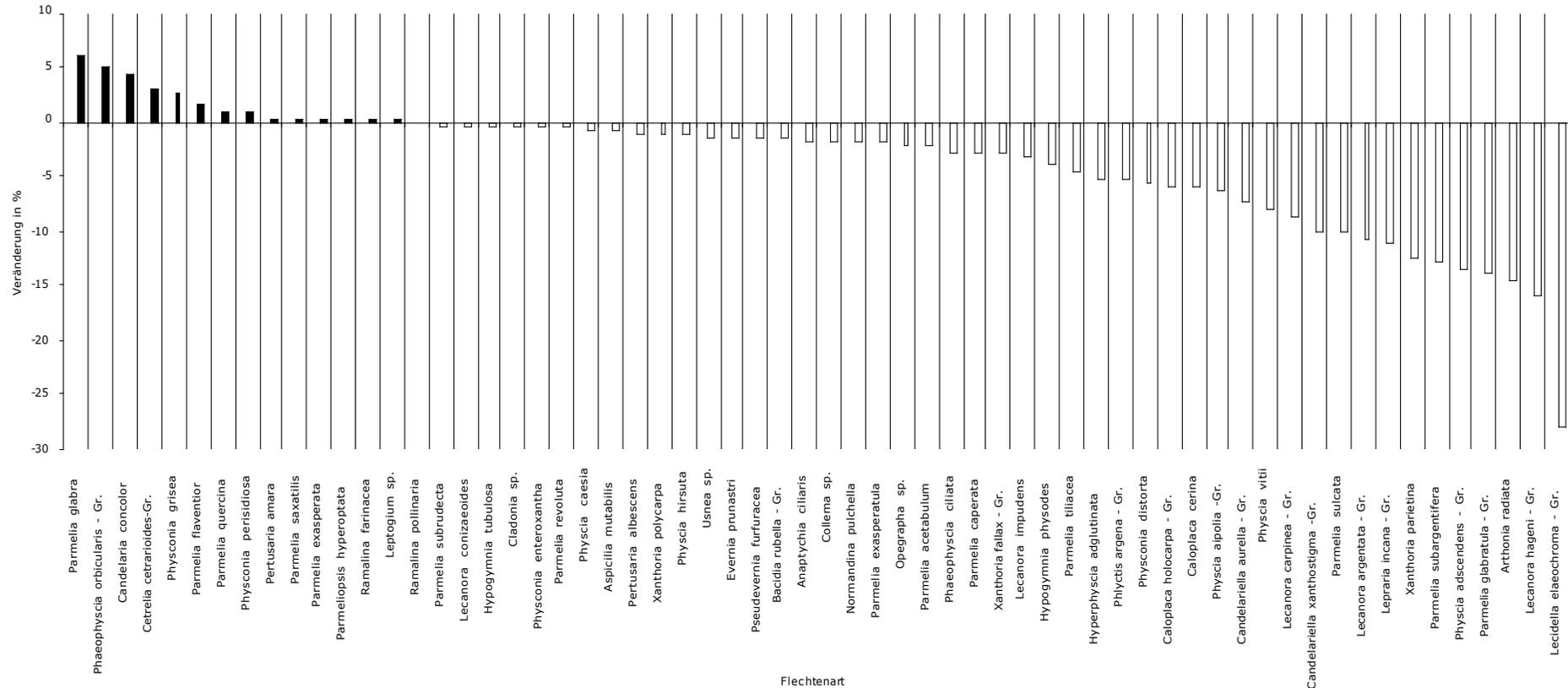


Abbildung 32: Veränderung der relativen Häufigkeit der Flechtenarten von 1999 bis 2009 an 1% der Trägerbäume

Die folgende Abbildung zeigt die Veränderung der relativen Häufigkeit ausgewählter basiphiler und acidophiler Arten zwischen 1999 und 2009. Generell hat die Häufigkeit der Arten beider ökologischer Reaktionsweisen abgenommen. Lediglich drei acidophile Arten und eine basiphile Art kommen 2009 häufiger vor als im Jahr 1999. Die Veränderung der relativen Häufigkeit basiphiler und acidophiler Arten ist von 1999 bis 2009 einseitig abnehmend verlaufen.

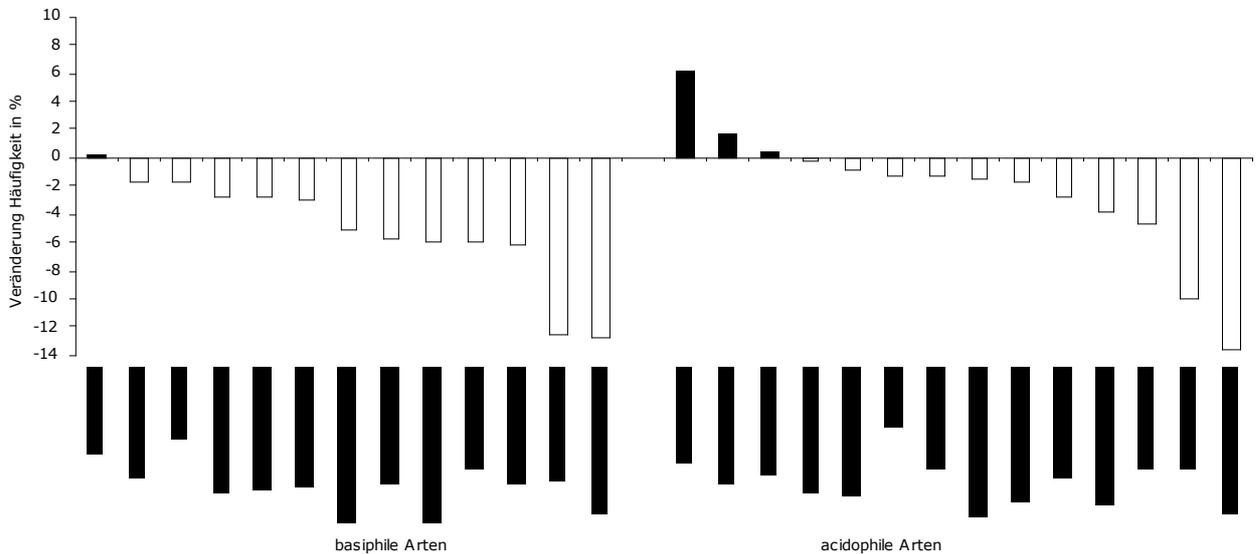


Abbildung 33: Veränderung der relativen Häufigkeit acidophiler und basiphiler Arten von 1999 bis 2009

In Abbildung 34 sind die Veränderungen ausgewählter acidophiler und basiphiler Arten von 1989 bis 1999 visualisiert. Bei den acidophilen Arten zeigen sich mehr Arten mit einer Zunahme, jedoch auch mit grösseren Abnahmen als bei den basiphilen Arten. Die Veränderung der relativen Häufigkeit basiphiler und acidophiler Arten verlief von 1989 bis 1999 beidseitig.

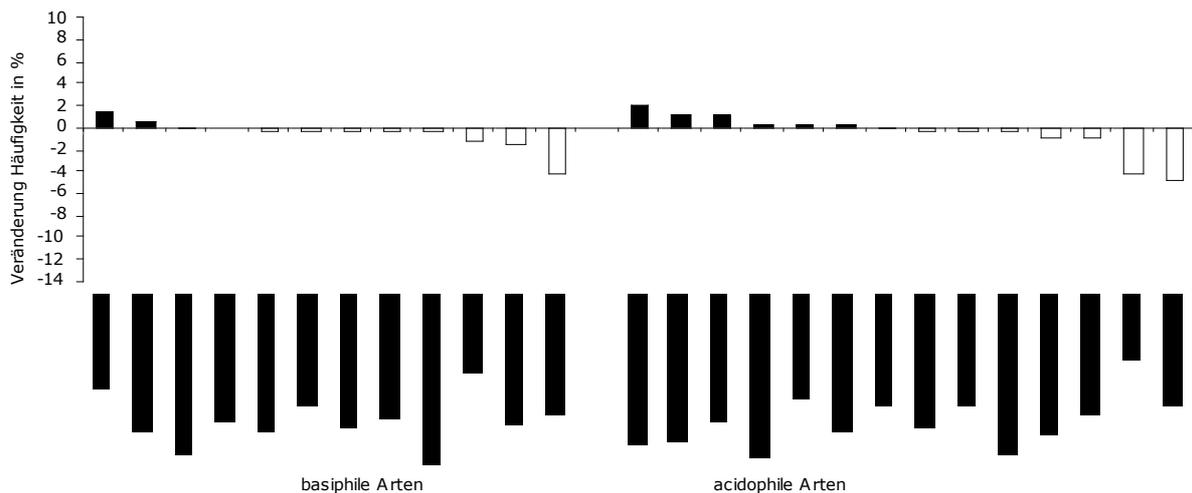


Abbildung 34: Veränderung der relativen Häufigkeit acidophiler und basiphiler Arten von 1989 bis 1999

Von 1999 bis 2009 hat die Häufigkeit von Flechtenarten beider ökologischer Reaktionsweisen stärker abgenommen als von 1989 bis 1999. Zudem haben von 1999 bis 2009 weniger Flechtenarten stärker an Häufigkeit zugenommen als von 1989 bis 1999.

10.2 Toxizität

Die Toxizität ist ein gebietsabhängiges Mass für die Empfindlichkeit der einzelnen Flechtenart gegenüber der Luftverschmutzung. Empfindliche Flechtenarten haben die Tendenz zu höheren Begleitartenzahlen (Anzahl Arten, die zusätzlich zur betrachteten Art an einem Trägerbaum vorkommen). Toxizitäre Arten haben weniger Begleitarten.

10.2.1 Berechnung

Der Toxizitätswert (Q-Wert) ist definiert als Mittelwert der Begleitartenzahlen einer Flechtenart im untersuchten Gebiet. Er wird berechnet, indem für alle Trägerbäume, auf welchen eine bestimmte Flechtenart vorkommt, die Begleitarten summiert werden. Diese Begleitartenzahl wird dann durch die Anzahl Trägerbäume, an welchen die Art vorkommt, dividiert.

10.2.2 Toxizität 2009

Mittels des Q-Wertes werden die Flechten in fünf Empfindlichkeitsstufen, die Toxizitätsklassen, eingeteilt. Die Klassifizierung wurde für Liechtenstein bereits 1989 wie folgt vorgenommen:

Toleranzklasse	Toxizitätswert - Klassengrenzen	Anzahl Flechten 2009	Anzahl Flechten 1999	Anzahl Flechten 1989
sehr empfindlich	>16.1	0	1	1
empfindlich	16.0 - 14.9	0	4	6
wenig empfindlich	14.8 - 13.5	1	15	14
ziemlich toxisch	13.4 - 12.0	11	13	10
toxisch	<11.9	28	6	5
Total		40	39	36

Tabelle 14: Unterteilung der Toxizitätsklassen und Anzahl Flechten, die 2009, 1999 und 1989 in den Klassen vorkamen.

Der Toxizitätswert wird für diejenigen Flechtenarten berechnet, welche im Untersuchungsgebiet an mindestens 1% (5 von 426) der Trägerbäume aufgetreten sind. Die Flechtenarten sind in folgender Tabelle mit entsprechender Toxizität dargestellt.

Flechtenart	Anzahl Trägerbäume	Anzahl Begleitarten	Toxizitätswert	Toxizität
Leptogium sp.	7	95	13.6	wenig empfindlich
Cetrelia cetrarioides	14	187	13.4	ziemlich toxisch
Parmelia glabra	56	746	13.3	ziemlich toxisch
Evernia prunastri	7	93	13.3	ziemlich toxisch
Ramalina farinacea	6	79	13.2	ziemlich toxisch
Parmelia saxatilis	7	92	13.1	ziemlich toxisch
Caloplaca holocarpa - Gr.	11	141	12.8	ziemlich toxisch
Caloplaca cerina	15	190	12.7	ziemlich toxisch
Physconia grisea	17	213	12.5	ziemlich toxisch

Flechtenart	Anzahl Trägerbäume	Anzahl Begleitarten	Toxitoleranz- wert	Toxitoleranz
Physcia aipolia -Gr.	77	959	12.5	ziemlich toxitolerant
Parmelia exasperatula	39	477	12.2	ziemlich toxitolerant
Parmelia flaventior	24	287	12.0	ziemlich toxitolerant
Parmelia glabratula - Gr.	72	858	11.9	toxitolerant
Lecanora carpinea - Gr.	83	971	11.7	toxitolerant
Parmelia sulcata	121	1413	11.7	toxitolerant
Lecanora hageni - Gr.	59	684	11.6	toxitolerant
Parmelia tiliacea	145	1681	11.6	toxitolerant
Physconia distorta	123	1401	11.4	toxitolerant
Arthonia radiata	51	578	11.3	toxitolerant
Pertusaria albescens	95	1054	11.1	toxitolerant
Parmelia subrudecta	127	1392	11.0	toxitolerant
Parmelia subargentifera	96	1048	10.9	toxitolerant
Lecidella elaeochroma - Gr.	190	2044	10.8	toxitolerant
Parmelia caperata	13	133	10.2	toxitolerant
Xanthoria parietina	204	2068	10.1	toxitolerant
Physcia vitii	47	475	10.1	toxitolerant
Phlyctis argena - Gr.	237	2387	10.1	toxitolerant
Bacidia rubella - Gr.	9	90	10.0	toxitolerant
Physcia adscendens - Gr.	318	3157	9.9	toxitolerant
Lecanora impudens	51	500	9.8	toxitolerant
Normandina pulchella	38	372	9.8	toxitolerant
Lecanora argentata - Gr.	307	2999	9.8	toxitolerant
Opegrapha sp.	55	535	9.7	toxitolerant
Lepraria incana - Gr.	74	712	9.6	toxitolerant
Phaeophyscia orbicularis - Gr.	324	3090	9.5	toxitolerant
Candelariella xanthostigma -Gr.	343	3257	9.5	toxitolerant
Collema sp.	8	75	9.4	toxitolerant
Xanthoria fallax - Gr.	259	2392	9.2	toxitolerant
Candelaria concolor	365	3316	9.1	toxitolerant
Hyperphyscia adglutinata	162	1404	8.7	toxitolerant

Tabelle 15: Toxitoleranz der Flechtenarten mit einem Vorkommen von > 1%

Im Rahmen der Untersuchung von 2009 kommen nur Flechtenarten in den Toxitoleranzstufen „wenig empfindlich“, „ziemlich toxitolerant“ und „toxitolerant“ vor. Die Flechtenart mit dem höchsten Toleranzwert ist *Leptogium* sp. Sie ist der Toleranzklasse „wenig empfindlich“ zuzuordnen und ist die einzige in dieser Klasse.

Elf Flechtenarten befinden sich in der Toxitoleranzklasse „ziemlich toxitolerant“. Die grösste Gruppe bildet die resistenteste Toxitoleranzklasse mit den niedrigsten Werten: 28 Flechtenarten sind dieser Gruppe zugeordnet.

10.2.3 Veränderung der Toxitoleranz

Sowohl die acidophilen als auch die basiphilen Arten haben sich bezüglich der Toxitoleranz negativ verändert (Abb. 35). Nur die Flechtenarten *Anaptychia ciliaris*, *Pseudevernia furfuracea* und *Evernia prunastri* weisen im Jahr 2009 durchschnittlich mehr Begleitarten auf als noch 1999.

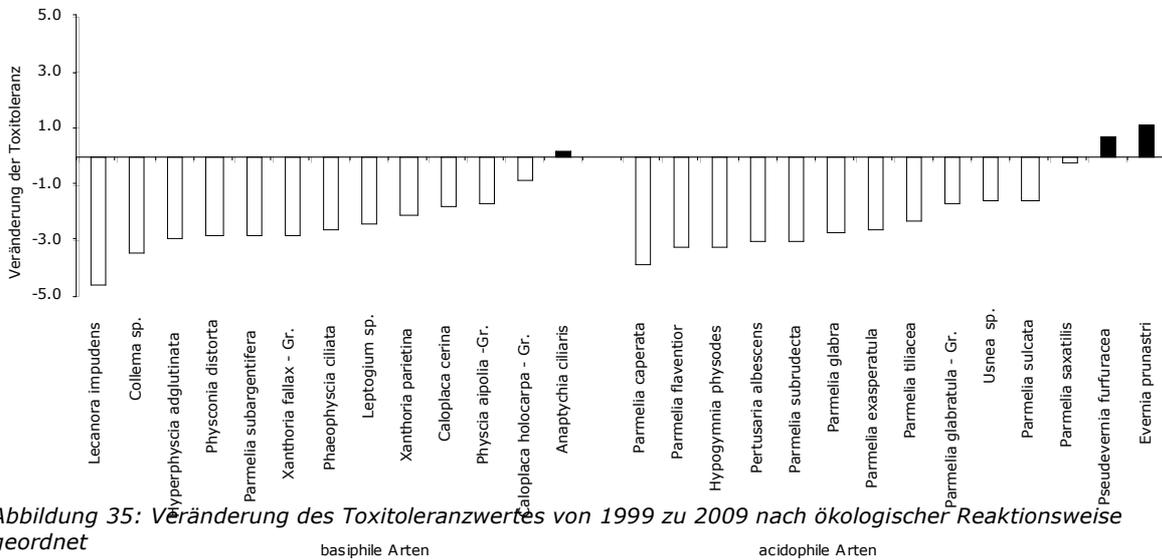


Abbildung 35: Veränderung des Toxitoleranzwertes von 1999 zu 2009 nach ökologischer Reaktionsweise geordnet

Abbildung 36 zeigt wie sich die Toxitoleranz von 1989 bis 2009 entwickelt hat. Die Verteilung der Toxitoleranzklassen von 1989 und 1999 ist ähnlich. Im Vergleich dazu hat sich die Verteilung von 2009 stark verändert und ist einseitig geworden. Im Jahr 2009 kommen einerseits keine Flechtenarten in den Toxitoleranzklassen sehr empfindlich bis empfindlich und nur einige in der empfindlichen Klasse vor. Andererseits sind deutlich mehr Flechtenarten der Klasse toxitolerant zuzuordnen. Das heisst, dass die Flechten 2009 kleinere Begleitartenzahlen aufweisen als in den Jahren 1999 und 1989. Dennoch ist die Gesamtzahl der Flechten stabil geblieben.

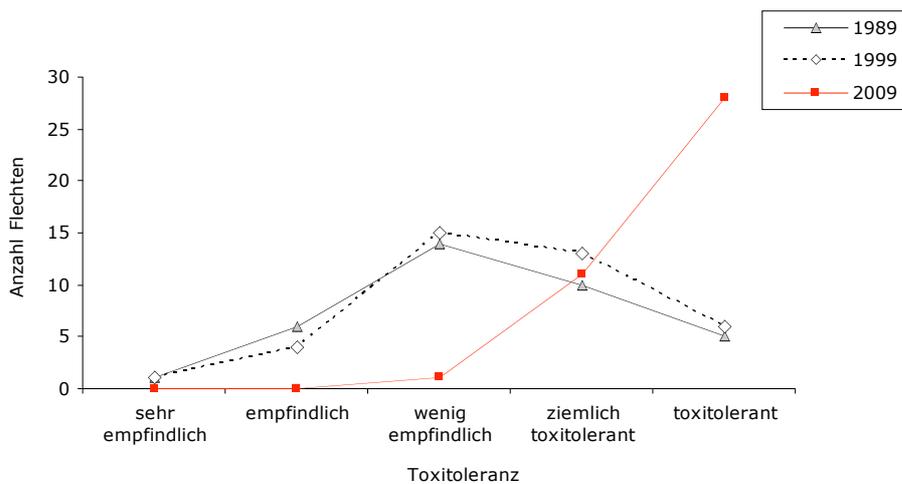


Abbildung 36: Vergleich der Toxitoleranz der Flechtenarten von 1989 bis 2009 bei mind. fünf (1%) Trägerbäumen (vgl. Tabelle 14)

10.3 Entropie

Entropie ist in der Informationstheorie ein Mass für die Informationsdichte eines Systems. Je höher die Entropie, desto mehr Informationseinheiten sind enthalten. In der Ökologie beschreibt Entropie mit dem „Shannonschen Diversitätsindex“ (Beierkuhnlein 2003) oder auch der „Shannonsche Informationsentropie“ (Jenssen 2006) die Diversität eines Ökosystems (oder eines Untersuchungsgebietes). In diesem Index wird zusätzlich zur Artenzahl auch die relative Häufigkeit der vorkommenden Arten berücksichtigt. Die Entropie wird wie folgt berechnet:

$$H = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$$

H entspricht dem Entropiewert, s ist die Artenzahl im Untersuchungsgebiet, i steht für die einzelne Art und p_i entspricht der relativen Häufigkeit der Art (Jenssen 2006).

Entropie ist das Mass für die Ungewissheit, ob eine bestimmte Flechtenart an einem Trägerbaum zu finden ist. Die Ungewissheit steigt mit zunehmender Diversität und höherem Entropiewert. Wenn in einem Untersuchungsgebiet nur eine Art vorkommt, ist der Entropiewert gleich 0 (Jenssen 2004). Die Entropie ist von der Grösse eines Gebietes unabhängig und läuft mit zunehmender Diversität asymptotisch gegen einen maximalen Wert, der das Potential der Diversität eines Ökosystems bezeichnet.

Um das ökologische Potential in Liechtenstein zu beschreiben, wurde der Entropiewert aus den Flechtenwerten von Bäumen berechnet, die im Jahr 1989 viel und normalen Flechtenbewuchs aufwiesen (IAPBR-Werte über 81 – blaue und grüne Zone). Dieser Wert beträgt 5.10 (100%) und wird als maximale Diversität (ökologisches Potential) für Liechtenstein gesetzt.

Abbildung 37 zeigt die Entropiewerte der drei Untersuchungen im Vergleich zum Potential an Diversität. Die Flechtendiversität der Untersuchungen 1989 und 1999 waren mit je 96% des maximalen Wertes etwa gleich hoch (4.90 und 4.91). Seit 1999 hat der Entropiewert um 0.18 abgenommen auf 4.73 und entspricht nur noch 92.5% des maximalen Wertes.

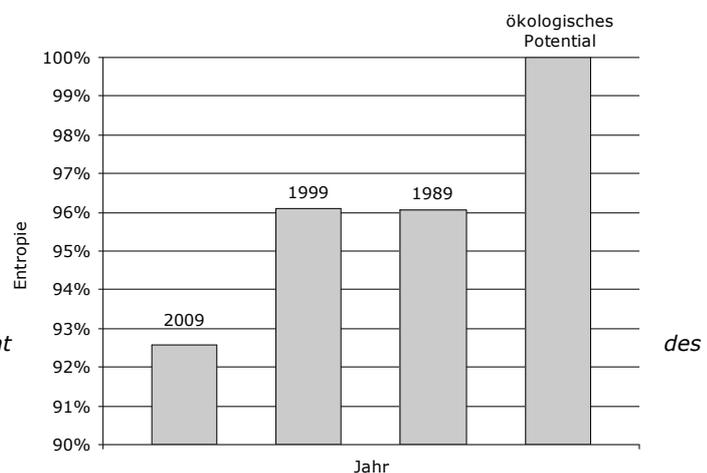


Abbildung 37 zeigt die Entropiewerte der Untersuchungen von 1989 bis 2009 in Prozent maximalen Wertes (ökologisches Potential).

11 Schlussfolgerungen

Die Auswertungen zur Flechtenerhebung 2009 im Vergleich zu 1999 und 1989 zeigen zwei Phänomene:

1. Abnahme der IAPBR-Mittelwerte des Trägerbaumkollektivs und des Georaumkollektivs sowie Abnahme der Standardabweichungen. Das Phänomen ist 2009 verstärkt.
2. Verlust der Flechtendiversität bei gleich bleibenden Artenzahlen. Erstaunlich dabei ist, dass sich diese Entwicklung im Rückblick kaum abgezeichnet hatte.

Zu 1. Verschiebung der IAPBRs Richtung tieferer Luftgütewerte bei den Einzelbäumen und den Georäumen

Die Abnahme findet zusammen mit einer einseitigen Verschiebung der IAPBR-Werte von wenig belastet zu stärker belastet statt (von blau nach grün - von grün nach gelb - von gelb nach orange - von orange nach rot). War der Mittelwert bei der Verteilung 1999 mit IAPBR = 64.76 noch ungefähr gleich hoch wie 1989 mit IAPBR = 65.33, so ist er 2009 bedeutend tiefer (IAPBR= 51.1 (Abbildung 2).

Die Mittelwerte 1989 und 1999 waren noch ungefähr gleich hoch, die Standardabweichungen jedoch bereits verschieden: 1999 zeigte eine höhere und engere Amplitude als die Verteilung von 1989, d.h. es gab bereits 1999 mehr Bäume in der mittleren, gelben Zone als 1989. Der Rückgang war damals im oberen und im unteren IAPBR- Bereich ungefähr gleich stark. Die Veränderungen von 1989 zu 1999 waren beidseitig.

Im Unterschied dazu ist die Verschiebung des Mittelwertes von 1999 zu 2009 hin zu einem tieferen Wert als einseitig einzustufen. Die Standardabweichung von 2009 zeigt nochmals eine höhere und engere Amplitude als 1999 und damit eine Anhäufung der Werte in der orangen Zone.

Zu 2. Verschiebung des Flechtenbewuchses in Richtung tieferer Diversität bei gleich bleibenden Artenzahlen

Eine Verschiebung des Vorkommens von Flechten in Richtung tieferer Zone ist zu beobachten: Flechten, welche 1999 an Trägerbäumen der blauen, gelben oder grünen Zonen (mit höheren Begleitartenzahlen) vorkamen, kommen nun an Bäumen der gelben, orangen oder roten Zone (mit tieferen Begleitartenzahlen) vor. Die Toxitoleranz der einzelnen Flechten ist gestiegen (vgl. Abbildung 36, Kapitel 10.2.3) Die Flechtendiversitäten der Untersuchungen 1989 und 1999 betrugten je 96% des maximalen Entropiewertes. Sie ist 2009 auf 92.5% gesunken.

Als Auslöser dieser Entwicklungen kommen vier Faktorengruppen in Frage:

- 1 Methodische Gründe: Faktoren methodischer und erhebungstechnischer Art, wie Baumauswahl, Einflüsse einzelner Bearbeiter und –innen etc.
- 2 Natürliche Prozesse: Biologisch-dynamische Veränderungsprozesse innerhalb des Systems, wie endogene Auslöser für Artenverschiebungen (ohne Änderungen äusserer Faktoren).
- 3 Änderung Standortfaktoren: Physikalisch-chemische Veränderungen am Standort wie klimatischer Wandel, der sich ausdrückt in der Erhöhung von Temperaturen und Veränderungen von Niederschlagsereignissen.
- 4 Lufthygiene: Veränderungen im räumlich-zeitlichen Muster der Luftbelastung aufgrund von Emissionsveränderungen und veränderter Schadstoffzusammensetzungen in der Luft.

Um die Auslöser der Veränderungen zu identifizieren, werden die Phänomene den einzelnen Faktorengruppen gegenübergestellt und diskutiert. Die Analyse erfolgt wie bereits in der Untersuchung von 1999 schrittweise und indem Erklärungsmuster gesucht werden.

11.1 Klären methodischer Ursachen

Die Flechtenindikationsmethode ist ein hoch standardisiertes Erhebungsverfahren mit folgenden Arbeitsschritten:

1. Auswählen der am besten geeigneten Trägerbäume
2. Auswählen der Aufnahmefläche in der Hauptexposition
3. Bestimmen und Zählen der Flechtenarten und -artengruppen
4. Koordinaten des Trägerbaumstandortes bestimmen
5. Bilden der Georäume und Georäummittelwerte

Die Methodenentwicklung in den 80er Jahren hatte die Standardisierung der Erhebung als oberstes Ziel. Dabei galt es, die Methode soweit zu optimieren, dass die gefundenen IAPBR-Unterschiede einzig allein durch die Unterschiede der Luftbelastungen erklärt werden konnten. Trotz dieser aufwändigen Entwicklungsarbeiten sind verschiedene methodische Ursachen denkbar. Vor allem die Arbeitsschritte 1 und 3 können unter bestimmten Bedingungen zu methodischen Verschiebungen der IAPBRs führen:

- Zu 1. Falls die Zusammensetzung der Trägerbäume von 2009 in Baumart und Stamm-dicke zu stark von derjenigen von 1999 abweicht.

Erläuterung:

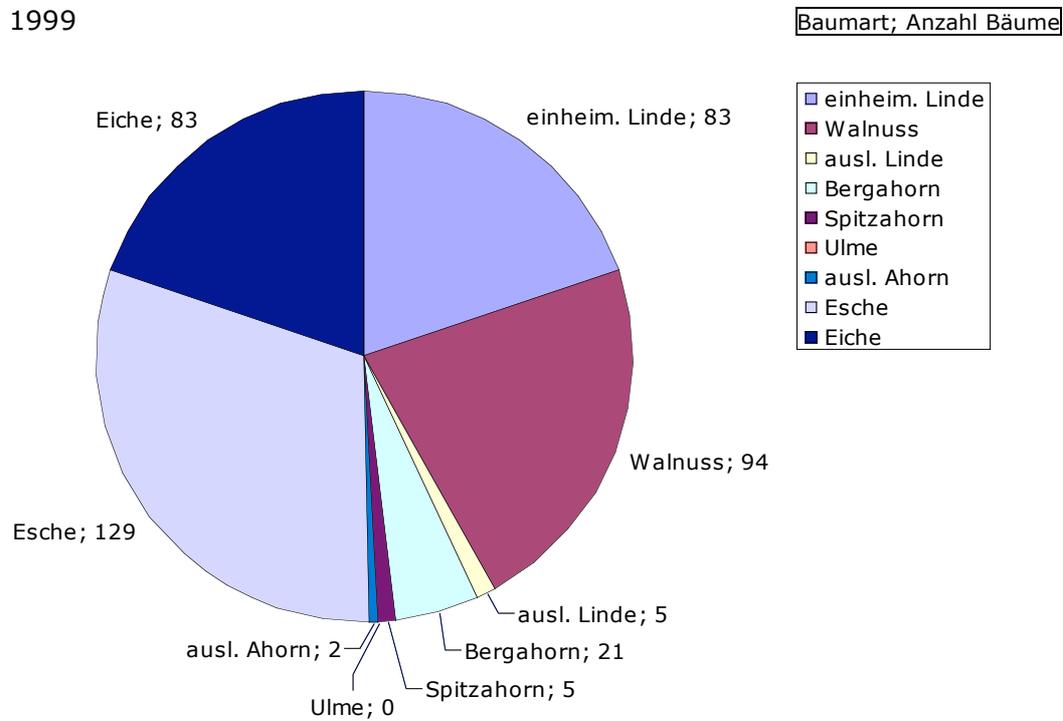
Eine aufgrund der veränderten Trägerbaumsituation einseitige Baumartenverteilung kann in Gebieten mit wenig Trägerbäumen zu Verschiebungen im Flechtenbewuchs führen und damit zu Unterschieden in der Anzahl und Zusammensetzung von basi- und acidophilen Flechten auf einem Trägerbaum. Baumarten weisen beachtliche Unterschiede in der Borkenbeschaffenheit auf. Neben mechanischen Eigenschaften spielen auch Unterschiede im Basengehalt (pH-Wert) und im Mineralstoffgehalt eine Rolle. Der pH-Wert der Borke beeinflusst das Stammabflusswasser und bewirkt unterschiedliche Pufferung in der chemischen Zusammensetzung der Nässe, der die Flechten ausgesetzt sind. Für die Erhebung mit der Bioindikationsmethode werden daher nur Baumarten zugelassen, die ähnliche pH-Bereiche und Borkenstrukturen aufweisen.

Abbildung 38 auf der nachfolgenden Seite zeigt den Vergleich der Baumarten der Jahre 1999 und 2009. Die Anzahl der Eichen und Linden sind gleich geblieben. Es wurden mehr Spitz- und Bergahorn kartiert, dafür 10% weniger Eschen und Walnuss. Der statistische z-Test der beiden Kollektive Eschen und Walnuss contra Spitz- und Bergahorn ergab die Testgrösse $z = 0.58$ ($z_{0.95} = 1.645$). Sie ist somit kleiner und gibt dadurch keinen Grund zur Annahme, dass die Mittelwerte der beiden Kollektive signifikant verschieden sind. Dies bedeutet, dass die IAPBR-Werte der verschiedenen Baumarten der gleichen Grundgesamtheit entstammen und daher die Baumartenzusammensetzung von 2009 gleichwertig ist.

Ergebnis:

Die Verschiebung der IAPBRs hin zu tieferen Werten ist nicht mit der Baumartenauswahl zu erklären und damit lässt sich auch nicht die Tendenz zu dem höheren Acidoindex in Richtung basischer Belastungen erklären.

1999



2009

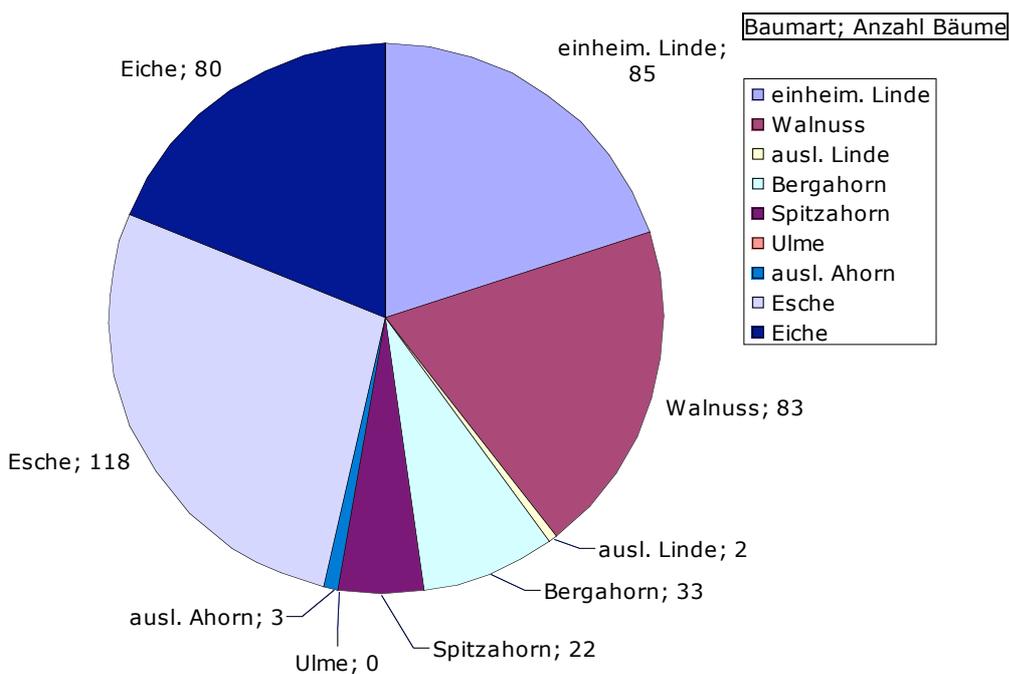


Abbildung 38: Vergleich der Baumartenauswahl 1999 und 2009

Zu 2. Falls die Hauptexposition des Flechtenbewuchses im 2009 nicht mehr der Hauptexposition von 1999 entspricht (z. B. wegen Efeubewuchs, Mistspuren) und die Aufnahmefläche nicht angepasst wurde.

Erläuterung:

Wurden solche Störungen der Aufnahmefläche bei der Wiederholungsuntersuchung 2009 entdeckt, so wurde die Aufnahmefläche verschoben oder der Baum durch einen neuen einwandfreien Trägerbaum ersetzt. Für die Erhebung wurde immer die Baumseite mit dem grössten Flechtenbewuchs verwendet.

Ergebnis:

Es kann daher ausgeschlossen werden, dass Veränderungen der Lage der Aufnahmeflächen zur beobachteten Abnahme der IAPBR-Werte beigetragen haben.

Zu 3. Falls Flechtenarten unterschiedlich identifiziert werden und so zu verschiedenen IAPBR-Werten führen.

Erläuterung:

Die Ansprache von Flechtenarten ist äusserst anspruchsvoll und fehleranfällig. Die Systematik der Flechten unterliegt einem starken Wandel. Es kann vorkommen, dass verschiedene Personen die gleiche Art verschieden ansprechen. Das Zusammenfassen schwierig anzusprechender Flechtenarten zu Gruppen mit einfachen Erkennungsmerkmalen soll dem entgegenwirken. An der Erhebung arbeiteten hoch qualifizierte Personen mit. Absprachen und Abstimmungen untereinander, das Sammeln von Herbarbelegen und Proben dienten der Qualitätssicherung. Zur Kontrolle wurden an einzelnen Bäumen auch Stichproben durchgeführt. Mit zunehmender Erfahrung der Kartierperson kann sich auch der eigene Artbegriff ändern. Wir gehen davon aus, dass bei diesem heiklen Arbeitsschritt die grösstmögliche Sorgfalt angewandt wurde, so dass Fehler gering sind. Systematische Fehler in der Ansprache würden sich personenbezogen oder gebietsweise ausdrücken (das Erhebungsgebiet wurde auf verschiedene Personen aufgeteilt). Es wurden keine solchen Muster gefunden.

Ergebnis:

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Ansprache der Flechtenarten die beobachtete Verschiebung der IAPBRs in Richtung tieferer Werte nicht erklärt.

Zu 4 und 5. Die Lage des Trägerbaumes wird mit Koordinaten festgehalten. Die Koordinatenangaben werden durch ein aufwändiges Kontrollverfahren gesichert. Die Georambildung und das Herstellen der Karten folgen streng nach Vorgaben der Erstuntersuchung und unterstehen ebenfalls einer Qualitätskontrolle. Hier können sich zwar systematische Methodenfehler verstecken, solche hätten jedoch bereits bei früheren, andernorts durchgeführten Untersuchungen entdeckt werden müssen.

Ergebnis:

Die Arbeitsschritte 4 und 5 sind als Ursachen der beobachteten Entwicklungen weitgehend aus zu schliessen.

11.2 Natürliche Veränderungsprozesse

11.2.1 Einzelbaumauswertung

Als Ursachen tieferer IAPBR-Werte und der beobachteten Verschiebung des Vorkommens der Flechtenarten in Richtung tieferer Zonen können ebenfalls natürliche Veränderungsprozesse in Frage kommen. Endogene Prozesse verlaufen langsam. Sie sind normalerweise nicht auf ein Gebiet beschränkt und sollten auch in anderen resp. benachbarten Regionen zu beobachten sein. Diese Entwicklungen müssten sich folglich bereits zwischen 1989 und 1999 angedeutet und bis 2009 weiter fortgesetzt haben.

Wir bedienen uns für den Nachweis des Vergleiches der Entwicklungen beim Flechtenbewuchs von 1989 bis 1999 und von 1999 bis 2009 anhand von folgenden Schlüsselgrößen:

- Artenzahl pro Baum und Zone (Kapitel 5.2)
- Artenvielfalt pro Zone (Kapitel 5.2)
- Acidoindex (Kapitel 8)
- Artenzahl und mittlere Frequenzen einzelner Flechtenarten und -gruppen (Kapitel 10.1)
- Entropie (Kapitel 10.3)

11.2.2 Artenzahl pro Baum und Zone

Die Artenzahlen pro Baum und Zone sind für die Zeitpunkte 1989, 1999 und 2009 gleich. Eine Veränderung der Artenzahl in Abhängigkeit von der Zone (und damit des IAPBR-Wertes) zeichnet sich nicht ab.

11.2.3 Artenvielfalt pro Zone

Die Artenvielfalt pro Zone ist für die Zeitpunkte 1989, 1999 und 2009 konstant. Eine Entwicklung der Artenvielfalt in Abhängigkeit von der Zone (und damit des IAPBR-Wertes) zeichnet sich nicht ab.

11.2.4 Acidoindex

Die Entwicklung des Acidoindex verläuft seit 1989 in die gleiche Richtung. Er wird basischer. Drei Phänomene widersprechen der Annahme, dass es sich um einen natürlichen, intrinsischen Prozess handeln dürfte, sondern dass es vielmehr um eine von Aussen beeinflusste Entwicklung geht:

1. Der Trend ist nicht in allen Teilen Liechtensteins gleich. Er verläuft im Norden unterschiedlich zum Süden.
2. Die Baumartenzusammensetzung lässt keine Erklärung zu, wieso basiphile Arten häufiger auftreten.
3. Die wissenschaftlich abgesicherten Scores des Nitroindex belegen die Zunahme des Gesamtstickstoffes und der Ammoniakbelastung für 2009.

11.2.5 Artenzahl und mittlere Frequenzen einzelner Flechtenarten und -gruppen

Die beobachteten Änderungen in der Häufigkeit einzelner Flechtenarten lassen keine eindeutigen Muster erkennen, die über spezifische Eigenschaften von Artengruppen erklärbar sind. So haben zum Beispiel seit 1999 die Häufigkeiten der meisten Flechten sowohl der acido- wie auch der basiphiler Arten abgenommen. Bei den acidophilen Arten zeigen sich im Vergleich zu den basiphilen Arten mehr Arten mit einer Zunahme, jedoch auch die grösseren Abnahmen. Dazu kommt, dass die Entwicklungen seit 1989 nicht gleich verlaufen: Von 1989 bis 1999 verliefen die Veränderungen beidseitig. Von 1999 bis 2009 gibt es nur Abnahmen, die Entwicklung ist einseitig. Auch bei Artenzahl und mittleren Frequenzen allgemein lassen sich die Verschiebungen nicht auf einen endogenen Prozess zurückführen.

11.2.6 Entropie

Am deutlichsten zeigt sich bei der Entropie, dass es sich bei den beobachteten Verschiebungen nicht um einen endogenen Prozess handeln kann. Eine Abnahme der Informationsdichte eines Systems ist per se an einen Einfluss von Aussen gebunden. Ausserdem nimmt der Diversitätsindex erst seit 1999 bemerkbar ab.

11.3 Änderung Standortfaktoren

Langfristige Trends beim Klima zeigen, dass sich in den letzten dreissig Jahren in Liechtenstein signifikante Veränderungen bei der mittleren Temperatur und dem Niederschlag ergeben haben. Der mittlere Temperaturanstieg seit 1980 beträgt für Liechtenstein +0.67 Grad Celsius und ist signifikant¹¹. Ebenfalls signifikant ist der Rückgang des Niederschlages um -5.9%¹². Der Verlauf der Tagesmittel - Lufttemperatur seit 1989 (Dauer Flechtenuntersuchung) zeigt eine bemerkenswerte Steigerung in den letzten paar Jahren (Abbildung 39).

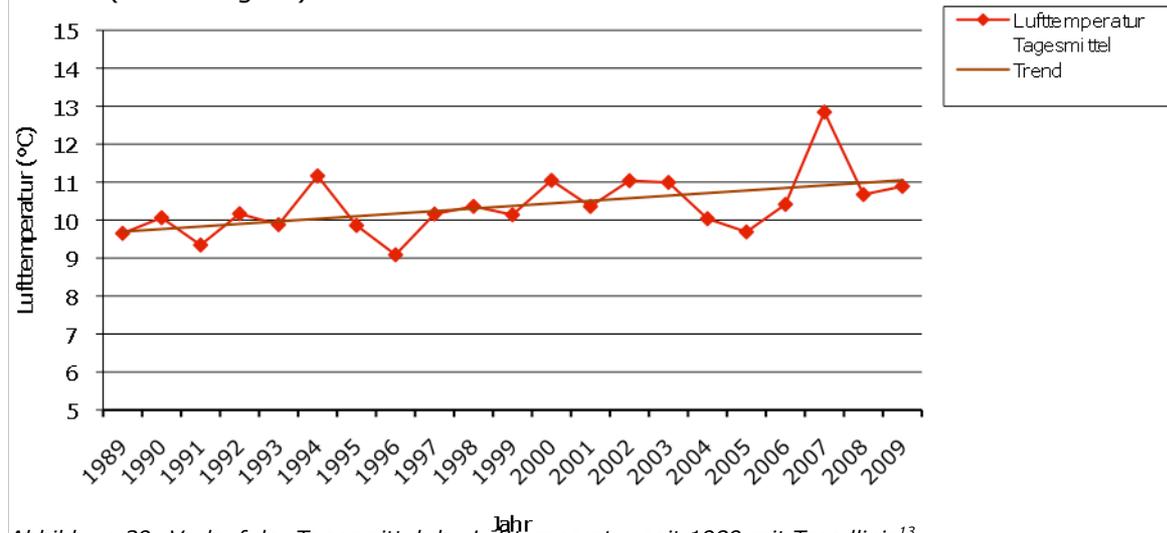


Abbildung 39: Verlauf der Tagesmittel der Lufttemperatur seit 1989 mit Trendlinie¹³

Abbildung 40 zeigt den Verlauf des Niederschlages seit 1989. Das Jahr 2003 fällt durch die deutlich kleineren Niederschlagsmengen auf. Ausserdem folgten auf dieses Jahr noch weitere überdurchschnittlich trockene Jahre.

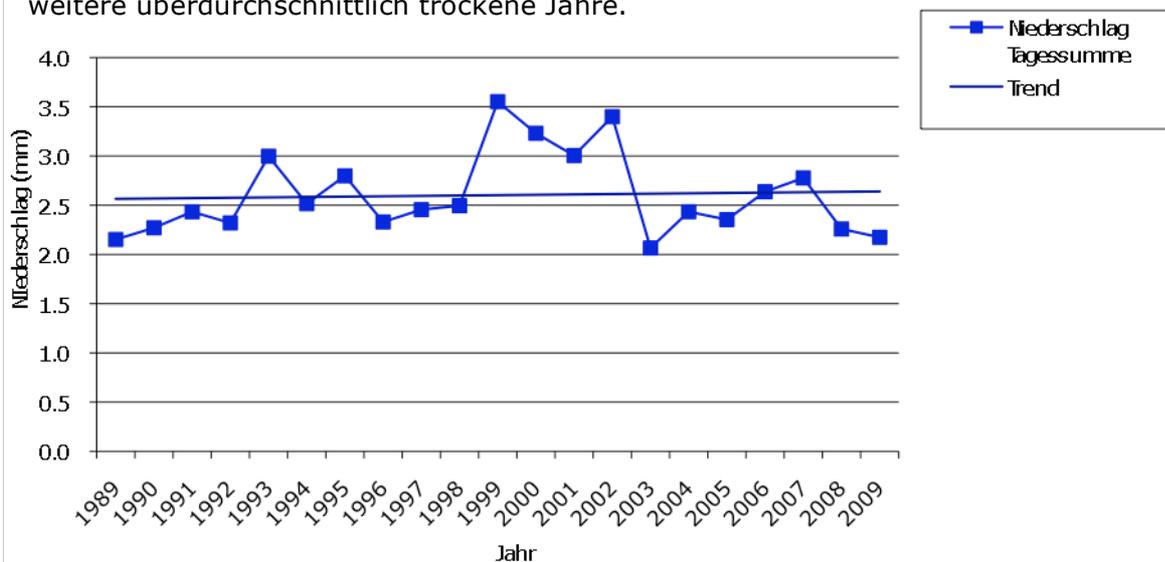


Abbildung 40: Verlauf des Niederschlages in Tagessummen wiedergegeben

¹¹ Vgl. http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_heute/trends_an_stationen.html

¹² Vgl. http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_heute/trends_an_stationen.html

¹³ Die Klimadaten von Liechtenstein wurden uns vom Auftraggeber, dem Amt für Umweltschutz Liechtenstein, zur Verfügung gestellt.

Es ist wenig bekannt über die Auswirkungen des Klimawandels auf das Lebewesen Flechte. Unseres Erachtens ist es jedoch nicht auszuschliessen, dass die beobachteten Verschiebungen bei den Flechten mit Klimaänderungen in Zusammenhang gebracht werden könnten.

Arbeiten von Frahm et al. 2009 zum Nitrophytenproblem bei epiphytischen Flechten lassen den Schluss nahe, dass der beobachtete Anstieg von nitrophytischen Flechten auch vom Klimawandel mitbeeinflusst sein könnte. Es gibt Hinweise, dass nitrophile Flechten unter trockeneren Bedingungen und wärmeren Temperaturen einen Wettbewerbsvorteil gegenüber feuchtigkeitsliebenden Flechten geniessen. Es sind jedoch nicht allein Standortfaktoren, welche über die Artenzusammensetzungen entscheiden. Frahm et al. 2009 zeigen, dass Ammoniak als wichtige Stickstoffquelle in Form von Ammoniumnitrat bei trockenen Verhältnissen als Deposition auf die Flechten einwirkt.

Trockene, warme und sonnige Sommer, wie im 2003 bedeuten auch, dass die Ozonbelastungen äusserst hoch werden. Zu Spitzenbelastungen kam es ebenfalls im Sommer 2006.

Das Jahr 2003 gilt als ausgesprochenes Trockenjahr. Wie sich die zunehmenden lang andauernden und niederschlagsarmen Zeiten verbunden mit Spitzenbelastungen an Schadstoffen auf Flechten in einem Gebiet auswirken, ist kaum erforscht.

11.4 Lufthygiene

11.4.1 Lufthygiene in Liechtenstein

Das Liechtensteiner Luftreinhaltegesetz trat 1986, die Luftreinhalteverordnung 1987 in Kraft. Damit waren die nötigen gesetzlichen Rahmenbedingungen geschaffen, um Immissionsgrenzwerte festzulegen und Massnahmen einzuleiten.

Mit der Verschärfung der Abgasvorschriften wurden schwefelreiche Brennstoffe wie Kohle und Heizöl schwer zunehmend durch Heizöl extraleicht und Erdgas substituiert. Der Schwefelgehalt im Heizöl extraleicht konnte von 0.5% auf 0.05% und damit um das Zehnfache reduziert werden. Die Verschärfung verschiedener Emissionsgrenzwerte 1992 und die damit verbundenen Feuerungskontrollen führten zu lufthygienischen Sanierungen von Feuerungsanlagen, Tankstellen und grossen Einzelemittenten. Die Sanierung von Einzelemittenten auch in angrenzenden Gebieten, so der Kehrrichtverbrennungsanlage in Buchs hatte ebenfalls einen positiven Einfluss auf die Liechtensteiner Situation.

Seit der Verschärfung der Abgasvorschriften stieg der Anteil der mit Katalysatortechnik ausgerüsteten Fahrzeuge kontinuierlich an und betrug im Jahr 2000 rund 95%. Die damit verbundene Einführung von bleifreiem Benzin und die technische Entwicklung in der Katalysatortechnik sowie bei den Motoren ermöglichten eine weitere Reduktion der Schadstoffemissionen. Die Optimierung von Verkehrsanlagen durch bauliche und betriebliche Massnahmen (Kreisel, Innenstadtsperrung Vaduz) sowie die Temporeduktion auf Autobahnen verminderten die Schadstoffe in der Luft erheblich. Diese Erfolge schlugen sich in der Flechtenerhebung von 1999 bereits als Verbesserungen in der Talsohle von Liechtenstein nieder.

Es folgten weitere Grenzwertverschärfungen z.B. für Feinstaub und NO_x durch erneute Anpassungen der Luftreinhalteverordnung. Die Partikelfilterpflicht bei neuen Baumaschinen wurde 2006 eingeführt. Vorschriften zu Blei-, Schwefel- und Benzolgehalten sowie erhöhte Qualitätsanforderungen für Brenn- und Treibstoffen führten abermals zu Verminderungen des Schadstoffausstosses. Durch Verschärfung der Anforderungen an Feuerungsanlagen, wie Holzheizungen wird unter anderem der Ausstoss an Feinstaub weiter eingedämmt. Ebenfalls in den letzten Jahren haben Fördermassnahmen zum öffentlichen und Langsamverkehr eingesetzt und es sind neben Vorschriften zur Wärmedämmung auch vermehrt fiskalische Anreize geschaffen worden, um Treibhausgase zu reduzieren. In der letzten Dekade hat sich der Fokus vermehrt auf klimapolitisch relevante Inhalte, wie die Steigerung von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien, gerichtet.

Die Bemühungen für eine saubere Luft in Liechtenstein zeigten auch bei den technischen Messungen Wirkung: So fiel beispielsweise der Jahresmittelwert der NO_2 -Immissionen zu Beginn der 90er Jahre unter den Grenzwert und ist es seither selbst im stark belasteten Jahr 2006 geblieben. Die Messungen belegen weiter, dass die Schadstoffimmissionen in Liechtenstein auch im vergangenen Jahrzehnt immer noch leicht rückläufig sind.

11.4.2 Immissionsdaten

Anhand von Immissionsdaten wird versucht, die Verschlechterung der Flechtensituation in Liechtenstein zu erklären. Ebenfalls erfolgt ein Vergleich mit der Schweiz (siehe Kapitel 11.4.3 und 11.4.4).

Abbildung 41 zeigt den Verlauf der Feinstaubimmissionen seit 2000 als höchste Tagesmittelwerte und Anzahl Grenzwertüberschreitungen. Auffallend sind die Spitzenwerte im 2006. Sie übersteigen deutlich diejenigen der anderen Jahre. Zudem wurden 2006 auch mehr Grenzwert-Überschreitungen gemessen. Der Feinstaubjahresmittelwert ist 2006 leicht angestiegen, in den nachfolgenden Jahren wieder gesunken.

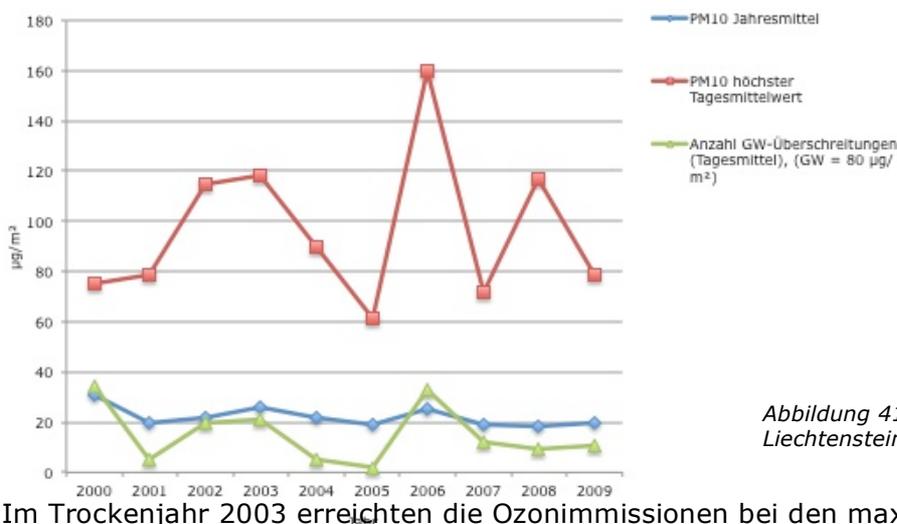


Abbildung 41: Feinstaubimmissionen in Liechtenstein von 2000 - 2009

Im Trockenjahr 2003 erreichten die Ozonimmissionen bei den max. Stundenmittelwerten Höchstwerte. Die Anzahl Grenzwert-Überschreitungen war zudem deutlich höher als in den andern Jahren. Die unvollständigen Messreihen von 1995 und 1996 sind auf einen Umbau der Messstation und den Ausfall der Datenerfassung durch einen Blitzschlag zurückzuführen.

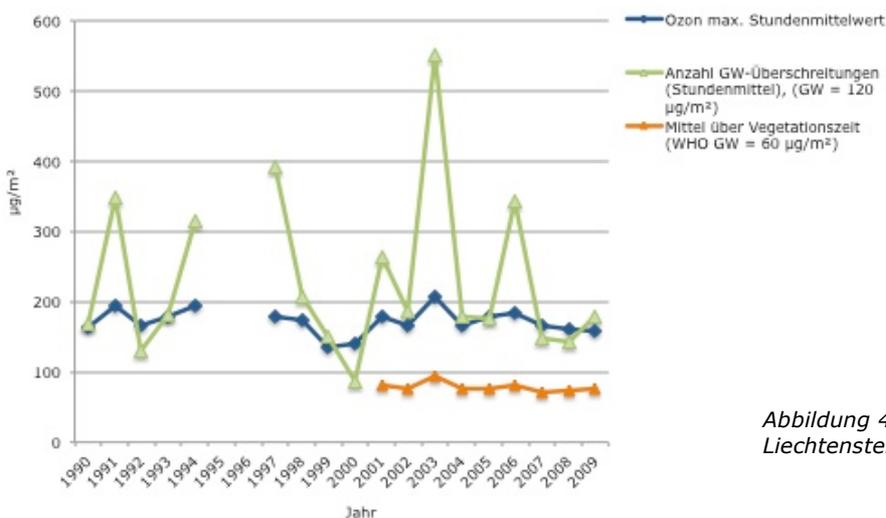


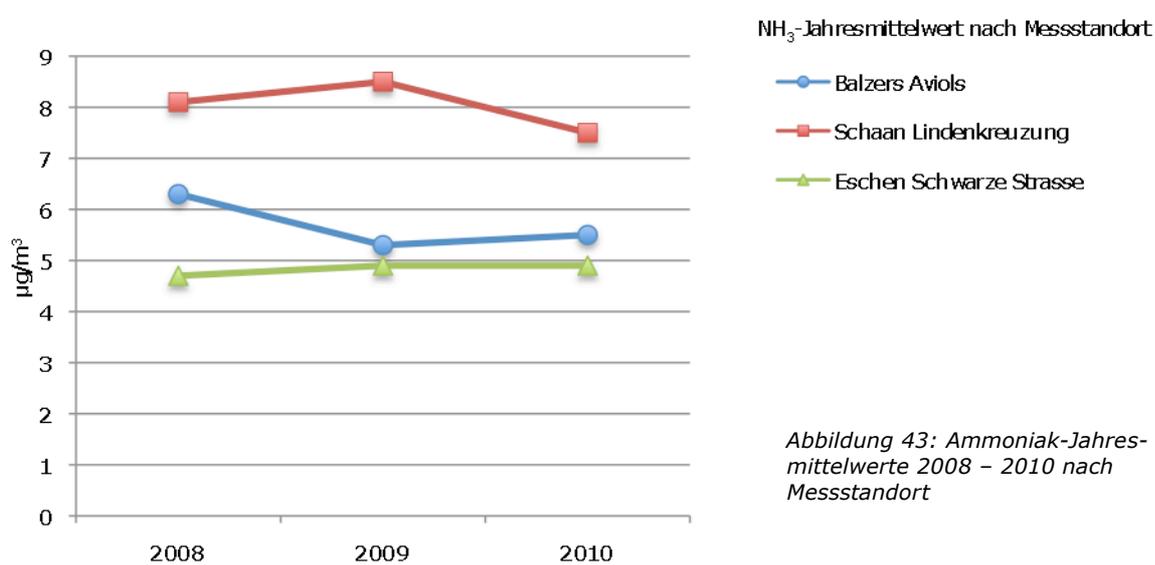
Abbildung 42: Ozonimmissionen in Liechtenstein von 1990 - 2009

Abbildung 43 zeigt die Ammoniakjahresmittelwerte dreier Messstandorte. Die Jahresmittelwerte der drei Standorte mit der Spannweite 4.5 – 8.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ wurden nach AUS 2008 als mittel bis hoch eingestuft. Sie überschreiten den anlässlich des UNECE Workshops on

Atmospheric Ammonia von Dezember 2006 festgelegten critical Level¹⁴ für Flechten von $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die hohen Werte von Schaan Lindenkreuzung bestätigen den Verkehr als wichtigen Verursacher von Ammoniakimmissionen.

Tabelle 16: Messstandorte und ihre Lage (AUS 2008).

Standort	Lage des Standortes
Balzers Aviols	Agglomerationsrand, umgeben von landwirtschaftlichen Betrieben
Schaan Lindenkreuzung	Kreuzung innerorts, stark verkehrsexponiert
Eschen Schwarze Strasse	Ausserorts, landwirtschaftliche Nutzung



Ammoniak ist ein stark stechend riechendes, wasserlösliches und giftiges Gas, das zu Tränen reizt und erstickend wirkt. Ammoniak bildet mehrere Reihen von Salzen: darunter die kationischen Ammoniumsalze und die anionischen Amide, Imide und Nitride. Ammoniak reagiert in Gegenwart von Wasser und auch Ozon zu Ammoniumnitrat. Ammoniak wirkt unter wässrigen Bedingungen als Base. Ammoniumnitrat ist ein Feinpartikel und gilt als Feinstaubdeposition. Laut Frahm et al. 2009 verbinden sich die Stickoxide (vgl. Abb. 44) mit Ammoniak zu Ammoniumnitrat. Dies bei Trockenheit. Frahm et al. 2009 vermuten, dass sich Ammoniumnitrat als Trockendeposition auf die Flechten ablagert. Bei Regen und steigender Luftfeuchte wird das Salz gelöst und dringt als konzentrierte Salzlösung in die Flechten ein.

Abbildung 44 zeigt die Entwicklung der Stickstoffdioxidimmissionen seit 1990. Die Jahresmittelwerte zeigen leicht sinkende Tendenz. 2006 fand ein Extremjahr statt. Stick-

¹⁴ Die „Critical Levels“ sind Schwellenwerte. Bei der Überschreitung dieser Schwellenwerte muss mit negativen Einflüssen auf das Ökosystem gerechnet werden (AUS 2008)

stoffdioxidimmissionen haben die höchste jemals gemessene Anzahl Grenzwertüberschreitungen beim Tagesmittel erreicht (Abbildung 44, roter Balken). Der höchste gemessene Tagesmittelwert ist vergleichbar mit der Zeit von 1990. Die unvollständigen Messreihen von 1995 und 1996 sind auf den Umbau der Messstation und den Ausfall der Datenerfassung durch einen Blitzschlag zurückzuführen.

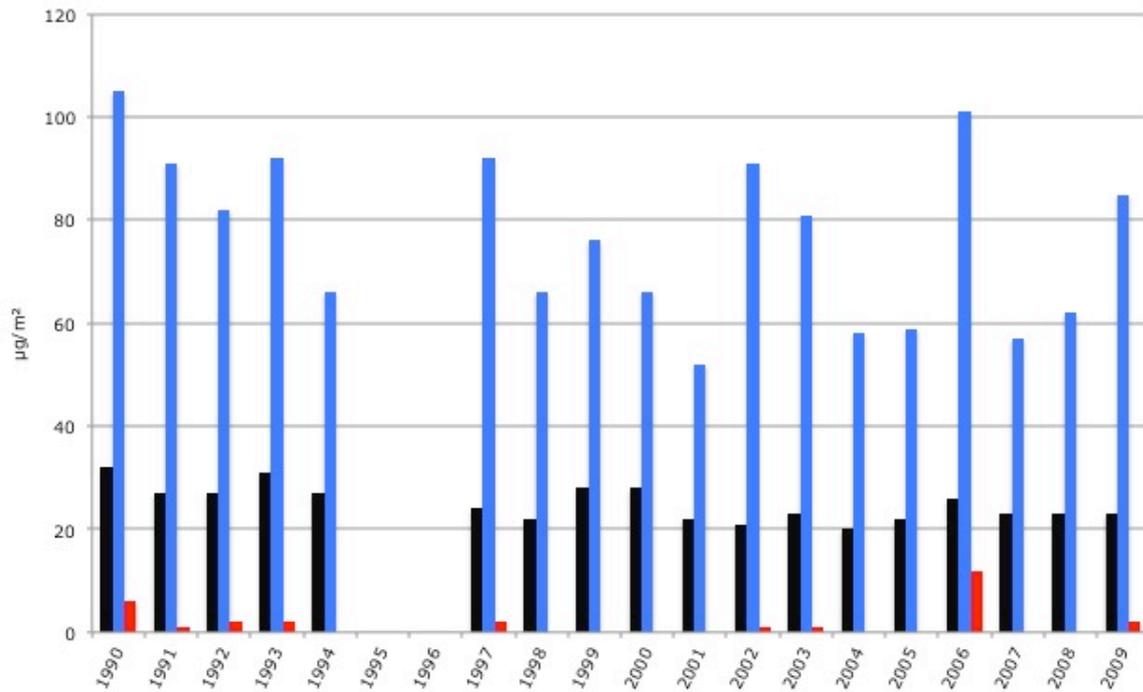


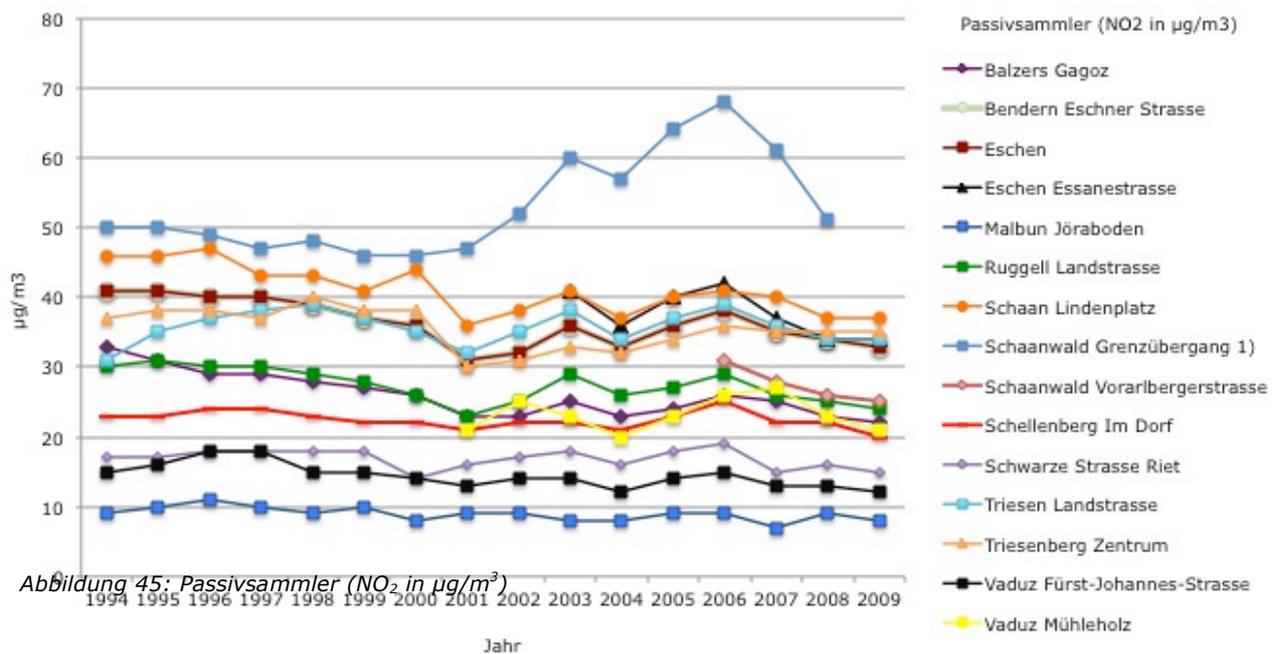
Abbildung 44: Stickstoffdioxidimmissionen 1990 – 2009^{ahr}

■ NO2 Jahresmittelwert ■ NO2 höchster Tagesmittelwert ■ Anzahl GW-Überschreitungen (Tagesmittel), (GW = 80 µg/m³)

Januar und Februar 2006 waren gekennzeichnet durch eine hartnäckige und langandauernde Inversionslage, welche eine grosse Anreicherung von Schadstoffen wie Stickoxide und Feinstaub mit sich brachte.

Die hohen Werte der Stickstoffdioxid- und Feinstaubimmissionen von 2006 könnten bei den Flechten zu extremen Stresssituationen geführt haben. Eine Anhäufung von Spitzenbelastungen könnte auch dazu führen, dass die Zeit zwischen den Extrembelastungen abnimmt und so den Flechten zu wenig Regenerationszeit bleibt.

Bei den Passivsammlermessungen zeigt sich seit 1994 eine stagnierende bis abnehmende Tendenz. 2003 und 2006 sind höhere Werte als in den Vor- bzw. Folgejahren gemessen worden. Die Messstation in Schaanwald Grenzübergang 1 (Abbildung 45) befindet sich unter dem Dach der Zollabfertigung. Sie wird deshalb nicht berücksichtigt.



Die steigenden Temperaturen und die vermehrte Trockenheit zusammen mit den Spitzen der Feinstaub- und Ozonbelastungen sowie der Ammoniakdepositionen der vergangenen Jahre in Liechtenstein könnten einen mehr als kritischen Level für Flechten erreicht haben (siehe Luftgüte- und Differenzkarte 2009). Neben der Verschiebung des Acidindex in Richtung basischer Belastung deuten auch die Verschiebungen der Scores vom Nitroindex darauf hin. Im Rahmen der Weiterentwicklung des Nitroindex sind vertiefte Untersuchungen im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Umwelt zum kritischen Level geplant.

Flechten gelten aufgrund ihres labilen Gleichgewichts in der Symbiose von Algen und Pilzen als Früherkennungssysteme für Luftbelastungen. Gilt dies auch im Zusammenspiel von Klimawandel und Immissionen, dann muss in absehbarer Zeit auch in anderen Ökosystemen mit Einbrüchen der Diversität, messbar mit der Entropie, zu rechnen sein.

11.4.3 Lufthygiene in der Schweiz

Die PM10-Belastung ist in den letzten 15 Jahren erheblich zurückgegangen. 2003 und 2006 wurden jedoch auch in der Schweiz höhere Werte gemessen.

In den städtischen und vorstädtischen Gebieten und entlang der Autobahnen überschreiten die Feinstaub-Jahresmittelwerte den Grenzwert von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Abbildung 46)¹⁵.

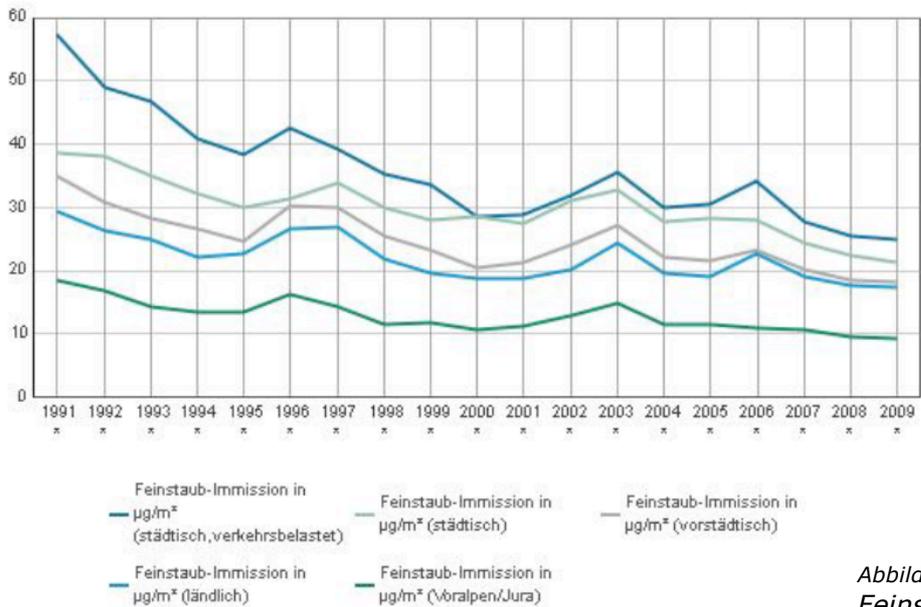


Abbildung 46: Verlauf der Feinstaubimmissionen seit 1991

(*) Grenzwert Schweiz: Jahresmittel $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Abbildung 47 zeigt die Ozonbelastung von 1991 – 2009 in der Schweiz. Die Höchstwerte der Ozonbelastung sind generell rückläufig. Wie beim Feinstaub zeigen sich beim Ozon in 2003 und 2006 Spitzenbelastungen.

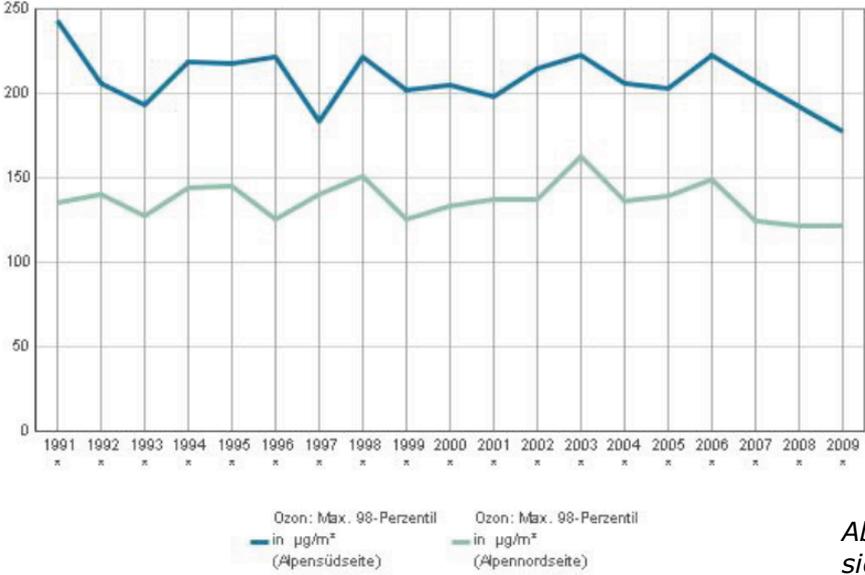


Abbildung 47: Ozonimmissionen von 1991 – 2009

(*) Immissionsgrenzwert: $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$

¹⁵ Quelle der Klimadaten und Kommentare aus der Schweiz: Bundesamt für Umwelt, <http://www.bafu.admin.ch/umwelt/indikatoren/index.html?lang=de>

Die Belastung durch Ammoniak (Abbildung 48) bleibt in der Schweiz auf einem hohen Niveau. Die Ammoniakimmissionen erreichen in Schweizer Regionen mit intensiver Tierhaltung die extremsten Werte. Das trockene Extremereignis von 2003 zeigt sich als Spitzenwert auch beim Ammoniak.

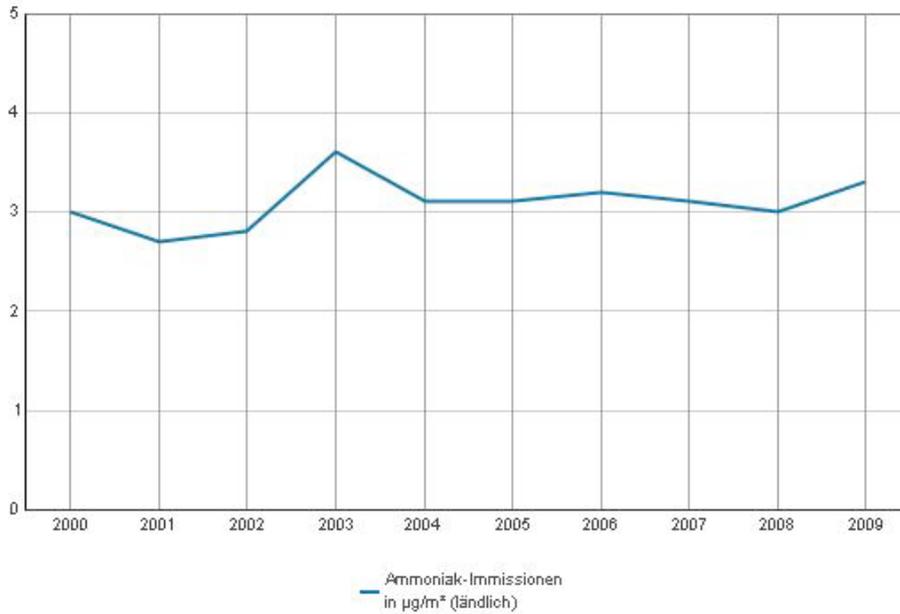
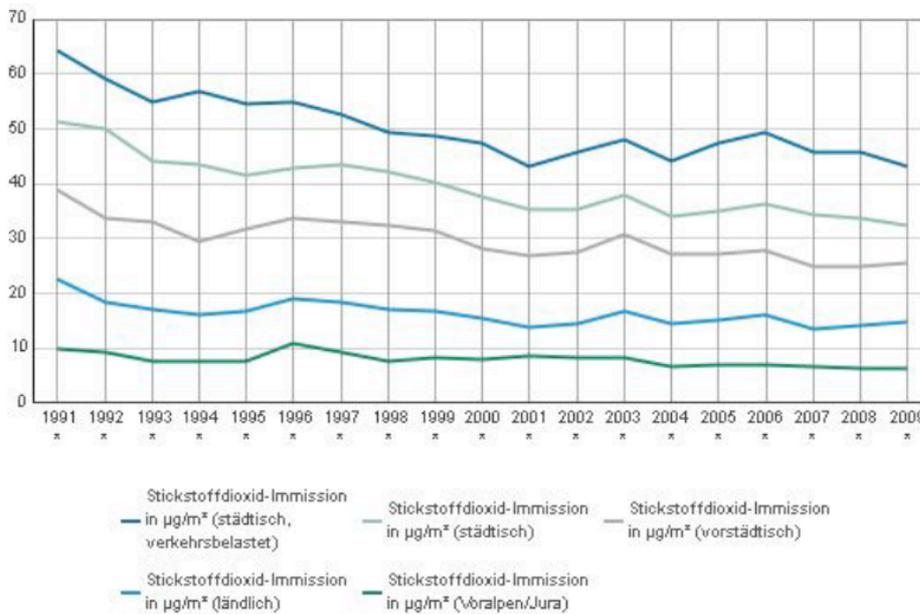


Abbildung 48: Verlauf der Ammoniakimmissionen von 2000 – 2009



(*) Grenzwert Schweiz: Jahresmittel 30 Mikrogramm pro Kubikmeter

Abbildung 49: Stickstoffdioxidimmissionen von 1991- 2009

Seit Mitte der 80er Jahre ist in der Schweiz ein NO₂-Rückgang um 30-50% zu verzeichnen (Abbildung 49). Während in städtischen Gebieten die NO₂-Immissionen immer noch stark erhöht sind, bewegen sie sich auf dem Land meist auf tiefem Niveau. Vorstädtische Gebiete liegen dazwischen. Auch die Stickoxidbelastung in der Schweiz zeigt Spitzen im 2003 und 2006.

11.4.4 Vergleich Liechtenstein – Schweiz

Liechtenstein und die Schweiz sind bezüglich Lufthygiene vergleichbar. Die Immissionen sind mit Ausnahme von Ammoniak rückläufig. Die Verläufe der Immissionen spiegeln in beiden Ländern die Extremjahre 2003 und 2006 wider.

Es ist zu erwarten, dass sich der Zustand der Flechten in den Schweizer Gebieten, welche benachbart von Liechtenstein sind, ebenfalls erheblich verschlechtert hat.

Die Ersterhebung im Bündner Rheintal fand 1986 statt. Die Zweiterhebung fand in den 90er Jahren statt, jedoch nur partiell und ergab ein mit der in Liechtenstein durchgeführten Zweiterhebung, vergleichbares Bild. Die Dritterhebung findet jetzt statt. Wir empfehlen aus Gründen der Vergleichbarkeit sämtliche hier vorgenommenen Auswertungen im Rahmen der Dritterhebung des Bündner Rheintales ebenfalls auszuführen. Ähnliche Entwicklungen sind zu erwarten.

In Appenzell Ausserrhoden fanden die ersten beiden Flechtenerhebungen 1991 und 2000 statt. Im 2010 fand eine Drittkartierung über grosse Gebiete des Kantons statt. Die Auswertungen sind momentan in Gang. Es zeichnet sich ebenfalls ein Rückgang der Flechten ab. Die Vergleichbarkeit der Appenzeller mit der Liechtensteiner Untersuchung ist jedoch durch die Methodenwahl leicht eingeschränkt:

- Die für Liechtenstein gewählte Bündner Rheintaler Flechtenmethode zählt sämtliche Blatt- und ansprechbaren Krustenflechten und nicht nur eine begrenzte Anzahl. Dies ermöglicht so ein umfassenderes Bild als die Mittellandmethode bezüglich Flechtenarten. Dies gilt vor allem für die Berechnung des Acidoindex.
- Die Luftgütekarten lassen sich vergleichen, da die Luftgütewerte mit einer wissenschaftlich abgestützten Formel ineinander überführbar sind (Peter und Urech 1991).

Wiederholungserhebungen in der Schweiz zeigen ein differenziertes Bild der Flechtenentwicklung. Auf Bäumen in Seenähe kann beispielsweise noch immer ein reicher Flechtenbewuchs beobachtet werden (Gebiete am Zürich- und Neuenburgersee).

Die Degradation der Flechten scheint regionalen Regeln zu folgen. Vermutet wird als Ursache, neben der Gesamtbelastung der Luft, dass die regionalen Auswirkungen des Klimawandels ebenfalls eine Rolle spielen könnten. Aus diesem Grunde werden die bereits im Zusammenhang mit dem Nitroindex erwähnten, seit 2005 laufenden Untersuchungen im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), im 2011 ausgeweitet. Untersucht werden soll zusätzlich, welche Beiträge klimatische Faktoren, wie z.B. Trockenheit und Niederschlag, zur Erklärung der Flechtenentwicklung leisten. Erste Ergebnisse werden im Herbst 2011 erwartet.

11.5 Empfehlungen

Flechten sind Lebewesen und stehen als Bioindikatoren stellvertretend für Ökosysteme und andere Lebewesen. Auf Flechten wirken alle Schadstoffe ein. Daher wird empfohlen, die Luftreinhaltepolitik mit emissionsreduzierenden Massnahmen wie bisher konsequent fortzuschreiben und zusätzlich Prioritäten bei klimapolitischen Zielsetzungen zu legen. Aus den Ergebnissen der vorliegenden Drittuntersuchung lassen sich dabei folgende Schwerpunkte festhalten:

11.5.1 Extremereignisse

Vermutlich werden Extremereignisse in Zukunft weiter zunehmen und damit auch die zeitlichen Spitzenbelastungen durch Schadstoffgemische. Diese hoch belasteten Situationen bewirken wahrscheinlich irreversible Schäden bei den Flechten. Es gilt diese Spitzenbelastungen zu verhindern.

Aus diesem Grund empfehlen wir das Immissionsniveau der Schadstoffe weiter zu senken, soweit, bis die Emissionen bei meteorologischen Ausnahmesituationen zu keinen Spitzenbelastungen mehr führen können.

Laut Gradientenkarte 2009 (Abb. 19) gehören die Autobahnzufahrten bei Buchs und Sevelen sowie die Hauptverkehrsachse nach wie zu den grössten Belastungsquellen in Liechtenstein. NO_x hat eine Schlüsselfunktion als Vorläufersubstanz von Ozon und Feinstaubpartikel. Das Ergreifen von emissionsvermindernden Verkehrsmassnahmen steht daher weiter im Vordergrund.

11.5.2 Ammoniak

Neben Ozon ist auch Ammoniak ein giftiges Gas mit starker Wirkung. Zusammen mit NO_x verbindet Ammoniak sich zum aggressiven Feinstaubpartikel Ammoniumnitrat.

NO_x ist ebenfalls eine Vorläufersubstanz von Ozon und führt auch über diese Reaktion mit Ammoniak zu Ammoniumnitrat. Ammoniak ist reaktiv. Das heisst, dass es sich mit anderen Substanzen zu neuen Schadstoffen verbindet. Die Reduktion von Ammoniakemissionen ist daher ebenfalls dringend.

Neben Quellen aus dem Verkehr (vgl. erhöhte Ammoniakwerte bei der Lindenkreuzung in Schaan), stammen 90% der Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft. Die Reduktion der Ammoniakverluste ist für die landwirtschaftliche Praxis eine wichtige Vorgabe. Der Antrag der Internationalen Bodenseekonferenz von 2008 betreffend bodennahen Gülleausbringen ist verstärkt umzusetzen. In der Schweiz werden seit einigen Jahren im Rahmen der Ressourcenprogramme nach Landwirtschaftsgesetz Artikel 77a Ammoniakprogramme durchgeführt. Der Kanton Solothurn beispielsweise, setzt die Flechtenmethode zur Erfolgskontrolle der ammoniakreduzierenden Massnahmen in vier Gebieten pilotmässig ein.

11.5.3 Klima

In der Botanik kennt man die Gesetzmässigkeit der zonalen Vegetation. Damit bezeichnet man die für ein Grossklima typischen Pflanzengesellschaften. Die Flechtenzusammensetzung als „Acidoindex im Gleichgewicht“ beschrieben, entspricht der zonalen Vegetation. Die einseitige Verschiebung des Acidoindex in Richtung basische Verhältnisse könnten Ausdruck der klimatischen Veränderungen in Liechtenstein auf die Flechten sein. Basiphilere Flechten sind toxischer und ertragen Trockenheit besser. Die Flechten stehen also unter „zonalem“ Anpassungsstress. Die sensible Symbiose ist aus dem Gleichgewicht. Es ist möglich, dass unter diesen Bedingungen kleinere Schadstoffkonzentrationen in der Luft weniger toleriert werden als unter klimatisch normalen Bedingungen.

Aus diesem Grund sind klimarelevante Massnahmen in erster Priorität zu ergreifen.

11.5.4 Wissenslücken

Die hier vorliegende Flechtenuntersuchung ist die erste mit Ergebnissen, die durch die bisher bekannten Wirkungsbeziehungen Flechten und Immissionen nur unbefriedigend erklärt werden können. Wahrscheinlich spielen zur Erklärung neuere Faktoren eine Rolle. Je mehr Ergebnisse auch von den Kartierungen der benachbarten Gebiete vorliegen, desto grösser sind die Hinweise, wie auf die erschreckende Entwicklung zu reagieren ist. Die Untersuchungen im Auftrag des BAFU seit 2005 zum Nitroindex sind dazu ein erster Schritt.

12 Literaturverzeichnis

AUS, 2008: Amt für Umweltschutz; Vaduz. Ammoniak-Immissionsmessungen in FL. Messbericht 2008.

AUS, 2009: Amt für Umweltschutz; Vaduz. Ammoniak-Immissionsmessungen in Liechtenstein. Messbericht 2009.

Beierkuhnlein C., 2003: Der Begriff Biodiversität. IN: Nova Acta Leopoldina NF 87, Nr. 328, S. 51-71.

Frahm J.P., 2006: Der Einfluss von Ammoniak auf Stickstoff liebende Flechten in verkehrsbelasteten Gebieten. Immissionsschutz 4/2006, S. 164-167.

Frahm J.P., 2007: Die Rolle von Ammoniak bei der eutrophierenden Wirkung von Luftschadstoffen auf Flechten. VDI-KRdL Schriftenreihe 37, S. 79-86.

Frahm et al., 2009: Das Nitrophytenproblem bei epiphytischen Flechten – eine Synthese. Archive for Lichenology, Vol 05, S. 1-8.

Internationale Bodenseekonferenz, Arbeitsgruppe Landwirtschaft/Umweltschutz der Kommission Umwelt 2008: Emissionsmindernde Gülleausbringung IBK Positionspapier. Antrag an die Regierungen. Lindau (Bodensee).

Jenssen M., 2004: Ökologischer Waldumbau – ein Beitrag zur Umsetzung der Biodiversitätskonvention. In: Korn H., Feit U. (Bearb.): Treffpunkt Biologische Vielfalt IV. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad: Godesberg, S. 91-96.

Jenssen M., 2006: Entropie und Biodiversität: Ökologische Potentiale der Artenvielfalt. In: Pöschel T., Malchow H., Schimansky-Geier L. (Hrsg.): Irreversible Prozesse und Selbstorganisation. Berlin: Logos-Verlag, S. 265-279.

Peter K., Ammann K., 1990: Flechten- Bioindikation zur flächendeckenden Charakterisierung der Luftgesamtbelastung. Zürich: Verlag der Fachvereine an den schweizerischen Hochschulen.

Peter K. und Urech M, 1991: Grenzen und Möglichkeiten der überregionalen Vergleichbarkeit von Luftgütekarten, VDI Berichte Nr. 901, 1991

puls, 1991: Luftqualitätsuntersuchungen mit Flechten im Fürstentum Liechtenstein. Schlussbericht.

puls, 2003: Flechten und Luftqualität im westlichen Limmattal: Erfolgskontrolle 2003. Baudepartement Kanton Aargau, Abteilung für Umwelt.

puls et al., 2003: Flechten und Luftqualität im Kanton Zug: Wirkungskontrolle 2003. Amt für Umweltschutz, Kanton Zug.

puls et al., 2004: Flechten als Bioindikatoren: Luftqualitätsuntersuchungen im Kantonsteil Ausserschwyz Ost. Amt für Umweltschutz, Kanton Schwyz.

Puls et al., 2009: Projektunterlagen. Flechtenvegetation und Stickstoffbelastung: Räumliche Erweiterung und vertiefte statistische Auswertungen mit Methoden der Epidemiologie, S. 1-39.

puls und K. Peter >Evaluationen, 2006: Räumlicher und zeitlicher Zusammenhang zwischen Flechtenvegetation und Stickstoffbelastung. Projektbericht, BAFU, Abt. Luftreinhaltung und NIS, Bern.

puls und K. Peter >Evaluationen, 2008: Flechtenvegetation und Stickstoffbelastung: Spezifität und zeitliche Entwicklung, Projektbericht zuhanden des BAFU, Abteilung Luftreinhaltung und NIS, Sektion Luftqualität, Bern

Rihm B., Peter K., Urech M., 2009: Mapping Ammonia Emissions and Concentrations for Switzerland – Effects on Lichen Vegetation. In: Sutton M., Reis S., Baker S. (Eds.): Atmospheric Ammonia – Detecting emission changes and environmental impacts. Results of an Expert Workshop under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Springer, ISBN: 978-1-4020-9120-9. p. 87-92.

VDI, 2004: VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13: Luftverunreinigungen auf Flechten (Bioindikation) - Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für die Luftgüte. Beuth Verlag, Berlin, 27 S.

Wirth V., 1980: Flechtenflora. Stuttgart: Ulmer Verlag.

13 Anhang

13.1 Legende zu den Originaldaten

Obj-Nr.:	Objektnummer, Nummer des Trägerbaumes
Obj-Nr. alt	Objektnummer der Untersuchung von 1999
Geo	Nummer des Georaums
Höhe:	Meereshöhe des Trägerbaumes
K1:	horizontale Koordinate
K2:	vertikale Koordinate
StUmf	Stammumfang des Trägerbaumes
HE	Hauptexposition
BArt:	Baumart des Trägerbaumes
	1: einheimische Linde
	2: Walnuss
	3: ausländische Linde
	4: Bergahorn
	5: Spitzahorn
	6: Ulme
	7: ausländischer Ahorn
	8: Esche
	9: Eiche
Siedl:	Siedlungsraum
	1: Weiler / Einzelhof, 2: Dorf
	3: Stadt / lockere Bebauung m. Gärten
	4: Stadt / Block- Kernbebauung
	5: Industriekomplex, 6: Grünfläche
Verk:	Verkehrsfläche
	1: Naturstrasse, einspuriges Strässchen
	2: Mittleres Verkehrsvolumen; Parkplatz
	3: Haupt- und Schnellstrasse, Autobahn
Landw:	Landwirtschaft
	1: Intensivnutzung
	2: Extensivnutzung
Trägerb:	Trägerbaumauswahl
Schädg:	Schadigungsgrad der Flechtenvegetation, es bedeuten:
	0: keine oder bis 1% aller Flechten sind geschädigt
	1: 1% bis 10% aller Flechten sind geschädigt
	2: mehr als 10% aller Flechten sind geschädigt
BInfo:	Bauminformation
	0: Gleiche Aufnahmefläche
	1: Gleicher Baum, Aufnahmefläche verschoben
	2: Ersatzbaum
IAPBR:	IAPBR-Wert des Trägerbaumes

Code:	Flechtenart:
1	<i>Bryoria fuscescens</i>
10	<i>Cladonia</i> sp.
2	<i>Evernia prunastri</i>
3	<i>Pseudovernia furfuracea</i>
4	<i>Ramalina farinacea</i>
7	<i>Usnea</i> sp.
8	<i>Anaptychia ciliaris</i>
51	<i>Collema</i> sp.
12	<i>Hypogymnia physodes</i>
50	<i>Leptogium</i> sp.
14	<i>Parmelia acetabulum</i>
15	<i>Parmelia caperata</i>
17	<i>Parmelia exasperata</i>
18	<i>Parmelia exasperatula</i>
19	<i>Parmelia flaventior</i>
20	<i>Parmelia glabra</i>
21	<i>Parmelia glabratula</i> -Gr.
23	<i>Parmelia subargentifera</i>
24	<i>Parmelia subrudecta</i>
25	<i>Parmelia sulcata</i>
26	<i>Parmelia tiliacea</i>
28	<i>Physcia aipolia</i> -Gr.
29	<i>Physcia adscendens</i> -Gr.
Phci	<i>Phaeophyscia ciliata</i>
30	<i>Phaeophyscia orbicularis</i> -Gr.
Phvi	<i>Physcia vitii</i>
Phys	<i>Hyperphyscia adglutinata</i>
32	<i>Physconia grisea</i>
33	<i>Physconia distorta</i>
34	<i>Xanthoria fallax</i> -Gr.
35	<i>Xanthoria parietina</i>
Arth	<i>Arthonia radiata</i>
Baci	<i>Bacidia rubella</i>
Cace	<i>Caloplaca cerina</i>
Caho	<i>Caloplaca holocarpa</i> -Gr.
Caco	<i>Candelaria concolor</i>
Caau	<i>Candelariella aurella</i> -Gr.
Cand	<i>Candelariella xanth.</i> -Gr.
38	<i>Lecanora carpinea</i>
Leha	<i>Lecanora hageni</i>
Leim	<i>Lecanora impudens</i>
Lsub	<i>Lecanora argentata</i>
Leci	<i>Lecidella eleachroma</i> -Gr.
Lepr	<i>Lepraria incana</i>
37	<i>Opegrapha</i> sp.

40	<i>Pertusaria albescens</i>
42	<i>Phlyctis argena</i> -Gr.
45	<i>Normandina pulchella</i>
Aspi	<i>Aspicilia mutabilis</i>
36	<i>Xanthoria polycarpa</i>
41	<i>Pertusaria amara</i>
Cetroid	<i>Cetrelia cetrarioides</i> -Gr.
Peris	<i>Physconia perisidiosa</i>
Phye	<i>Physconia enteroxanta</i>
Parm	<i>Parmeliopsis hyperata</i>
Ram	<i>Ramalina pollinaria</i>
Parmr	<i>Parmelia revoluta</i>
Phyc	<i>Physcia caesia</i>
Parmsa	<i>Parmelia saxatilis</i>
Paqu	<i>Parmelia quercina</i>
13	<i>Hypogymnia tubulosa</i>
Hirs	<i>Physcia hirsuta</i>
Parm. Con- torta	<i>Parmelia contorta</i>

13.2 Tabelle Häufigkeit der Flechtenarten

In dieser Tabelle sind die Flechtenarten mit ihren relativen Häufigkeiten der Jahre 2009 – 1989 verzeichnet. Die Werte von 2009 legen die Reihenfolge fest. Es werden alle Flechtenarten dargestellt (auch jene mit einer relativen Häufigkeit unter 1%).

Flechtenart	abs. Häufigkeit 09	rel. Häufigkeit 09 [%]	Rang 09	Differenz 09-99 [%]	rel. Häufigkeit 99 [%]	Rang 99	rel. Häufigkeit 89 [%]	Rang 89	Differenz 99-89 [%]
Candelaria concolor	365	86	1	5	81	4	71	6	10
Candelariella xanthostigma -Gr.	343	81	2	-10	90	1	92	2	-2
Phaeophyscia orbicularis - Gr.	324	76	3	5	71	6	78	4	-7
Physcia adscendens - Gr.	318	75	4	-14	88	2	93	1	-5
Lecanora argentata - Gr.	307	72	5	-11	83	3	84	3	-1
Xanthoria fallax - Gr.	259	61	6	-3	64	7	56	9	8
Phlyctis argena - Gr.	237	56	7	-5	61	8	60	8	1
Xanthoria parietina	204	48	8	-12	60	9	60	7	0
Lecidella elaeochroma - Gr.	190	45	9	-28	72	5	75	5	-3
Hyperphyscia adglutinata	162	38	10	-5	43	10	24	20	19
Parmelia tiliacea	145	34	11	-4	39	11	44	11	-5
Parmelia subrudecta	127	30	12	0	30	16	28	19	2
Physconia distorta	123	29	13	-6	35	14	44	12	-9
Parmelia sulcata	121	28	14	-10	38	12	47	10	-9
Parmelia subargentifera	96	23	15	-13	35	13	29	18	6
Pertusaria albescens	95	22	16	-1	23	22	20	23	3
Lecanora carpinea - Gr.	83	19	17	-9	28	19	38	14	-10
Physcia aipolia -Gr.	77	18	18	-6	24	21	34	16	-10
Lepraria incana - Gr.	74	17	19	-11	28	18	20	22	8
Parmelia glabratula - Gr.	72	17	20	-14	30	15	42	13	-12
Lecanora hageni - Gr.	59	14	21	-16	30	17	32	17	-2
Parmelia glabra	56	13	22	6	7	31	12	28	-5
Opegrapha sp.	55	13	23	-2	15	25	6	33	9
Arthonia radiata	51	12	24	-14	26	20	34	15	-8
Lecanora impudens	51	12	25	-3	15	24	12	27	3
Physcia vitii	47	11	26	-8	19	23	17	24	2
Parmelia exasperatula	39	9	27	-2	11	26	22	21	-11
Normandina pulchella	38	9	28	-2	11	27	4	36	7
Parmelia flaventior	24	6	29	2	4	34	4	37	0
Physconia grisea	17	4	30	3	1	47			1
Caloplaca cerina	15	4	31	-6	9	28	14	25	-5
Cetrelia cetrarioides-Gr.	14	3	32	3					
Parmelia caperata	13	3	33	-3	6	32	6	34	0
Caloplaca holocarpa - Gr.	11	3	34	-6	9	29	8	31	1
Bacidia rubella - Gr.	9	2	35	-1	4	37			4
Collema sp.	8	2	36	-2	4	36	2	45	2
Evernia prunastri	7	2	37	-1	3	38	3	40	0
Leptogium sp.	7	2	38	0	1	45	2	42	-1
Parmelia saxatilis	7	2	39	0	1	46	3	39	-2
Ramalina farinacea	6	1	40	0	1	50			1

Phaeophyscia ciliata	4	1	41	-3	4	35	10	30	-6
Parmelia quercina	4	1	42	1			2	44	-2
Physconia perisidiosa	4	1	43	1	0				
Candelariella aurella - Gr.	3	1	44	-7	8	30	14	26	-6
Anaptychia ciliaris	3	1	45	-2	2	40	1		1
Pseudevernia furfuracea	3	1	46	-1	2	41	7	32	-5
Physcia hirsuta	3	1	47	-1	2	42			2
Aspicilia mutabilis	3	1	48	-1	1	44	1	47	0
Hypogymnia physodes	.	.	49	-4	4	33	11	29	-7
Usnea sp.	.	.	50	-1	2	43	4	38	-2
Physcia caesia	.	.	51	-1	1	48	4	35	-3
Ramalina pollinaria	.	.	52	0	0		3	41	-3
Parmeliopsis hyperoptata	.	.	53	0	0				
Pertusaria amara	.	.	54	0	0				
Parmelia acetabulum	.	.	55	-2	2	39			2
Hypogymnia tubulosa	.	.	56	0	0		2	43	-2
Parmelia revoluta	.	.	57	0	1		1	46	0
Parmelia exasperata	.	.	58	0	0		1	48	-1
Xanthoria polycarpa	.	.	59	-1	1	49	1	49	0
Parm. Contorta	.	.	60						
Cladonia sp.	.	.	61	0	0				
Physconia enteroxantha	.	.	62	0	0				

13.3 Durchschnittliche Frequenz, Artenvielfalt und Anzahl Bäume der Baumklassen

Um die IAPBR-Werte der Klassen zu erreichen, müssen bei mehr Trägerbäumen und gleich bleibender Artenvielfalt die Arten häufiger vorkommen. Dies zeigt sich in einer höheren durchschnittlichen Frequenz. Die nachfolgende Tabelle veranschaulicht dies anhand des genannten IAPBR-Bereichs der Baumklasse mit wenig Flechtenbewuchs.

Baumklasse mit wenig Flechtenbewuchs		
IAPBR-Bereich	26 - 53	
Jahr	1999	2009
Ø IAPBR-Wert der Klasse	43	42
Artenvielfalt	26	26
Anzahl Bäume	118	213
Ø Frequenz	1.7	1.8