

**Luftgütebestimmung mit epiphytischen Moosen und
Flechten in den Tropen am Beispiel der Stadt Mérida
(Venezuela)**



Diplomarbeit

zur

Erlangung des Grades einer Diplom-Biologin
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von
Sandra Reimer

Bonn 2008

Referent: Professor Dr. J.- P. Frahm

Korreferent: PD Dr. B. M. Mösel

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	iv
Tabellenverzeichnis.....	vi
1. Einleitung	1
1.1 Moose und Flechten als Bioindikatoren	1
1.1.1 Moose als Bioindikatoren	2
1.1.2 Flechten als Bioindikatoren	3
1.1.3 Vergleich mit technischen Messgeräten	3
1.2 Stand der Forschung	4
2. Untersuchungsgebiet	7
2.1 Geographische Lage	7
2.1.1 Anden.....	8
2.2 Klima.....	8
2.3 Vegetation.....	10
2.3.1 Moose in Venezuela.....	11
2.3.2 Flechten in Venezuela.....	12
2.4 Stadt Mérida	12
2.4.1 Kartierungsorte.....	14
3. Methoden	19
3.1. Bestimmung des Borken-pHs	19
3.2 GPS-Daten (Global Positioning System)	19
3.3 Untersuchungsgebiete	19
3.3.1 Dokumentation des Standortes.....	19
3.4 Auswahl der Trägerbäume	20
3.5 Erfassung der Moose und Flechten.....	21
3.6 Berechnung der Luftgütewerte	21

3.7 Ermittlung der Luftgüteklassen	23
3.8 Bewertung und Darstellung der Luftgüteklassen	23
3.9 Pflanzensoziologische Erfassung	24
3.10 Toxizoleranzwerte	24
3.11 Bestimmungsarbeit	25
3.12 Tabellenarbeit	25
3.13 Statistische Auswertung	25
4. Ergebnisse	26
4.1 Trägerbäume	26
4.1.1 Untersuchung der pH-Werte	27
4.1.2 Inklination	29
4.1.3 Stammumfang	30
4.1.4 Exposition	31
4.2 Epiphytische Flechtenarten des Untersuchungsgebietes	31
4.3 Epiphytische Moosarten des Untersuchungsgebietes	34
4.4 Artendiversität	37
4.4.1 Korrelation mit der Verkehrsbelastung	37
4.5 Ergebnisse der Kartierung nach VDI- Richtlinie 3799, Blatt 1 (1995)	40
4.5.1 Lufthygienische Situation, ermittelt aufgrund des Flechtenvorkommens	40
4.5.2 Lufthygienische Situation, ermittelt aufgrund des Moosvorkommens	44
4.5.3 Lufthygienische Situation, ermittelt aufgrund des Epiphytenvorkommens (Moose und Flechten zusammen)	47
4.6 Toxizoleranzwerte	49
4.7 Epiphytische Moos- und Flechtengesellschaften	51
5. Diskussion	53
5.1 Trägerbäume	53
5.2 Epiphytische Moose und Flechten im Untersuchungsgebiet	56
5.3 Kartierung nach der VDI-Richtlinie 3799 (Blatt 1, 1995)	57
5.4 Lufthygienische Belastung der Stadt Mérida	58
5.5 Toxizoleranzwerte	59
5.6 Methodenvergleich zur Beurteilung der Luftqualität	60
6. Zusammenfassung	62

7. Literaturverzeichnis	63
Danksagung	67
Versicherung	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Venezuela (aus: http://www.lib.utexas.edu/maps/venezuela.html)	7
Abbildung 2: Stadt Mérida mit Kartierungsorten.....	13
Abbildung 3: Aufnahmegitter zur Frequenzfassung von Moosen und Flechten.....	21
Abbildung 4: Prozentualer Anteil der Baumarten an den kartierten Trägerbäumen.....	26
Abbildung 5: Gesamtartenzahlen von Moosen und Flechten auf den 5 am häufigsten untersuchten Baumarten (in Klammern: Anzahl der kartierten Bäume).....	27
Abbildung 6: pH- Wert- Bereiche der 5 häufigsten Baumarten	28
Abbildung 7: Streudiagramm und Regressionsgrade der Moos- bzw. Flechtenartenanzahl in Abhängigkeit vom Borken pH	29
Abbildung 8: Expositionshäufigkeit des Moos- und Flechtenbewuchs auf den untersuchten Trägerbäumen.....	31
Abbildung 9: Prozentualer Anteil der häufigsten Flechtengattungen	33
Abbildung 10: Prozentualer Anteil der häufigsten Moosarten	35
Abbildung 11: Anzahl der Moos- und Flechtenarten pro Kartierungsort	37
Abbildung 12: Streudiagramm und Regressionsgrade der Moos- bzw. Flechtenartenanzahl in Abhängigkeit von dem Verkehrsaufkommen	40
Abbildung 13: Einordnung der (anhand des Flechtenvorkommens ermittelten) Luftgüteklassen für Mérida in die mitteleuropäische Bewertungsskala.....	41
Abbildung 14: Häufigkeit der Luftgüteklassen im Untersuchungsgebiet (ermittelt anhand des Flechtenvorkommens).....	42
Abbildung 15: Lufthygienische Belastung (ermittelt anhand des Flechtenvorkommens).....	43
Abbildung 16: Zusammenhang zwischen den Luftgütewerten und den Frequenzen der häufigsten Flechtenarten; ermittelt mit dem Spearmanschen Korrelationskoeffizienten r_s	44
Abbildung 17: Einordnung der (anhand des Moosvorkommens ermittelten) Luftgüteklassen für Mérida in die europäische Bewertungsskala.....	45
Abbildung 18: Häufigkeit der Luftgüteklassen im Untersuchungsgebiet (ermittelt anhand des Moosvorkommens).....	46
Abbildung 19: Lufthygienische Belastung (ermittelt anhand des Moosvorkommens).....	46
Abbildung 20: Zusammenhang zwischen den Luftgütewerten und den Frequenzen der häufigsten Moosarten; ermittelt mit dem Spearmanschen Korrelationskoeffizient r_s	47
Abbildung 21: Einordnung der (anhand des Moos- und Flechtenvorkommens ermittelten) Luftgüteklassen für Mérida in die mitteleuropäische Bewertungsskala.....	48
Abbildung 22: Häufigkeit der Luftgüteklassen im Untersuchungsgebiet (ermittelt anhand des Moos- und Flechtenvorkommens).....	48

Abbildung 23: Lufthygienische Belastung (ermittelt anhand des Moos- und Flechtenvorkommens).....	49
--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verkehrsbelastung.....	20
Tabelle 2: Kritische Werte der Studentverteilung	22
Tabelle 3: Einteilung der Luftgüteklassen	23
Tabelle 4: Toxitolanzwerte	24
Tabelle 5: Korrelationsanalyse nach Spearman zwischen dem pH-Wert und der Artenanzahl der Moose und Flechten.....	28
Tabelle 6: Korrelationsanalyse nach Spearman zwischen Stamminklination und Artenzahl der Moose und Flechten.....	30
Tabelle 7: Korrelationsanalyse nach Spearman zwischen Stammumfang und Artenzahl der Moose und Flechten.....	30
Tabelle 8: Prozentuale Häufigkeit und Frequenzsumme der häufigsten Flechtenarten.....	34
Tabelle 9: Prozentuale Häufigkeit und Frequenzsumme der häufigsten Moosarten.....	36
Tabelle 10: Korrelationsanalyse nach Spearman zwischen dem Verkehrsaufkommen und der Artenanzahl der Moose und Flechten	39
Tabelle 11: Epiphytengesellschaften in Mérida.....	52

1. Einleitung

Epiphytische Moose und Flechten eignen sich aufgrund ihrer physiologischen und anatomischen Eigenschaften besonders gut als Bioindikatoren der Luftgüte, da sie auf Verunreinigungen in der Luft sehr empfindlich reagieren. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts wurde diese Fähigkeit von epiphytischen Flechten erkannt (KIRSCHBAUM & WIRTH, 1997). Seitdem werden sie mit Erfolg zur Bestimmung der Luftqualität eingesetzt.

Die Bioindikationsforschung konzentrierte sich bislang jedoch hauptsächlich auf Länder in Europa und Kanada. So gibt es für Mitteleuropa mittlerweile etablierte Bioindikations-Verfahren, mit denen ganze Städte oder größere Gebiete nach einheitlichen Vorschriften untersucht werden können (Bsp.: VDI-Richtlinie 3799, Blatt 1, 1995).

Nur sehr wenige Publikationen beschäftigen sich bisher dagegen mit dem Einsatz von epiphytischen Moosen und Flechten als Bioindikatoren in tropischen Ländern.

Die vorliegende Arbeit soll die Eignung bzw. die Anwendbarkeit der für Mitteleuropa bestehenden VDI-Richtlinien in den Tropen überprüfen und eventuell Alternativen für die Luftgütebestimmung erarbeiten. Die Arbeit orientiert sich dabei zum größten Teil an der alten VDI-Richtlinie 3799 (Blatt 1) aus dem Jahr 1995.

Zusätzlich wurden die Moos- und Flechtengesellschaften auf den untersuchten Bäumen festgehalten. Und desweiteren wurde versucht den kartierten Moos- und Flechtenarten Toxitolanzwerte zu zuordnen.

Als Untersuchungsgebiet diente dazu die in den venezolanischen Anden gelegene Stadt Mérida.

1.1 Moose und Flechten als Bioindikatoren

Als Bioindikatoren werden Organismen oder auch Gemeinschaften von Organismen bezeichnet, „... die auf anthropogene Einflüsse mit Veränderungen ihrer Lebensfunktionen oder ihres Vorkommens reagieren oder vom Menschen in die Umwelt eingebrachte Stoffe anreichern.“ (FRAHM, 1998). Wie ein bestimmter Bioindikator auf Umweltveränderungen reagiert, kann sehr unterschiedlich sein. So können sich zum Beispiel innerhalb eines Organismus physiologische Prozesse verändern, es zum Absterben eines Organismus oder sogar zum lokalen Aussterben einer ganzen Art kommen, wenn die Umweltveränderungen sich dementsprechend drastisch verändern. Desweiteren kann aber auch eine

Neuansiedlung einer Art an einem bestimmten Standort nach Änderung der dortigen Umweltbedingungen erfolgen (FRAHM, 1998).

Moose wie auch Flechten eignen sich aus mehreren Gründen sehr gut als Bioindikatoren für die Luftgüte. Beide Organismengruppen werden als poikilohydrisch (wechselfeucht) bezeichnet. Dies bedeutet, dass sie, im Gegensatz zu den homoiohydren Gefäßpflanzen, nicht durch ein spezielles Abschlussgewebe, wie z.B. eine Kutikula, geschützt sind. Desweiteren besitzen Moose und Flechten keine Wurzeln, durch die eine gefilterte Wasseraufnahme möglich wäre. Somit nehmen sie Wasser und darin gelöste Nährstoffe direkt mit Regen, Nebel oder Tau über ihre gesamte Oberfläche ungefiltert aus der Atmosphäre auf (FRAHM, 2001; KIRSCHBAUM & WIRTH, 1997; WIRTH, 1995). Aus diesem Grunde sind sie Schadstoffen, die sich in der Atmosphäre befinden fast schutzlos ausgesetzt. Auch besitzen sie keine speziellen physiologischen Anpassungen, die es ihnen ermöglichen würden, diese aufgenommenen Schadstoffe wieder auszuscheiden (FRANZENREUTER, 2004).

Bei der Bioindikation mit Moosen und Flechten muss darauf geachtet werden, dass jede Art unterschiedlich auf Umweltveränderungen und mögliche Schadstoffe reagiert, das heißt es besteht eine jeweils artspezifisch abgestufte Empfindlichkeit. An einem Ort mit hoher Schadstoffbelastung werden zunächst die empfindlichen Arten verschwinden und zum Schluss mit steigender Konzentration der Schadstoffe nur noch sehr toxischtolerante Arten vorzufinden sein (KIRSCHBAUM & WIRTH, 1997). Jedoch wirkt sich die Luftgüte nicht nur auf einzelne Arten aus, sondern auch auf Pflanzengesellschaften und ihre Zusammensetzung (FRAHM, 1998). Somit kann anhand des Artenvorkommens oder auch der Artenzusammensetzung auf die lufthygienische Belastung eines Standortes rückgeschlossen werden, wenn die Empfindlichkeit der einzelnen Arten gegenüber Luftschadstoffen bekannt ist.

1.1.1 Moose als Bioindikatoren

Innerhalb des Lebenszyklus eines Mooses gibt es verschiedene Phasen, in denen ein Moos besonders stark auf Schadstoffeinflüsse reagiert. Besonders empfindlich ist das algenähnliche Protonema (Vorkeim). Dieses besitzt eine sehr einfache Struktur und reagiert somit sehr viel empfindlicher auf Schadstoffe als die eigentliche Moospflanze. Dieser Umstand erklärt, warum einige Moosarten in belastete Gebiete verpflanzt werden können und dort auch überleben, obwohl sie in diesen Arealen natürlicherweise nicht mehr vorkommen.

Auch der Befruchtungsvorgang bei Moosen kann durch atmosphärische Schadstoffe negativ beeinflusst werden. Die Spermatozoide gelangen über einen Wasserfilm zu den Archegonien. Ist dieses zur Befruchtung notwendige Wasser angesäuert, so kann dies zur Folge haben, dass der Anlockungsmechanismus durch die Archegonien nicht mehr funktioniert oder aber die Spermatozoide durch das saure Wasser absterben. In stark belasteten Gebieten rückt dann die vegetative Vermehrung in den Vordergrund, da die sexuelle Reproduktion nicht mehr möglich ist (FRAHM, 2001).

Moose als Bioindikatoren bieten neben der poikilohydrischen Lebensweise den Vorteil, dass sie im Vergleich zu anderen Pflanzen einen relativ kurzen Lebenszyklus besitzen und somit recht schnell auf eine sich verändernde Umwelt reagieren. Viele Arten durchlaufen einen Lebenszyklus in einem halben Jahr oder weniger (FRANZEN-REUTER, 2004).

Innerhalb der Moose eignen sich besonders die epiphytisch lebenden Moose als Bioindikatoren, da sie der Atmosphäre sehr viel direkter ausgesetzt sind. Sie gehören zu den sogenannten ektohydrischen Moosen, d.h., sie nehmen das Wasser im Vergleich zu den endohydrischen Arten ausschließlich über ihre Oberfläche auf (FRAHM, 2001).

1.1.2 Flechten als Bioindikatoren

Auch Flechten reagieren, ähnlich wie Moose, sehr empfindlich auf in der Atmosphäre vorhandene Schadstoffe oder auch auf sich verändernde Umweltbedingungen.

Sie bestehen jeweils aus einer Alge (Photobiont) und einem artspezifischen Pilz (Mycobiont), die zusammen eine Symbiose bilden. Dabei macht der Pilz den weitaus größeren Teil der Flechte aus und bestimmt die äußere Gestalt der Flechte (das Lager). Er schützt die Alge vor einem zu raschen Wasserverlust, zu starker Sonneneinstrahlung und dem Fraß durch Tiere. Die Alge dagegen macht einen nur relativ kleinen Teil der Flechte aus, aber betreibt im Gegensatz zum Pilz Photosynthese und liefert diesem dadurch notwendige Kohlenhydrate (KIRSCHBAUM & WIRTH, 1997).

Neben der Tatsache, dass ihnen ein schützendes Abschlussgewebe fehlt, basiert die geringe Widerstandsfähigkeit gegenüber Schadstoffen auch auf der sensiblen und sehr fein eingestellten Symbiosenatur und dem, durch die geringe Stoffwechselrate bedingtem, sehr langsamen Wachstum der Flechten (WIRTH, 1995). Durch die Langlebigkeit der Flechten sind diese in der Lage einen Überblick über die langfristige Schadstoffbelastung eines Standortes zu geben.

1.1.3 Vergleich mit technischen Messgeräten

Neben Bioindikatoren können natürlich auch technische Messgeräte zur Luftgütebestimmung eingesetzt werden. Jedoch ist der Einsatz dieser Geräte sehr viel teurer als die Arbeit mit

Bioindikatoren (MONGE-NÁJERA et al., 2002) und aufgrund dieser hohen Kosten und logistischen Gründen sind sie nicht flächendeckend einsetzbar. Außerdem kann meist nur eine geringe Anzahl von vorhandenen Schadstoffen und nicht die Gesamtbelastung an einem Standort mit ihnen gemessen werden. Dadurch besteht die Gefahr, dass möglicherweise relevante Luftverunreinigungen nicht erfasst und somit übersehen werden (KIRSCHBAUM & WIRTH, 1997). Technische Messgeräte liefern dafür aber exakte quantitative Daten über die gemessenen Luftschadstoffe. Im Gegensatz dazu zeigen Bioindikatoren die Gesamtbelastung, d.h. die Summe aller Wirkungen von schädlichen Einflüssen ihres Standortes auf und können Schadstoffe über einen längeren Zeitraum in sich akkumulieren (FRAHM, 2001).

Die beste Methode zur Bestimmung der Luftgüte eines Standortes wäre somit eine Kombination aus Bioindikatoren und technischen Messgeräten.

1.2 Stand der Forschung

Im Laufe der Zeit wurden vor allem in Europa und Kanada verschiedene Bioindikationsverfahren zur Bestimmung der Luftgüte entwickelt. Das dabei am häufigsten angewendete Verfahren ist die Kartierung von epiphytischen Flechten.

In Deutschland erstellt der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) seit 1995 einheitliche Kartierungsverfahren zur Ermittlung der Luftqualität, die als sogenannte VDI-Richtlinien veröffentlicht werden (VDI 3799, Blatt 1, 1995; VDI 3957, Blatt 13, 2004; VDI 3957, Blatt 12, 2005). Hierbei werden im jeweiligen Untersuchungsgebiet Bäume nach genau standardisierten Vorgaben auf ihren Bewuchs mit epiphytischen Moosen oder Flechten hin untersucht und kartiert. Die Aufnahme erfolgt dabei je nach Richtlinie auf einer bestimmten Teilfläche des Baumstammes. Dort wird die Frequenz der einzelnen Arten festgehalten. Als Grundlage der verschiedenen Kartierungsmethoden gilt die Annahme, dass die Artenzahl der epiphytischen Arten meist umgekehrt proportional zur Luftverschmutzung ist.

Bei der VDI-Richtlinie 3799 (Blatt 1) aus dem Jahre 1995 werden die Flechten an der am stärksten bewachsenen Seite des Baumstammes mit einem Aufnahmegitter aus 10 Quadraten der Größe 10 cm x 10 cm aufgenommen. Die Frequenz der einzelnen Arten wird festgehalten und dient als Parameter, um den Grad der lufthygienischen Belastung abzuschätzen. Jedoch muss hierbei beachtet werden, dass die seit den 1980er Jahren in Mitteleuropa stark steigende Konzentration von eutrophierend wirkenden Immissionen das Wachstum von Eutrophierungszeigern (düngungstoleranten Arten) sehr begünstigt. Eine Aufsummierung aller vorgefundenen Arten könnte das Ergebnis verfälschen, da ein hoher Diversitätswert nicht unbedingt eine Verringerung der Immissionsbelastung darstellen muss. Deswegen werden in der VDI-Richtlinie 3957 (Blatt 13; 2004) Eutrophierungszeiger getrennt

von den anderen Flechtenarten kartiert und gehen letztendlich negativ in die Luftgütebewertung mit ein. Die Aufnahme der Flechten erfolgt, anders wie bei der vorhergehenden VDI-Richtlinie, an allen vier Himmelsrichtungen am Baumstamm. Dort wird jeweils ein Gitter, welches aus fünf 10 cm x 10 cm Quadraten besteht angebracht.

In der VDI-Richtlinie 3957 (Blatt 12; 2005) zur „Kartierung der Diversität epiphytischer Moose als Indikator für Luftqualität“ sind den einzelnen Moosarten sogenannte Empfindlichkeitswerte zugeordnet, die ein Maß für die Belastungstoleranz der jeweiligen Art darstellen und in die Bewertung der Luftqualität mit eingehen, indem sie für jeden Baum mit der Frequenz der kartierten Arten multipliziert und anschließend aufsummiert werden. Die Aufnahme der Moose erfolgt dabei auf einer Teilfläche des Baumstammes, die den gesamten Stammumfang umfasst und aus 5 gleich großen Feldern besteht.

Um eine Aussage bezüglich Veränderungen der Luftqualität eines Gebietes zu treffen, sind Wiederholungskartierungen durchzuführen, bei denen jeweils dieselben Bäume nach einem bestimmten Zeitraum nach den gleichen Methoden nochmals untersucht werden sollten.

Im Vergleich zu den Arbeiten mit Bioindikatoren in Europa und Kanada wurden bisher nur einige wenige Arbeiten zu diesem Thema in tropischen Ländern durchgeführt. Als einer der ersten gebrauchte der berühmte Botaniker Volkmar Vareschi Flechten als Bioindikatoren in einer tropischen Stadt (HAWKSWORTH et al., 2005). Vareschi führte dabei eine Kartierung in Caracas (Venezuela) durch und teilte die Stadt anhand seiner Ergebnisse in drei verschiedene Flechtenzonen ein (Flechtenwüste, Konfliktzone und normale Zone).

Auch in anderen tropischen Ländern wurde die Luftqualität mit Hilfe von Bioindikatoren durch unterschiedliche Verfahren ermittelt. Hierbei stechen vor allem die vielfältigen Untersuchungen in Costa Rica hervor. Bereits im Jahr 1979 nutzten MÉNDEZ & FOURNIER Flechten als Bioindikatoren für die Luftverschmutzung in der Stadt San José. Sie transplantierten epiphytische Flechten aus wenig belasteten Gebieten der städtischen Umgebung in verschiedene Standorte innerhalb der Stadt und untersuchten diese nach 8 Monaten anschließend im Labor auf akkumulierte Schadstoffe sowie dem Anteil abgestorbener Zellen. Die Flechten, die in stark belastete Gebiete (Industriegebiete; stark befahrene Straßen) transplantiert wurden, zeigten die meisten Schäden oder waren sogar nach den 8 Monaten abgestorben. Neben diesem Transplantationsversuch wurde zusätzlich in San José die prozentuale Bedeckung der Flechtengattung *Parmelia* in fünf verschiedenen Stadtteilen auf jeweils 10 Bäumen mit Hilfe einer 10x 10 cm Schablone bestimmt. Auch hier konnte die Stadt mit Hilfe der Ergebnisse (wie in Caracas) in drei verschiedene Zonen unterteilt werden (MÉNDEZ & FOURNIER, 1980).

Seitdem wurden in San José weitere Arbeiten zur Bioindikation mit Hilfe von epiphytischen Flechten durchgeführt. So untersuchte MONGE-NÁJERA et al. (2002) die Bedeckung von epiphytischen Laubflechten innerhalb der Stadt an verschiedenen Orten über gut 20 Jahre hinweg von 1976 bis 1997. Dabei zeigte sich zuerst eine drastische Abnahme der Bedeckung bis ins Jahr 1990 und anschließend eine Zunahme. Dies wurde mit dem Anstieg der Verkehrsbelastung seit den späten 1970'er Jahren begründet und die anschließende Wiederzunahme der Flechtenbedeckung mit der Elimination von Blei aus dem Benzin.

Auch in der venezolanischen Stadt Mérida wurde bereits eine Arbeit zur Bioindikation mit Flechten durchgeführt (MARCANO et al., 1996). Dabei wurden im Jahr 1978 in fünf verschiedenen Bezirken der Stadt epiphytische Flechten eingesammelt und im Labor auf ihre Schäden, wie z.B. Nekrosen oder Farbveränderungen des Flechtenlagers hin untersucht. Außerdem wurde die elektrische Leitfähigkeit der Membran gemessen, um damit auf den Grad der Luftkontamination zu schließen. Dabei weist, nach MARCANO et al., eine Zunahme der Leitfähigkeit auf einen hohen Grad an Luftverschmutzung hin. In dieser Studie zeigte sich eine hohe lufthygienische Belastung mit Schwermetallen, wie Blei und Quecksilber, in der Stadt Mérida.

2. Untersuchungsgebiet

2.1 Geographische Lage



Abbildung 1: Venezuela (aus: <http://www.lib.utexas.edu/maps/venezuela.html>)

Politisch gesehen teilt sich Venezuela (Abb. 1) in insgesamt 23 Bundesstaaten (estados) auf. Der Bundesstaat Mérida befindet sich im Westen des Landes zwischen 07°39'53'' - 09°19'05'' nördlicher Breite und 70°32'23'' - 71°54'54'' westlicher Länge. Im Norden grenzt der Andenstaat an den Maracaibo-See, im Osten an die Staaten Trujillo und Barinas, im Süden an Barinas und Táchira und im Westen an Táchira und Zulia. Die Fläche des gesamten Bundesstaates Mérida beträgt 11.300 km², dies entspricht in etwa 1,2% der Fläche Venezuelas (EL NACIONAL, 1998). Die Hauptstadt des Staates ist die gleichnamige Stadt Mérida. Sie wird im Südosten vom Gebirgszug der Sierra Nevada und im Nordwesten

von der Sierra La Culata begrenzt. Die Koordinaten der Stadt lauten: 08°35'56'' nördliche Breite und 71°09'12'' westliche Länge (MARCANO et al., 1996).

2.1.1 Anden

Die Anden teilen sich kurz vor der Grenze Venezuelas im westlichen Nachbarstaat Kolumbien in zwei große Teilketten auf. Es wird unterschieden zwischen der in Richtung Südwest- Nordost verlaufenden Cordillera de Mérida und der nach Norden entlang der kolumbianischen Grenze verlaufenden Sierra de Perijá. Getrennt werden diese beiden Teilketten durch das Becken des Maracaibo-Sees (CARDENAS, 1965).

Die Cordillera de Mérida befindet sich zwischen 07°- 10° nördlicher Breite und 70°- 73° westlicher Länge. Sie hat eine Länge von etwa 500 km und erstreckt sich von Táchira im Südwesten bis nach Barquisimeto im Nordosten. Die Breite beträgt je nach Lage etwa 60 bis 100 km (LAMPRECHT, 1958). Die Gebirgskette Cordillera de Mérida unterteilt sich ihrerseits in die schon erwähnte(n) Sierra de La Culata im Norden und die Sierra Nevada im Süden. Diese beiden Gebirgszüge werden durch einen tiefen Graben voneinander getrennt, welcher gleichzeitig auch die tektonische Grenze zwischen der südamerikanischen- und der karibischen Platte bildet (BURGA et al., 2004).

Die höchste Erhebung der venezolanischen Anden befindet sich in der Sierra Nevada. Der sogenannte Pico Bolívar erreicht eine Höhe von 5007 m über NN und ist somit der höchste Berg Venezuelas.

2.2 Klima

Venezuela zählt zu dem Klimabereich der sogenannten inneren Tropen (SCHMIDTHÜSEN, 1988). Dies bedeutet, dass durch die ganzjährig gleichbleibende Sonneneinstrahlung die Temperaturschwankungen innerhalb eines Jahres sehr gering sind und auch die Tageslänge sich im Jahresverlauf kaum verändert. Die Jahresschwankungen der Temperatur liegen nur bei bis zu 5 °C (FREY & LÖSCH, 2004). Aufgrund dieser Eigenschaften wird auch von einer sogenannten Jahresisothermie gesprochen (LAUER, 1975).

Im Gegensatz dazu sind die Tagesschwankungen der Temperatur in den inneren Tropen sehr viel deutlicher ausgeprägt. Dieses Klima wird auch als Tageszeitenklima bezeichnet. Jahreszeiten, aufgrund von unterschiedlichen Temperaturen, wie sie in den gemäßigten Breiten anzutreffen sind, gibt es in Venezuela nicht. Dagegen ist im Laufe eines Jahres ein deutlicher Wechsel zwischen Trocken- und Regenzeit zu beobachten. Die Trockenzeit dauert in der Regel von Dezember bis März/ April. Die Niederschläge in der Regenzeit fallen

meist in Form von tropischen Starkregen (SCHMIDTHÜSEN, 1988). Somit sind die unterschiedlichen Jahreszeiten in den Tropen also rein hygrisch bestimmt (LAUER, 1975).

Die Regen- und Trockenzeiten in den venezolanischen Anden weisen zwei verschiedene Muster auf. Die Gebiete, die durch das Llanos- Klima beeinflusst werden, zeigen nur eine Trockenzeit im gesamten Jahresverlauf auf, und zwar zwischen den Monaten Dezember und Januar. Dagegen weisen die Gebiete, die unter dem Einfluss des Maracaibo-Sees stehen, zwei Trockenzeiten auf, eine zwischen Dezember und März und die andere im Monat Juni (BURGA et al., 2004).

Die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit hängen stark von der jeweiligen Höhenlage ab. Mit steigender Höhe nehmen die Temperaturen ab und die Niederschläge zu. So sinkt in den Tropen die Temperatur pro 100m Höhenanstieg um im Durchschnitt 0,55°C (LAMPRECHT, 1958). In einer Höhe von etwa 2000 m liegt die Jahresmitteltemperatur bei etwa 17 °C, sie fällt auf 11 °C in 3000 m Höhe und beträgt an der Waldgrenze zwischen 3600 und 4000 m nur noch etwa 6 °C. Ab einer Höhe von 2500 m können Fröste auftreten (STRASBURGER, 2002).

Die Niederschlagsmenge dagegen nimmt mit der Höhe zu und erreicht ihr Maximum auf mittlerer Höhe, danach ist eine Abnahme der Niederschläge zu verzeichnen. Jedoch ist in den Anden eine große Variabilität innerhalb der Niederschläge zu beobachten, da sich das Gebirge auf die atmosphärische Zirkulation auswirkt. So gibt es Andenorte mit nur 400mm Niederschlag pro Jahr und dem gegenüber andere Orte mit mehr als 3000mm pro Jahr (BURGA et al., 2004).

Je nach Höhenlage wird in Venezuela unterschieden zwischen tierra caliente (heiße Zone, ca. 0 - 1000m NN), tierra templada (gemäßigte Zone, ca. 1000 – 2800m NN), tierra fría (kalte Zone, ca. 2800 – 3600m NN) und tierra helada (eisige Zone, über 3600m NN). Diese Einteilung in verschiedene, sogenannte Höhenstockwerke (mittels den dort herrschenden Temperaturen) geht auf Henri Pittier zurück (SCHMIDTHÜSEN, 1988).

Im Bundesstaat Mérida sind alle vier Zonen vertreten, vor allem jedoch die gemäßigte Zone, die kalte Zone und die eisige Zone. Aber auch die heiße Zone findet sich dort im Bereich des Maracaibo-Sees wieder. Die mittleren Jahrestemperaturen liegen im Bundesstaat Mérida zwischen 12° und 26°C (EL NACIONAL, 1998).

Die Stadt Mérida wird aufgrund ihrer Höhenlage zur gemäßigten Zone (tierra templada) gezählt. Im Durchschnitt liegen die täglichen Temperaturschwankungen hier bei etwa 10°C. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 18,9°C.

2.3 Vegetation

Die Vegetation in Venezuela ist sehr vielfältig. Die einzelnen Vegetationsformen lassen sich unterteilen in die Vegetation der Festlandküsten und Inseln, die Vegetation der Savannen, die Grasvegetation, Xerophile Trockenwald- und Dornstrauchvegetation, Hartlaubvegetation der Schwarzwassergebiete, Strauchvegetation der Tepuis, Páramo, tropisch laubwerfende Feuchtwälder, tropische hartlaubwerfende Feuchtwälder, tropische immergrüne Tieflandregenwälder, immergrüne Berg- und Nebelwälder, immergrüner guayanischer Bergwald, Galerie- und Überschwemmungswälder und schließlich in die Mangroven (ENGWALD, 1999). Jede dieser unterschiedlichen Vegetationsformen besitzt ihre eigene charakteristische Pflanzenwelt.

Rund um die Stadt Mérida sind vor allem die immergrünen Berg- und Nebelwälder sowie der Páramo anzutreffen. Es findet sich eine Vegetations-Höhenstufung, die sich wie folgt aufteilt: In den Tieflagen am Rande der venezolanischen Anden auf beiden Außenseiten der Cordillera de Mérida wird der submontane Regenwald von dem halbbimmergrünen Bergwald und schließlich ab einer Höhe zwischen 1000- 1800m und 3000- 4000m von dem montanen Nebelwald abgelöst. In den innerandinen Tälern, die im Regenschatten der Gebirgsbarrieren liegen, fehlen diese Vegetationsformen. Stattdessen folgt dort dem sogenannten Dornbusch mit ansteigender Höhe der immergrüne Trockenwald (BURGA et al., 2004).

Die natürliche Waldgrenze liegt in den tropischen Gebirgen zwischen 3600 und 4000 m (STRASBURGER, 2002), hier beginnt der charakteristische Anden- Páramo. Darüber hinaus folgt nur noch die nivale Stufe.

Nebelwald:

Die Vegetation der montanen Nebelwälder ist sehr artenreich. Dies ist unter anderem darin begründet, dass das Feuchteangebot fast ganzjährig unverändert hoch ist. Der Jahresniederschlag liegt zwischen 1000 und 3000 mm. Ab dem frühen Nachmittag werden die montanen Nebelwälder von andriftenden Passatwolken eingehüllt. Diese Bewölkung sowie die relativ tiefen Temperaturen mit einer mittleren Jahrestemperatur zwischen 13- 19 °C führen zu einer geringen Einstrahlung und einer gleichbleibenden Luftfeuchtigkeit (BURGA et al., 2004).

Wichtige baumförmige Vertreter dieser Nebelwälder sind in den tiefen Lagen u.a. Bäume der Gattungen *Weinmannia*, *Clusia*, *Brunellia* und *Alchornea* und mit zunehmender Höhe *Podocarpus*, *Oreopanax*, *Hacelia* und *Ocotea*. Typisch für die höheren Lagen des Nebelwaldes ist die Baumart *Cecropia santanderensis* mit ihren auffälligen silbernen Blättern. Im Unterwuchs der Wälder wachsen Kleinpalmen sowie Baumfarne der Gattung *Cyathea*. Ein Charakteristikum dieser Wälder ist der starke Epiphytenbewuchs der Bäume.

Vertreter der vaskulären Epiphyten gehören u.a. zu den Familien der Orchidaceae, Piperaceae, Araceae und Bromeliaceae. Weit verbreitet ist die Bromeliaceae *Tillandsia usneoides*, die selbst in der Stadt Mérida auf der Mehrzahl der Bäume vorzufinden ist. Neben den vaskulären Epiphyten bewachsen auch viele epiphytische Kryptogamen die dortigen Bäume. Diese werden mit zunehmender Höhe immer dominanter und lösen die epiphytischen Angiospermen ab (BURGA et al., 2004).

Páramo:

Oberhalb der Nebelwälder schließt sich ab einer Höhe von ca. 3600m die tropische Hochgebirgsvegetation an, die in den Anden als Páramo bezeichnet wird. Die Niederschläge betragen meist deutlich unter 1500 mm im Jahr. Die durchschnittlichen Jahrestemperaturen liegen unter 9 °C (BURGA et al., 2004). Mit zunehmender Höhe werden Nachtfroste immer häufiger. Gräser und Zwergsträucher sind dort die dominierenden Vertreter. Wichtige Familien sind Asteraceae und Poaceae. Charakteristisch für die Páramos sind die dort vorzufindenden Schopfrosetten der Gattung *Espeletia* (Asteraceae). Diese sind weißfilzig behaart und schützen sich dadurch vor der starken Sonnenstrahlung in dieser Höhe. Auch an die nächtlich auftretenden Fröste sind diese Schopfrosetten- Pflanzen gut angepasst, da sie sich bei Nacht schließen können.

Als Spezialfall in den Páramos gelten die sog. *Polylepis*- Wälder. Diese sind noch in Höhenlagen von bis zu 3800 m vorzufinden, in denen andere baumartige Vertreter keine Überlebenschance mehr haben. Die *Polylepis*- Bäume gehören zu der Familie der Rosaceae und können zwischen 1– 6 m hoch werden. Sie sind sehr gut an die Höhe und das dortige Klima angepasst.

In größerer Höhe folgt der sogenannte Hochanden-Páramo. Hier herrscht das ganze Jahr über Nachtfrost. Die Jahrestemperatur liegt meist bei -2° C und der Jahresniederschlag zwischen 800 und 1200 mm. Die Vegetation ist sehr lückenhaft. Oftmals bestehen weite Flächen aus nacktem Substrat. Die Vegetation setzt sich aus den Schopfrosetten der Gattung *Espeletia* sowie Kissenpolsterpflanzen wie z. B. *Azorella* und *Mona* zusammen. Desweiteren sind auch einige Flechtenarten vertreten (BURGA et al., 2004).

2.3.1 Moose in Venezuela

Moose gehören in Venezuela zu der Pflanzengruppe, die bisher am wenigsten untersucht ist. Die ersten Moossammlungen aus Venezuela gehen auf Humboldt und Bonpland im Jahre 1799 zurück. Im Jahr 1936 veröffentlichte Henri Pittier die erste Liste an Moosen aus Venezuela mit 431 unterschiedlichen Arten (AGUILERA et al., 2003).

Heutzutage wird von 232 Laubmoosgattungen und 1012 Laubmoosarten in Venezuela ausgegangen. Die Lebermoose werden mit 134 Gattungen und 34 Familien für Venezuela beziffert. Dies entspricht einem Anteil von 45% an den weltweit vorkommenden Lebermoosgattungen. Vor allem in den feuchten Nebelwäldern und in den Páramos ist eine hohe Diversität von Moosen vorzufinden (AGUILERA et al., 2003).

2.3.2 Flechten in Venezuela

In Venezuela kommen sehr viele verschiedene Flechtenarten vor. Dies ist vor allem bedingt durch die hohe Diversität an unterschiedlichen Ökosystemen (AGUILERA et al., 2003). Die erste wissenschaftliche Sammlung von Flechten in Venezuela geht ebenfalls auf Alexander von Humboldt und Jaime Bonpland in den Jahren 1816- 1830 zurück.

In den venezolanischen Anden im Staate Mérida führte Johann Wilhelm Karl Moritz zwischen 1835 und 1850 die erste wissenschaftliche Sammlung von Flechten durch (AGUILERA et al., 2003). Ab dem Jahre 1950 erfuhr die Flechtensammlung einen regelrechten Aufschwung. Hervorzuheben ist hier vor allem der Botaniker Volkmar Vareschi. Im Jahre 1973 publizierte er den ersten Katalog der Flechten Venezuelas: „Catálogo de los líquenes de Venezuela“ mit insgesamt 429 unterschiedlichen Flechtenarten und 52 Gattungen (AGUILERA et al., 2003). In den darauf folgenden Jahren ging die Investigation im Bereich der Flechten mit großem Elan weiter. Verschiedenste Wissenschaftler aus der ganzen Welt untersuchten immer wieder die venezolanische Flechtenflora in bezug auf Taxonomie, Diversität, Ökologie und chemische Eigenschaften.

Heute wird die Anzahl der venezolanischen Flechten auf 1359 Arten, 182 Gattungen und 49 Familien beziffert. Dabei sind die Regionen mit der höchsten Flechtendiversität der Nebelwald und der Páramo (AGUILERA et al., 2003).

2.4 Stadt Mérida

Die Stadt Mérida (offizieller Name: Santiago de los Caballeros de Mérida) (Abb. 2) bedeckt eine Fläche von ca. 25 km² und beherbergt mehr als 237.000 Einwohner (<http://www.venezuelatuya.com/estados/merida.htm>).

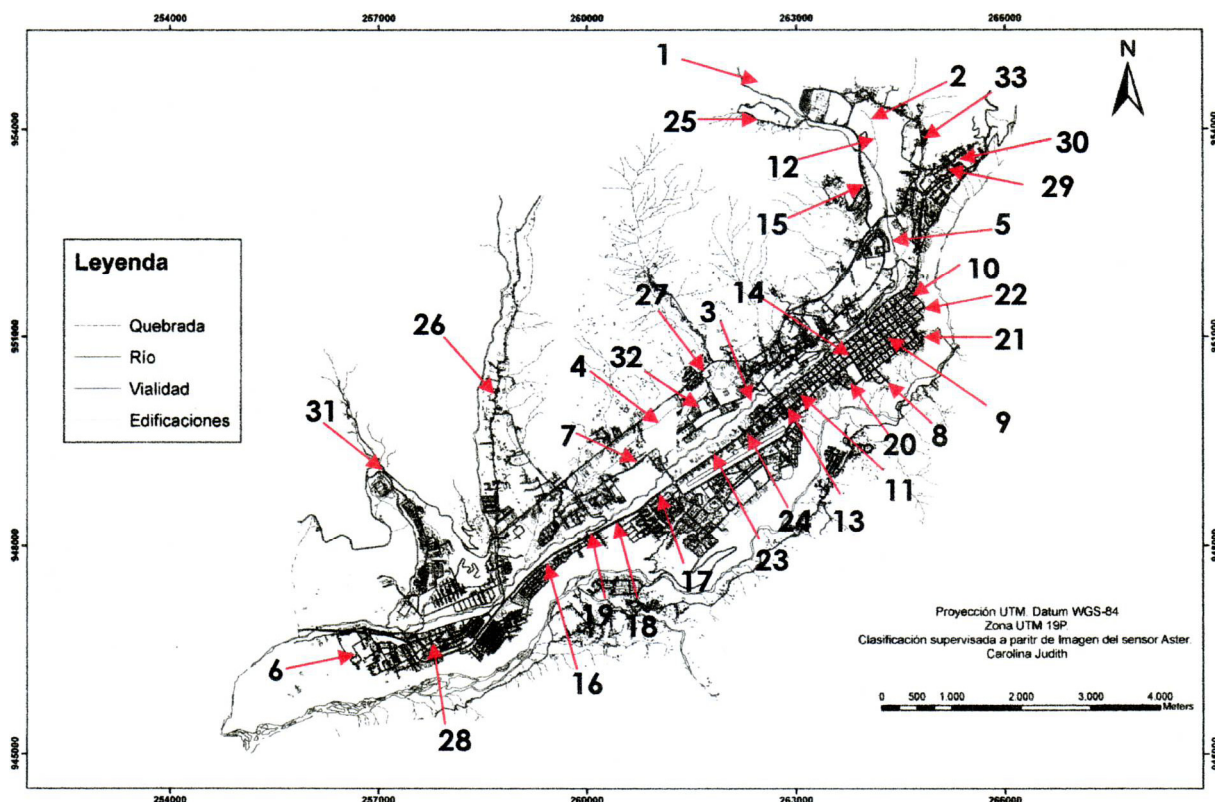


Abbildung 2: Stadt Mérida mit Kartierungsorten

Die Höhe der Stadt schwankt zwischen 1160m ganz im Südwesten des Stadtgebietes und 1660m im äußersten Nordosten, dabei liegt das Stadtzentrum (Plaza Bolívar) auf einer Höhe von 1610 m.

Mérida liegt auf einer Terrasse zwischen den beiden Gebirgsketten Sierra Nevada im Süden und Sierra La Culata im Norden. Der höchste Berg Venezuelas, der Pico Bolívar (5007m NN), befindet sich in unmittelbarer Nähe zu der Stadt und ist von allen Stadtteilen aus zu sehen. Der Fluss Río Albarregas teilt die Stadt und durchquert sie in ihrer ganzen Länge von Nordosten Richtung Südwesten. Im Nordosten wird er durch den Fluss Milla gespeist. Am südlichen Stadtrand fließt der Fluss Mucujún mit dem größeren Río Chama zusammen. Wegen der Lage zwischen den beiden Gebirgsketten im Norden und im Süden hatte die Stadt nie die Möglichkeit unkontrolliert in die Breite zu wachsen. Die gesamte Länge des Stadtgebietes mit den dazu gehörigen Vororten beträgt zwischen 10 und 15 km und die Breite im Schnitt nur 4 km, davon sind in etwa 25 km² bebautes Stadtgebiet. Die Innenstadt ist in dem typischen Schachbrettmuster der Kolonialzeit angelegt. Es gibt 8 Avenidas, die in nordsüdlicher und 50 calles die in westöstlicher Richtung verlaufen. In den Außenbezirken ist diese Ordnung nicht mehr vorzufinden.

Im Vergleich zu anderen venezolanischen Städten bietet die Stadt Mérida sehr viele Grünflächen in Form von kleinen Parkanlagen oder sogenannten Plazas.

2.4.1 Kartierungsorte

Die Stadtteile, Straßen, Parkanlagen und Plätze der Stadt Mérida, in denen die Kartierungen durchgeführt wurden, werden in diesem Kapitel kurz beschrieben (siehe auch Abb. 2).

Die verschiedenen Kartierungsorte wurden ausgewählt, da sie den Epiphyten unterschiedliche Standortmöglichkeiten bieten.

Monte Zerpa (1):

Dieser Kartierungsort liegt im äußersten Norden der Stadt. Hier befinden sich nur sehr wenige, weit verstreute Häuser. Eine einzige Straße, die so gut wie nicht befahren wird, führt dort hinauf.

Hinterer Teil des Botanischen Gartens (2):

Offiziell gehört dieser Teil zum botanischen Garten der Stadt, liegt aber etwas getrennt von diesem in der Nähe des Stadtteils Chorrros de Milla. Gekennzeichnet ist er durch eine fast reine Monokultur von *Pinus caribaea*.

Lecho del Rio Albarregas (3):

Dieser Ort liegt mitten in der Innenstadt von Mérida direkt am Fluss Rio Albarregas unterhalb der Brücke Viaducto Miranda. Da der Fluss im Laufe der Zeit eine tiefe Schlucht gegraben hat, liegt dieser Teil etwas tiefer als die restliche Innenstadt, ist nicht bebaut und an beiden Ufern wild bewachsen.

Santa Barbara (4):

An der stark befahrenen Avenida Los Proceres befand sich der kleine Park Santa Barbara, der mittlerweile abgeholzt wurde, um einem Einkaufszentrum Platz zu machen.

Parque La Isla (5):

Der Parque La Isla ist ein relativ großer Park im nördlichen Teil der Stadt mit vielen schon etwas älteren Bäumen und künstlich angelegter Seenlandschaft. Diese Parkanlage ist vor allem von vielen Familien und auch Jugendgruppen gut besucht.

Zumba (6):

Am südlichsten Zipfel der Stadt befindet sich der, abseits stark befahrener Straßen gelegene, Stadtteil Zumba. Hier sind die großen Sportanlagen der Stadt sowie das neue Fußballstadion zu finden.

Avenida Las Américas (7):

Die Avenida Las Américas ist eine sehr stark befahrene Straße, die die Stadt von Norden Richtung Süden fast komplett durchquert.

Parque Las Heroínas (8):

Der Park Las Heroínas befindet sich im Südosten der Stadt direkt am Eingang zu der Seilbahn (Teleférico) von Mérida und ist sehr gut besucht. Dagegen ist der Straßenverkehr eher mäßig, da hier keine Durchfahrtsstraße entlang führt, sondern die Straßen als Sackgassen am Park enden.

Plaza Bolívar (9):

Direkt im Zentrum der Stadt liegt die berühmte Plaza Bolívar. Nicht nur bei den Einheimischen sondern auch bei den Touristen dient der Platz als beliebter Treff- und Aufenthaltspunkt. Zwei stark befahrene Straßen begrenzen den Platz.

Plaza Milla (10):

Diese Plaza liegt im Osten der Stadt an einer stark befahrenen Straße. Fast täglich staut sich dort der Verkehr.

Plaza Glorias Patrias (11):

Mitten in der Stadt in der Nähe des Flughafens liegt die Plaza Glorias Patrias. Sie ist von stark befahrenen Straßen umgeben.

Botanischer Garten (12):

Der botanische Garten der Universität befindet sich im Norden der Stadt, abseits von dem Verkehrschaos der Innenstadt.

Plaza Julio Salas (13):

Dies ist ein relativ kleiner Platz in der Nähe des Flughafens an einer stark befahrenen Straße. Der Platz besitzt eine sehr kleine Grünfläche mit nur wenigen Bäumen.

Plaza El Llano (14):

Die kleine Plaza El Llano befindet sich mitten im Stadtzentrum an zwei stark befahrenen Straßen, auf denen sich täglich der Verkehr staut.

Avenida Carnevali (15):

Diese Straße liegt im Norden der Stadt und durchquert den Stadtteil La Hechicera. Sie führt bis ans nördliche Ende der Stadt zu den naturwissenschaftlichen Fakultäten der Universität. Besonders an den Werktagen ist diese Straße stark befahren.

Avenida Andrés Bello (16):

Die Avenida Andrés Bello führt im Süden aus der Stadt hinaus und ist ebenfalls durch ein starkes Verkehrsaufkommen gekennzeichnet.

Parque Andrés Bello (17):

Im südwestlichen Teil der Stadt gelegener kleiner Park an gleichnamiger Straße.

Parque Las Tres Méridas (18):

Fortsetzung des Parque Andrés Bello.

Parque El Ejercito (19):

Diese Parkanlage befindet sich ebenfalls an der stark befahrenen Avenida Andrés Bello im Süden der Stadt.

Parque Los Conquistadores (20):

Im Südosten Méridas liegt der kleine Park Los Conquistadores mit Blick auf die Sierra Nevada. An ihm vorbei führt eine Straße, auf der besonders an den Werktagen ein hohes Verkehrsaufkommen zu verzeichnen ist.

Parque Los Poetas (21):

Dieser sehr ruhige Park liegt versteckt am östlichen Zipfel der Innenstadt. Hier ist keine stark befahrene Straße in der Nähe. Der Park mit den vielen Bäumen bietet einen freien Blick auf die Sierra Nevada und den Río Chama.

Plaza La Columna (22):

Auch die kleine Plaza La Columna ist im östlichen Teil des Stadtzentrums zu finden. Jedoch ist sie nicht so versteckt wie der Park Los Poetas und liegt direkt an einer Straße.

Parque Los Escritores Méridenses (23):

Der Park Los Escritores Méridenses befindet sich direkt gegenüber dem Flughafen an einer sehr stark befahrenen Straße.

Avenida Urdaneta (24):

Die Avenida Urdaneta liegt mitten in der Stadt und führt direkt am Flughafen der Stadt vorbei. Im Süden geht die Straße in die Avenida Andrés Bello über. Sie ist geprägt durch starken Stadtverkehr.

Santa Rosa (25):

Im äußersten Norden der Stadt liegt Santa Rosa. Mit einer Höhe von 1660 m ist es der höchstgelegene Stadtteil von Mérida. Santa Rosa hat einen eher schon dörflichen Charakter mit kleinen Einfamilienhäusern.

La Pedregosa (26):

Weiter südwestlich ist der Stadtteil La Pedregosa gelegen. Richtung Norden steigt dieser kontinuierlich an und grenzt an die bewaldeten Hänge der Sierra de La Culata. Geprägt wird dieser vor allem durch Einfamilienhäusern mit großen Gärten.

Avenida Los Proceres (27):

Auch diese Straße ist stark befahren. Sie führt am nordöstlichen Rand der Stadt von Südwesten nach Nordosten. Da die Avenida Los Próceres zur Panamericana gehört wird sie vor allem von sehr vielen LKWs befahren.

Plaza Bolívar, La Parroquia (28):

Kleine Plaza im Stadtteil La Parroquia im Süden der Stadt. Zwei stark befahrene Straßen führen an der Plaza vorbei.

Avenida Universidad (29):

Die Avenida Universidad liegt im Norden von Mérida und führt in dieser Richtung aus der Stadt heraus. Sie ist eine Straße mit sehr hohem Verkehrsaufkommen.

Parque Beethoven (30):

Der Beethoven Park befindet sich auch im Norden der Stadt in einem sehr ruhigen Stadtteil. Er besteht aus einer großen Rasenflächen und ein paar wenigen Bäumen.

Los Curos (31):

Im Süden der Stadt gelegener Stadtteil mit Anstieg in Richtung Norden. Dieser Bezirk ist geprägt von Mehrfamilienhäusern. Nur wenige Grünflächen befinden sich in diesem Teil der Stadt. Los Curos wird von zwei stark befahrenen Straßen durchquert.

Parque Ciudad de Los Niños (32):

Der Park Ciudad de los Niños befindet sich in der Nähe der Avenida Las Américas direkt hinter dem großen Busbahnhof von Mérida.

Forestal (33):

Diese große Grünanlage gehört zur forstwirtschaftlichen Fakultät der Universität und liegt abseits von stark befahrenen Straßen. Sie gehört zu dem Stadtteil Chorros de Milla, welcher im Norden der Stadt liegt und teilweise an die bewaldeten Ausläufer der Sierra La Culata grenzt.

3. Methoden

Die Datenerfassung in der venezolanischen Stadt Mérida fand im Jahr 2008 zwischen den Monaten März und Mai (in der Trockenzeit) statt.

3.1. Bestimmung des Borken-pHs

Zur Bestimmung des Borken-pHs wurden von jedem kartierten Baum kleine Borkenstücke der obersten Schicht mit einem Messer von der mit Epiphyten am stärksten bewachsenen Seite des Stammes entnommen. Die entfernten Borkenstücke wurden vor Ort in einem kleinen Plastikbehälter mit der 2,5 fachen Menge Aqua dest. versetzt. Nach einem Zeitraum von etwa 10 Minuten erfolgte mit Hilfe eines elektronischen pH-Meters mit einer Rundkopfelektrode die Messung des pH-Wertes. Zwischen den einzelnen Messungen wurden die Elektrode sowie der Plastikbehälter mit destilliertem Wasser gereinigt.

3.2 GPS-Daten (Global Positioning System)

Mit Hilfe eines GPS-Gerätes (Garmin eTrex Navigation) wurden die geographischen Koordinaten an jedem Kartierungsort ermittelt.

3.3 Untersuchungsgebiete

Die Untersuchung erfolgte innerhalb der gesamten Stadt Mérida in unterschiedlichen Stadtteilen, in Parkanlagen auf öffentlichen Plätzen und an Straßen. Je nach Möglichkeit wurden jeweils 4- 6 möglichst gleichmäßig verteilte Bäume pro Aufnahmeort erfasst.

3.3.1 Dokumentation des Standortes

Für jeden Kartierungsort wurden die geographischen Koordinaten, die Meereshöhe sowie die Verkehrsbelastung festgehalten.

Die Höhe der Verkehrsbelastung wurde nach folgender Skala eingestuft:

Tabelle 1: Verkehrsbelastung

Stufe	Verkehrsbelastung
1	sehr gering
2	gering
3	gering bis hoch
4	hoch
5	sehr hoch

3.4 Auswahl der Trägerbäume

Laut der deutschen VDI-Richtlinie für die Kartierung von epiphytischen Flechten sollen möglichst Bäume mit vergleichbaren Borkeneigenschaften untersucht werden (VDI-Richtlinie 3799, Blatt 1, 1995), da z.B. der Borken-pH die Zusammensetzung der verschiedenen Epiphyten bestimmen kann. Außerdem kann die Menge der an einem Baum wachsenden Epiphyten von der Struktur der Borke (rissig oder glatt) beeinflusst werden (FRAHM, 2001). Auch bei der Kartierung in Mérida wurde soweit möglich darauf geachtet Bäume mit vergleichbaren Borkenbeschaffenheiten zu untersuchen. Jedoch ist die Bedeutung der Borkeneigenschaften und somit der Einfluss des Substrates für epiphytische Moose und Flechten in den Tropen nicht ganz so groß wie in Mitteleuropa, da mit steigender Niederschlagsmenge bzw. Luftfeuchte die Substratpräferenz der Arten abnimmt (FRAHM, 1998). Die erhöhten Niederschläge führen zu einer erhöhten Zufuhr von Nährstoffen und somit zu einer gesteigerten Phytomassenbildung (FRAHM, 2001).

Nach folgenden Kriterien wurden die zu untersuchenden Bäume ausgewählt:

- Möglichst freistehender Baum
- Der Stammdurchmesser sollte bestimmte Ober- und Untergrenzen nicht über- bzw. unterschreiten (50- 350 cm in einer Höhe von 1,5 m)
- Keine sichtbaren Verletzungen
- Die Inklination sollte nicht mehr als 10° (Abweichung vom Lot) betragen

Für jeden Baum wurden zur weiteren Charakterisierung folgende Angaben notiert:

- Baumart
- Umfang des Baumstammes in 1,5 m Höhe
- Inklination des Stammes
- pH-Wert der Borke
- Borkentextur (glatt/ rissig)
- Exposition der Aufnahmefläche
- Aufnahmedatum

- Laufende Baumnummer

3.5 Erfassung der Moose und Flechten

Für die Frequenz Erfassung der epiphytischen Moose und Flechten eines Baumes wurde ein Aufnahmegeritter, welches aus 10 Quadraten besteht, verwendet (VDI-Richtlinie 3799, Blatt 1, 1995). Das Aufnahmegeritter besaß eine Kantenlänge von 20 cm x 50 cm. Jedes der 10 Quadrate war 10 cm x 10 cm groß. Die Unterkante des Gitters wurde in einer Höhe von 1,5m an der mit Epiphyten am stärksten bewachsenen Seite angebracht (Abb.3). Innerhalb des Gitters wurde für jede dort vorkommende epiphytische Moss- und Flechtenart die Frequenz ermittelt, d.h. es wurde festgehalten in wie vielen der 10 Gitter die einzelne Art vorkommt. Somit betrug die höchste Frequenz einer Art an einem Baumstamm 10.

Moos- und Flechtenarten, die nicht innerhalb des Aufnahmegeritters, aber in unmittelbarer Nähe auf dem Baumstamm vorzufinden waren, wurden mit einer Frequenz von 1 notiert.

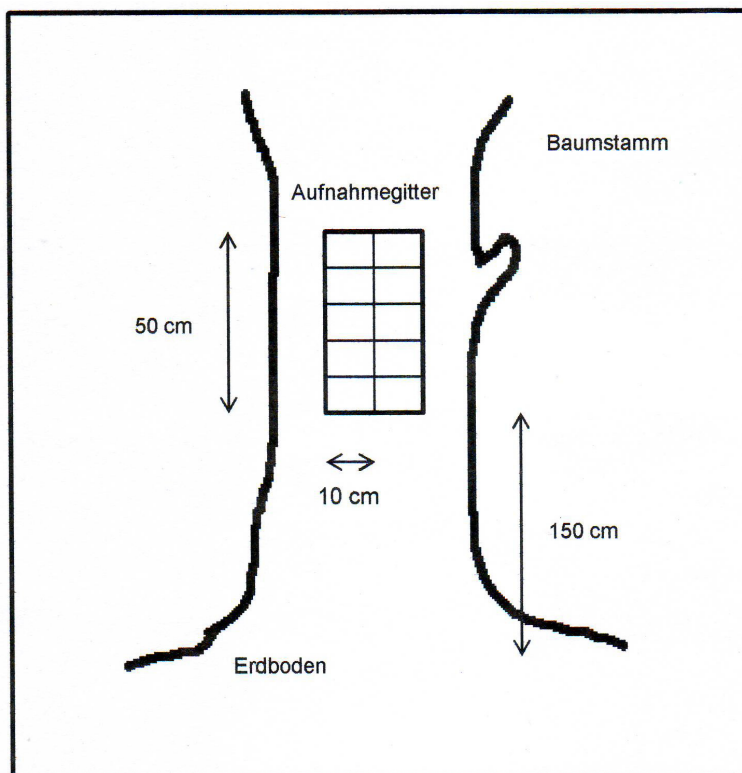


Abbildung 3: Aufnahmegeritter zur Frequenz Erfassung von Moosen und Flechten

3.6 Berechnung der Luftgütwerte

Moose und Flechten, die nicht bis auf Art-Ebene bestimmt werden konnten, wurden für die Berechnung der Luftgütwerte zu Artengruppen zusammengefasst.

Für jeden Kartierungsort wurde zunächst der Luftgütewert (LGW) ermittelt. Dieser ergibt sich aus den Mittelwerten der Frequenzsummen an den kartierten Bäumen und wurde nach folgender Formel berechnet:

$$LGW_j = \frac{\sum F_{ij}}{n_j}$$

i = Nummer des einzelnen Baumes im Kartierungsort j

j = Nummer des Kartierungsortes

F_{ij} = Frequenzsumme der Flechten am Baum i im Kartierungsort j

n_j = Anzahl der kartierten Bäume im Kartierungsort j

Da der Luftgütewert eine statistische Schätzung darstellt, hängt die Genauigkeit dieser Schätzung von der Fehlerstreuung (Standardabweichung) der Ergebnisse ab. Deswegen wurden als Maß für die Güte des LGW's die untere und obere Vertrauensgrenze ermittelt. Sie geben das Konfidenzintervall an, innerhalb dessen der wahre Luftgütewert mit einer statistischen Wahrscheinlichkeit von 95% zu finden ist. Zur Berechnung wurden folgende Formeln verwendet:

- Standardabweichung:

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum (F_{ij} - LGW_j)^2}{n_j - 1}}$$

- Untere, obere Vertrauensgrenze:

$$VGU_j, VGO_j = LGW_j \pm t_j \times \frac{s_j}{\sqrt{n_j}}$$

s_j = Standardabweichung des Kartierungsortes j

VGU_j, VGO_j = Untere und obere Vertrauensgrenze des LGW_j

t_j = kritischer Wert der Studentverteilung für n_j – 1 Freiheitsgrade (siehe Tabelle 2)

Tabelle 2: Kritische Werte der Studentverteilung

n - 1	t
3	3,182
4	2,776
5	2,571
6	2,447

3.7 Ermittlung der Luftgüteklassen

Die ermittelten Luftgütewerte wurden zu Luftgüteklassen zusammengefasst. Die unterschiedlichen Luftgüteklassen repräsentieren jeweils verschiedene Stufen der Luftqualität. Dabei hängt die Klassenbreite von der mittleren Standardabweichung der Kartierung ab und entspricht dem halben Konfidenzintervall. Somit wird die Anzahl der unterschiedlichen Luftgüteklassen von der Qualität der durchgeführten Kartierung, wie z.B. der Homogenität des Untersuchungsraumes, der Standardisierung und Anzahl kartierter Bäume pro Meßfläche, bestimmt. Die Breite der Luftgüteklassen wurde nach folgender Formel berechnet:

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_j \sum_i (F_{ij} - LGW_j)^2}{m(n_p - 1)}}$$

$$\text{Klassenbreite der Luftgüteklassen} = t_p \cdot \frac{s_p}{\sqrt{n_p}}$$

s_p = mittlere Standardabweichung aller Kartierungsorte

n_p = mittlere Anzahl kartierter Bäume pro Kartierungsort

m = Anzahl kartierter Messflächen im gesamten Projekt

t_p = kritischer Wert der Studentverteilung für $n_p - 1$ Freiheitsgrade (siehe Tab. 2)

Die Luftgütewerte der verschiedenen Kartierungsorte wurden nach folgendem Muster (Tab. 3) in die Luftgüteklassen eingestuft:

Tabelle 3: Einteilung der Luftgüteklassen

Untere Klassengrenze		Obere Klassengrenze
0	$< LGW_j \leq$	1x Klassenbreite
1x Klassenbreite	$< LGW_j \leq$	2x Klassenbreite
	usw.	

3.8 Bewertung und Darstellung der Luftgüteklassen

Für Mitteleuropa besteht eine Belastungsskala, die für die Bewertung der Luftgüteklassen herangezogen wird. Sie besteht aus sechs unterschiedlichen Luftgütezonon, die jeweils mit

einer Farbe und einer verbalen Bewertung gekennzeichnet sind. Die Breite der einzelnen Klassen beträgt hierbei 12,5.

Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Luftgüteklassen, deren Benennung sowie Farbgebung richten sich nach dieser mitteleuropäischen Belastungsskala.

3.9 Pflanzensoziologische Erfassung

Neben der Frequenzanalyse wurden bei der Kartierung zusätzlich auch die Moos- und Flechtengesellschaften nach der BRAUN- BLANQUET- Methode erfasst. Die Aufnahme am Baumstamm erfolgte an der gleichen Stelle und Höhe wie die Frequenzermittlung. Die Größe der Aufnahmefläche betrug 20 cm x 20 cm. Dabei wurde mit Hilfe der modifizierten Skala von FREY (1933 in KLEMENT, 1955) die Deckung der Moose und Flechten geschätzt.

Skala	Deckung in %	Mittlere Deckungsprozente
+	< 1	0,5
1	> 1 – 6	3,5
2	> 6 – 12,5	9,3
3	> 12,5 – 25	18,8
4	> 25 – 50	37,5
5	> 50 – 100	75,0

3.10 Toxitoleranzwerte

Zur Einstufung der Empfindlichkeit der einzelnen Arten gegenüber Luftschadstoffen wurde folgende Skala entwickelt (Tab. 4):

Tabelle 4: Toxitoleranzwerte

Stufe	Erklärung
1	sehr empfindliche Arten
2	empfindliche Arten
3	gering toxtolerante Arten
4	toxtolerante Arten
5	hoch toxtolerante Arten

3.11 Bestimmungsarbeit

Von denen im Untersuchungsgebiet kartierten Moosen und Flechten wurden jeweils kleine Proben von den Bäumen gesammelt, um sie zu einem späteren Zeitpunkt anhand mikroskopischer Merkmale und/ oder Farbreaktionen zu bestimmen. Die mikroskopische Bestimmung der gesammelten Moosproben erfolgte mit freundlicher Unterstützung von Herrn Prof. Frahm und Frau Dr. Léon-Vargas nach CHURCHILL & LINARES (1995) und GRADSTEIN et al. (2001) sowie spezieller Bestimmungsliteratur. Die Flechtenproben wurden mit freundlicher Unterstützung von Herrn Dr. Sipman und Herrn Dr. Marcano bestimmt.

3.12 Tabellenarbeit

Die Erstellung und Bearbeitung von Tabellen erfolgte mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes Excel für Windows.

3.13 Statistische Auswertung

Die deskriptiven Statistiken wie Torten- und Balkendiagramme wurden ebenfalls mit Excel erstellt und ausgewertet.

Mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS Version 16 für Windows wurden Korrelationsanalysen durchgeführt sowie Boxplots erstellt.

4. Ergebnisse

4.1 Trägerbäume

Insgesamt wurden in der Stadt Mérida 149 Bäume kartiert. Es gingen folgende Trägerbaumarten in die durchgeführte Kartierung ein:

<i>Anacardium sp.</i>	<i>Hibiscus tiliaceus</i>
<i>Bauhinia sp.</i>	<i>Hibiscus sp.</i>
<i>Callistemon speciosus</i>	<i>Inga sp.</i>
<i>Casuarina equisetifolia</i>	<i>Mangifera indica</i>
<i>Ceiba pentandra</i>	<i>Mauritia sp.</i>
<i>Cordia alliodora</i>	<i>Persea sp.</i>
<i>Cupressus lusitana</i>	<i>Pinus caribaea</i>
<i>Erythrina poepegiana</i>	<i>Pinus patula</i>
<i>Fraxinus americana</i>	<i>Pinus sp.</i>
<i>Fraxinus sp.</i>	<i>Syzygium jambos</i>
<i>Ficus maytin</i>	<i>Tabebuia rosea</i>
<i>Ficus sp.</i>	

Fraxinus americana ist mit 55 Bäumen die am häufigsten kartierte Trägerbaumart. Der prozentuale Anteil dieser Art an allen kartierten Bäumen beträgt 38% (Abb. 4). Mit 12% bzw. 8% Anteil folgen die Arten *Tabebuia rosea* sowie *Erythrina poepegiana*.

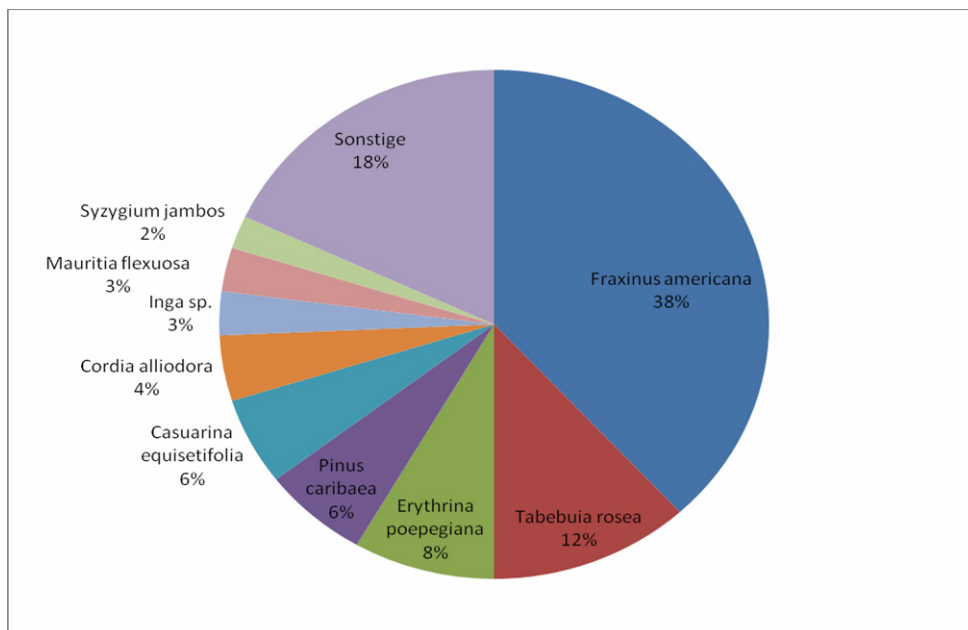


Abbildung 4: Prozentualer Anteil der Baumarten an den kartierten Trägerbäumen

Die höchste Artendiversität an epiphytischen Moosen und Flechten mit insgesamt 68 unterschiedlichen Arten ist auf *Fraxinus americana* zu finden (Abb.5). Dabei ist der Anteil der Flechten mit 54 Arten fast viermal so hoch wie die Anzahl an Moosen mit nur 14 Arten.

Die übrigen Trägerbaumarten weisen eine deutlich geringere Artendiversität auf. Dies ist jedoch hauptsächlich auf die geringe Stichprobenanzahl zurückzuführen und somit stark abhängig von der Anzahl der kartierten Bäume einer Baumart.

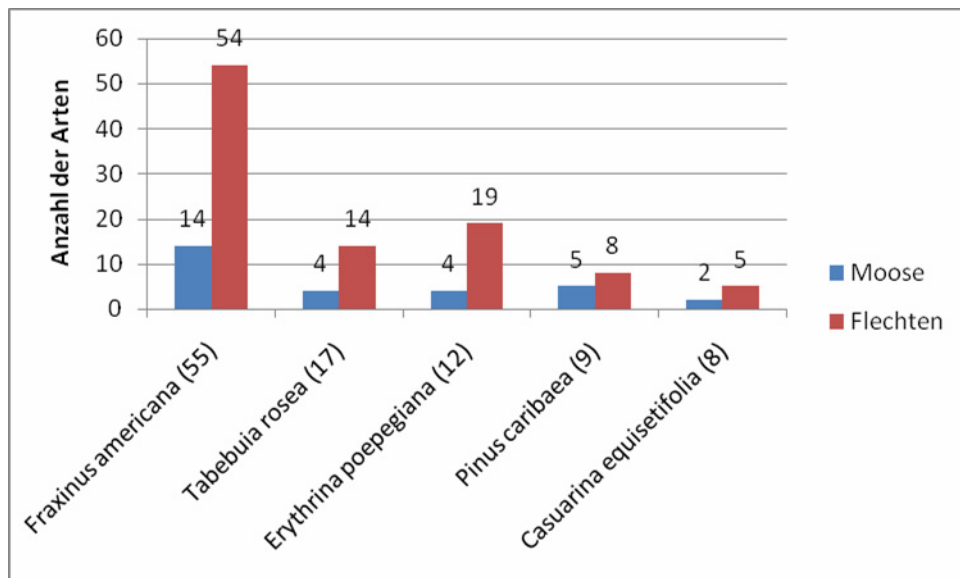


Abbildung 5: Gesamtartenzahlen von Moosen und Flechten auf den 5 am häufigsten untersuchten Baumarten (in Klammern: Anzahl der kartierten Bäume)

4.1.1 Untersuchung der pH-Werte

Bei 109 von insgesamt 149 Bäumen wurde der pH-Wert der Borke bestimmt. Die Abbildung 6 zeigt von den fünf am häufigsten untersuchten Bäumen die gemessenen pH-Wert-Bereiche. Dabei lässt sich erkennen, dass je nach Baumart die pH-Werte unterschiedlich stark streuen können. Bei *Fraxinus americana* besitzen 50% der untersuchten Bäume einen pH-Wert zwischen 5,7 und 5,9. Jedoch sind bei dieser Art auch einige Ausreißer zu verzeichnen, die deutlich über oder unter dem genannten pH-Wert-Bereich liegen. *Pinus caribaea* zeigt die niedrigsten pH-Werte. 50% der Bäume dieser Art weisen einen Wert zwischen 5,2 und 5,3 auf. Dagegen liegen die pH-Werte von *Erythrina poeppigiana* deutlich höher. Hier besitzen 50% der Bäume einen pH-Wert zwischen 6,0 und 6,4.

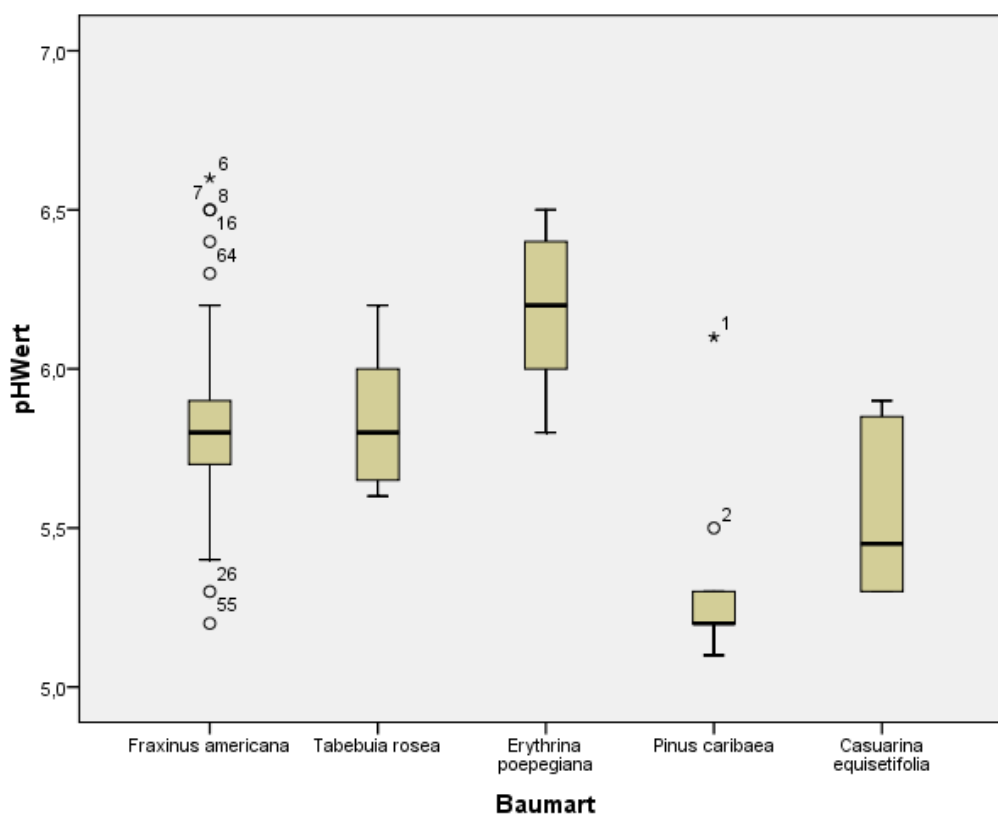


Abbildung 6: pH- Wert- Bereiche der 5 häufigsten Baumarten

Der Großteil der untersuchten Bäume weist einen mittleren pH-Wert unter 6 auf, wie z.B. die Arten *Fraxinus americana*, *Pinus caribaea*, *Casuarina equisetifolia* und *Tabebuia rosea*. Somit besitzen sie eine mäßig saure bis saure Borke. Nur *Erythrina poeppigiana* ist mit einem pH-Wert-Median von 6,2 als ein Baum mit subneutraler Borke zu bezeichnen.

Um einen eventuellen Zusammenhang zwischen pH-Wert und Anzahl der auf dem Trägerbaum wachsenden Moose bzw. Flechten zu überprüfen, wurde eine Korrelationsanalyse nach Spearman durchgeführt. Es zeigt sich dabei sowohl bei den Moosen als auch bei den Flechten jeweils eine signifikante Korrelation (Tab. 5).

Tabelle 5: Korrelationsanalyse nach Spearman zwischen dem pH-Wert und der Artenanzahl der Moose und Flechten

pH (n= 109)	r_s
Anzahl Moose	0,287**
Anzahl Flechten	0,443**

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

Das heißt, je höher der gemessene Borken-pH war, desto höher war die Anzahl der auf dem Baum wachsenden Moos- und Flechtenarten (Abb. 7).

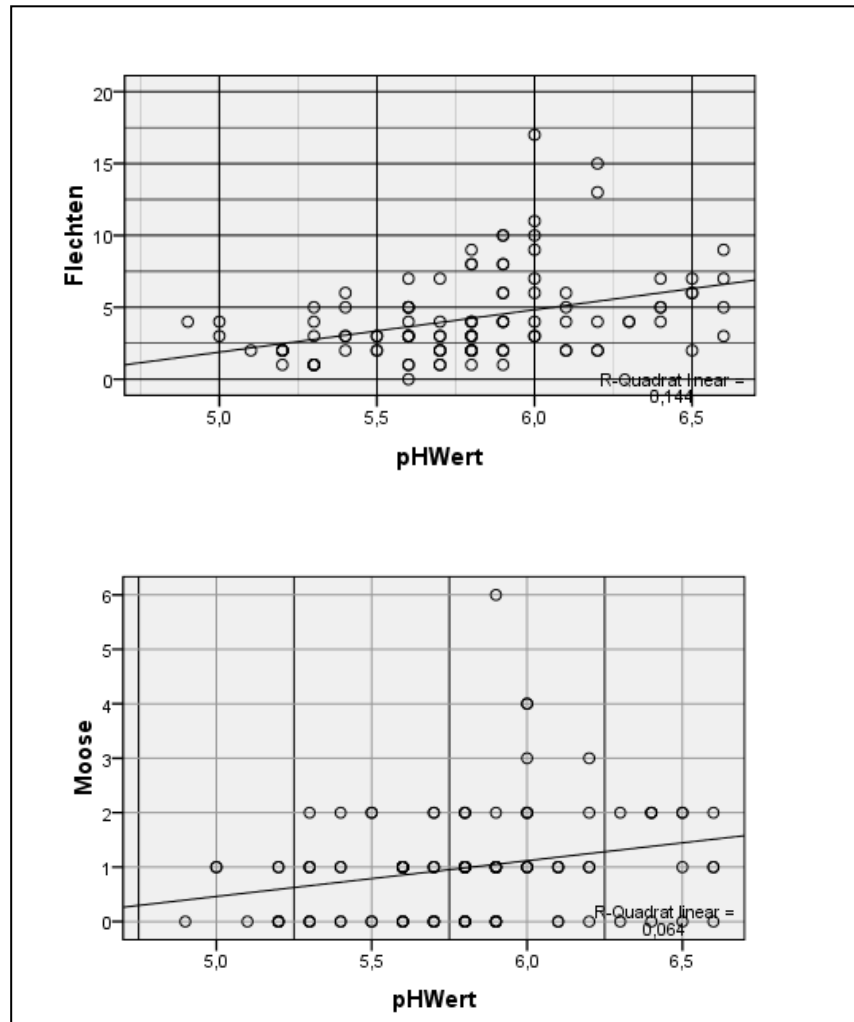


Abbildung 7: Streuungsdiagramm und Regressionsgrade der Moos- bzw. Flechtenartenanzahl in Abhängigkeit vom Borken pH

4.1.2 Inklination

Die untersuchten Trägerbäume weisen eine nur geringe Inklination auf. 83% aller Bäume besaßen eine Neigung zwischen 85° und 90°. Die restlichen 17% wiesen eine Inklination zwischen 84° und 80° auf. Die durchschnittliche Stamminklination liegt bei 86°.

Die Korrelationsanalyse nach Spearman ergibt eine positive Korrelation zwischen Neigungswinkel des Baumes und Moos- bzw. Flechtenzahl (Tab.6). Mit abnehmender Inklination steigt die Anzahl der Moos- und Flechtenarten am Baum.

Tabelle 6: Korrelationsanalyse nach Spearman zwischen Stamminklination und Artenzahl der Moose und Flechten

Inklination (n= 149)	r_s
Anzahl Moose	0,325*
Anzahl Flechten	0,175**

*Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant

**Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

Für jeden kartierten Baum wurde zudem die Borkentextur festgehalten. 72% besaßen eine raue Borke, 18% eine glatte und 10% eine leicht rissige Borke.

4.1.3 Stammumfang

In die Kartierung gingen nur Trägerbäume ein, die einen Stammumfang von mindestens 50 cm hatten. Der geringste Stammumfang mit 51 cm wurde bei einem Baum der Art *Fraxinus americana* gemessen und der größte Stammumfang mit 350 cm bei *Pinus caribaea*. Der mittlere Stammumfang aller kartierten Phorophyten liegt bei 136 cm. Dabei besitzt die Art *Casuarina equisetifolia* mit 170 cm den höchsten mittleren Stammumfang aller Bäume und *Tabebuia rosea* den kleinsten mittleren Stammumfang mit 88 cm.

Für die zwei häufigsten Baumarten *Fraxinus americana* und *Tabebuia rosea* wurden Korrelationsanalysen zwischen der Artenzahl der Moose bzw. Flechten und dem gemessenen Stammumfang durchgeführt (Tab. 7). Bei *Tabebuia rosea* lässt sich eine signifikante Korrelation zwischen der Anzahl der Flechten und dem Stammumfang erkennen. Je größer der Umfang des Stammes ist, desto höher ist die Anzahl der dort vorzufindenden Flechtenarten. Die Anzahl der Moose zeigt bei *Tabebuia rosea* jedoch keinen Zusammenhang mit dem Stammumfang. Für *Fraxinus americana* kann keine signifikante Korrelation zwischen Umfang des Stammes und der Artenanzahl von Flechten oder Moosen festgestellt werden.

Tabelle 7: Korrelationsanalyse nach Spearman zwischen Stammumfang und Artenzahl der Moose und Flechten

Korrelation nach Spearman	Stammumfang <i>Fraxinus americana</i> (n= 55) r_s	Stammumfang <i>Tabebuia rosea</i> (n= 17) r_s
Anzahl Moose	0,165	0,464
Anzahl Flechten	-0,144	0,532*

*Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant

Die verschiedenen Kartierungsorte zeigen deutliche Unterschiede in den mittleren Stammumfängen der dort untersuchten Bäume. So variiert dieser zwischen 58 cm auf der Plaza El Llano und 242 cm im Parque Los Escritores Merideños. Dieser große Unterschied beruht auf dem Alter der dort angepflanzten Bäume. So sind die Bäume auf der Plaza El Llano noch relativ jung. Im Vergleich dazu sind z.B. die Bäume auf der berühmten Plaza Bolívar viel älter, was sich auch im mittleren Stammumfang von 199 cm zeigt. Der mittlere Stammumfang aller Bäume beträgt 136 cm.

4.1.4 Exposition

Abbildung 8 zeigt die Expositionshäufigkeit des Moos- und Flechtenbewuchs auf den untersuchten Trägerbäumen, und wie zu erkennen, ist der nordexponierte Stammbereich mit 30% der am häufigsten besiedelte, gefolgt von dem westexponierten mit 25%. Dagegen treten die ost-, sowie der nordost- und südost- exponierte Stammbereiche mit jeweils nur 5% bzw. 6% deutlich zurück.

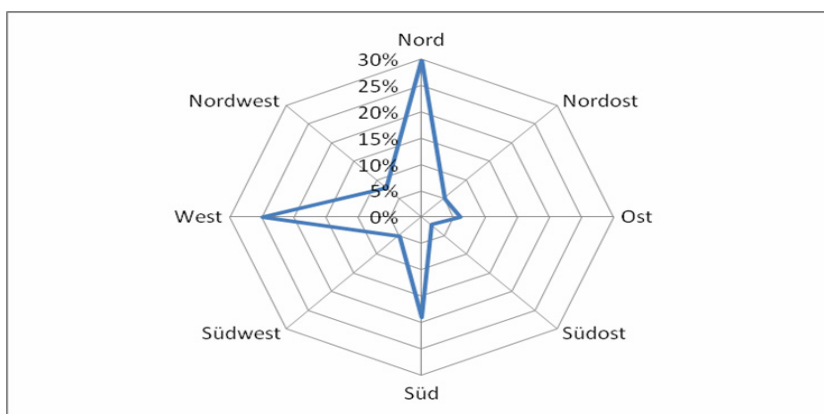


Abbildung 8: Expositionshäufigkeit des Moos- und Flechtenbewuchs auf den untersuchten Trägerbäumen

4.2 Epiphytische Flechtenarten des Untersuchungsgebietes

Nur auf zwei der 149 kartierten Bäumen waren keine epiphytischen Flechten zu finden. Insgesamt wurden 72 verschiedene Flechtenarten in der Stadt Mérida bei der Kartierung nachgewiesen. Flechten, die nicht bis auf Art-Ebene bestimmt werden konnten, wurden zu Artengruppen zusammengefasst.

Artenliste:

<i>Anisomeridium</i> sp.	<i>Mycomicrothelia</i> sp.
<i>Arthonia</i> sp.	<i>Opegrapha</i> sp.
<i>Bacidia</i> sp.	<i>Parmeliella pannosa</i>
<i>Buellia</i> sp.	<i>Parmelinopsis</i> sp.
<i>Bulbothrix fungicola</i>	<i>Parmotrema austrosinense</i>
<i>Calicium hyperelloides</i>	<i>Parmotema reticulatum</i>
<i>Caloplaca</i> spp.	<i>Parmotrema</i> spp.
<i>Candelaria concolor</i>	<i>Parmotrema tinctorum</i>
<i>Canoparmelia</i> spp.	<i>Pertusaria</i> sp.
<i>Cladonia ceratophylla</i>	<i>Phyllopsora</i> sp.
<i>Cladonia subsquamosa</i>	<i>Physcia integrata</i>
<i>Coenogium</i> spp.	<i>Physcia</i> spp.
<i>Dirinaria applanata</i>	<i>Physconia</i> sp.
<i>Dirinaria picta</i>	<i>Porina</i> sp.
<i>Dirinaria</i> spp.	<i>Pseudocyphellaria aurata</i>
<i>Glyphis cicatritosa</i>	<i>Punctelia</i> sp.
<i>Graphis</i> spp.	<i>Pyrenula</i> spp.
<i>Hemithecium</i> sp.	<i>Pyxine cocoas</i>
<i>Herpothallon rubrocinctum</i>	<i>Pyxine petricola</i>
<i>Herpothallon</i> spp.	<i>Pyxine</i> spp.
<i>Heterodermia leucomelaena</i>	<i>Ramalina</i> spp.
<i>Heterodermia</i> spp.	<i>Rimelia</i> sp.
<i>Hyperphyscia adglutinata</i>	<i>Sarcographa</i> sp.
<i>Hyperphyscia minor</i>	<i>Sticta fuliginosa</i>
<i>Hyperphyscia</i> spp.	<i>Sticta</i> spp.
<i>Lecanora</i> spp.	<i>Teloschistes flavicans</i>
<i>Lepraria</i> sp.	<i>Thelotrema</i> sp.
<i>Lepraria usnica</i>	<i>Trypethelium</i> sp.
<i>Leptogium coralloideum</i>	<i>Tylophoron</i> sp.
<i>Leptogium</i> spp.	<i>Usnea</i> spp.
<i>Malcomiella</i> sp.	

Wie Abbildung 9 zeigt ist die Gattung *Parmotrema* mit 21% in der Stadt Mérida am häufigsten vertreten. Es folgen die Gattungen *Pyxine* (16%), *Candelaria* (12%), *Canoparmelia* (12%) sowie *Leptogium* (11%).

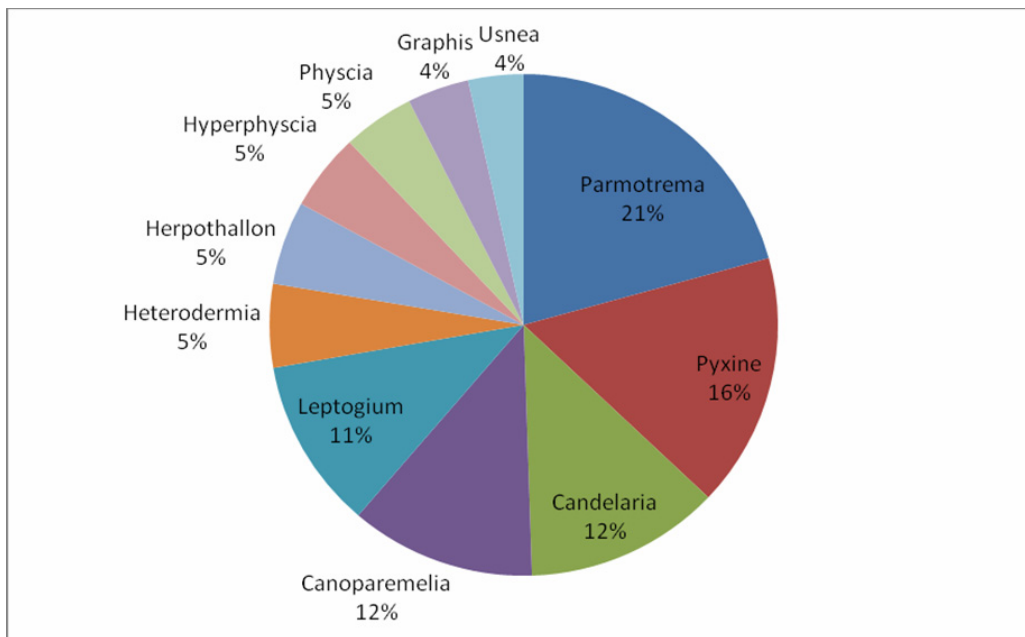


Abbildung 9: Prozentualer Anteil der häufigsten Flechtengattungen

Die am häufigsten kartierte Art bei der Untersuchung ist *Candelaria concolor*. Sie kommt in 82% aller Kartierungsorte vor und auf 40% aller untersuchten Bäumen (Tab. 6). Es folgen die Artengruppe *Canoparmelia* spp., *Pyxine cocoes*, *Parmotrema* sp.2, *Leptogium coralloideum* und *Parmotrema* sp.1. Das Vorkommen dieser Blattflechten ist im Untersuchungsgebiet nahezu flächendeckend, d.h., sie kommen sowohl am Stadtrand, in eher ländlichen Stadtteilen sowie auch in der Innenstadt und an stark befahrenen Straßen vor. Die Verbreitungsgebiete der eher selten gefundenen Arten befinden sich zumeist in den äußeren Stadtteilen mit wenig Verkehrsbelastung.

Obwohl *Candelaria concolor* die am häufigsten kartierte Art ist, hat sie nicht die höchste Frequenzsumme. Diese besitzt mit einer Summe von 347 die Flechtenart *Pyxine cocoes* (Tab. 8). 24% aller in die Auswertung eingehenden Flechtenarten besaßen eine sehr niedrige Frequenzsumme zwischen 1 und 3 und gehen deswegen kaum in die Berechnung der Luftgütwerte mit ein.

Tabelle 8: Prozentuale Häufigkeit und Frequenzsumme der häufigsten Flechtenarten

Flechtenart	Häufigkeit (%) in Kartierungsorten	Häufigkeit (%) an den Bäumen	Frequenz-Summe
<i>Candelaria concolor</i>	82	40	294
<i>Canoparmelia spp.</i>	67	38	243
<i>Pyxine cocoes</i>	76	36	347
<i>Parmotrema sp.2</i>	70	28	153
<i>Leptogium coralloideum</i>	45	22	117
<i>Parmotrema sp.1</i>	67	22	168
<i>Graphis sp.1</i>	30	11	35
<i>Hyperphyscia spp.</i>	40	11	89
<i>Usnea spp.</i>	33	11	37
<i>Pyrenula spp.</i>	27	10	29
<i>Pyxine spp.</i>	24	10	38
<i>Herpothallon rubrocinctum</i>	21	9	33
<i>Heterodermia sp.2</i>	33	9	44
<i>Teloschistes flavicans</i>	15	9	14
<i>Herpothallon spp.</i>	15	8	16
<i>Pyxine petricola</i>	21	7	37
<i>Lecanora spp.</i>	24	7	21

Der Wuchsformtyp der Blattflechte ist mit 58% Anteil an allen kartierten Flechtenarten, der am häufigsten vorkommende. Die Krustenflechten machen 35% aus und die Strauchflechten nur 7%. Alle drei Wuchsformtypen sind im gesamten Stadtgebiet zu finden, wobei sich die Strauchflechten, bis auf die Gattung *Usnea*, eher auf den Stadtrand konzentrieren.

Die durchschnittliche Flechtenartenanzahl auf den untersuchten Bäumen variiert in den unterschiedlichen Kartierungsorten zwischen 0,7 auf der, in der Innenstadt gelegenen, Plaza El Llano und durchschnittlich 11 Arten pro Baum im botanischen Garten. Die höchste kartierte Artenzahl an einem Baum betrug 17 Flechten im Park Los Poetas. In den Kartierungsorten, die sich in der Nähe von stark befahrenen Straßen befinden, kommen im Durchschnitt weniger als 3 Flechtenarten pro Baum vor. Dagegen weisen etwas abseits vom Straßenverkehr gelegene Parkanlagen schon 5- 10 Arten pro Baum auf.

4.3 Epiphytische Moosarten des Untersuchungsgebietes

Insgesamt wurden 26 unterschiedliche epiphytische Moosarten gefunden. Davon gehören 11 Arten zu den Lebermoosen und die restlichen 15 zu den Laubmoosen.

Artenliste:**Laubmoose**

Acroporium estrellae
Acroporium sp.
Campylopus arctocarpus
Entodontopsis leucostega
Fabronia ciliaris
Holomitrium sp.
Leucobryum sp.
Lindigia sp.
Orthodontium pellucens
Pillotrichella flexilis
Porotrichum sp.
Regmatodon orthostegius
Schlotheimia torquata
Syrrhopodon tortilis
Tortula pagorum

Lebermoose

Bazzania sp.
Cheilolejeunea sp.
Cyclolejeunaceae sp.
Frullania riojaneirensis
Frullania sub. Chonanthelia
Lejeunea flava
Leucolejeunea sp.
Metzgeria sp.
Plagiochila sp.
Porella sp.
Radula sp.

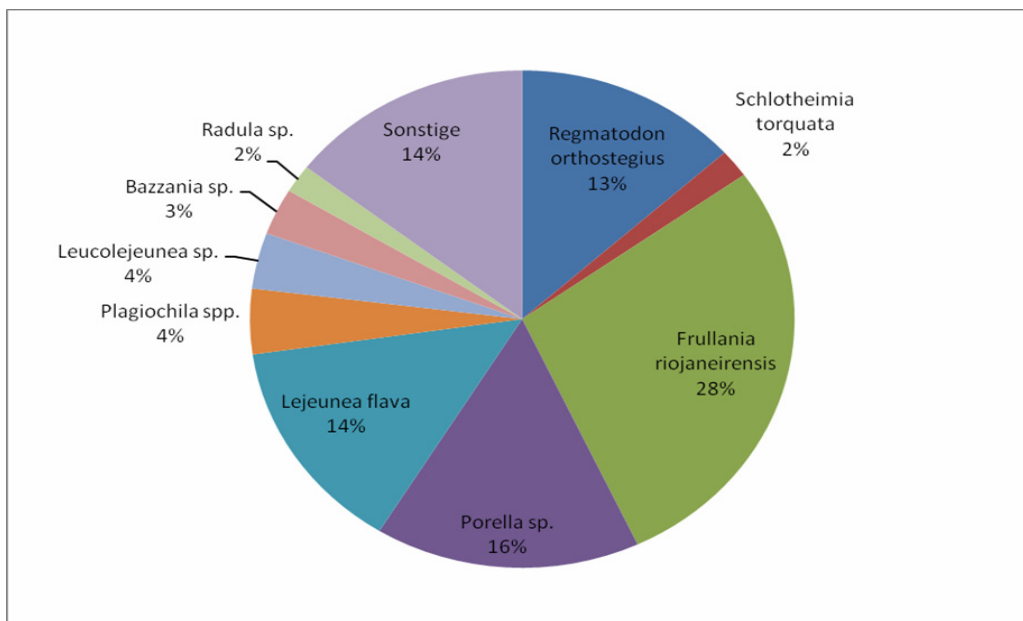


Abbildung 10: Prozentualer Anteil der häufigsten Moosarten

Wie Abbildung 10 zeigt, ist das Lebermoos *Frullania riojaneirensis* mit 28% Anteil, die am häufigsten kartierte Art in der Stadt Mérida. Gefolgt von den Lebermoosen *Porella sp.* und *Lejeunea flava*. Das häufigste Laubmoos ist die Art *Regmatodon orthostegius* mit 13% Anteil an allen gefundenen Arten. Einen gesamten Anteil von 14% machen Arten aus, die jeweils bei der Kartierung nur ein bis zweimal gefunden wurden.

Tabelle 9: Prozentuale Häufigkeit und Frequenzsumme der häufigsten Moosarten

Moosart	Häufigkeit (%) in Kartierungsorten	Häufigkeit (%) an den Bäumen	Frequenz-Summe
<i>Frullania riojaneirensis</i>	51,52	27,88	108
<i>Porella sp.</i>	39,39	15,76	67
<i>Lejeunea flava</i>	33,33	13,94	91
<i>Regmatodon orthostegius</i>	39,39	13,33	53
<i>Plagiochila spp.</i>	12,12	4,24	27
<i>Leucolejeunea sp.</i>	12,12	3,64	32
<i>Bazzania sp.</i>	3,03	3,03	29
<i>Radula sp.</i>	3,03	1,82	10
<i>Schlotheimia toquata</i>	9,09	1,82	9
<i>Acroporium estrellae</i>	6,06	1,21	2
<i>Acroporium sp.</i>	6,06	1,21	4
<i>Fabronia ciliaris</i>	3,03	1,21	2
<i>Leucobryum sp.</i>	6,06	1,21	6
<i>Lindigia sp.</i>	3,03	1,21	4
<i>Pilotrichella flexilis</i>	3,03	1,21	7
<i>Tortula pagorum</i>	6,06	1,21	4

Die am häufigsten gefundene Moosart *Frullania riojaneirensis* kommt nur an rund der Hälfte (51,52%) aller Kartierungsorte und an weniger als ein Drittel der untersuchten Bäumen (27,88%) vor (Tab.9). Mit 108 besitzt sie die höchste Frequenzsumme aller Moosarten. Gefolgt von *Lejeunea flava* mit einer Frequenzsumme von 91. *Porella sp.* besitzt eine niedrigere Frequenzsumme als *Lejeunea flava*, ist aber an mehr Bäumen und Kartierungsorten vorzufinden. Das Laubmoos *Regmatodon orthostegius* hat die höchste Frequenzsumme aller kartierten Laubmoose und kommt an 13% aller untersuchten Bäume und an knapp 49% aller Kartierungsorte vor.

Die durchschnittliche Anzahl epiphytischer Moose pro Baum liegt in Mérida sehr niedrig. Insgesamt vier Kartierungsorte (Plaza El Llano, Plaza Bolivar- La Parroquia, Parque Beethoven und Parque Ciudad de Los Niños) weisen keinen Bewuchs mit epiphytischen Moosen auf. Dies sind alles Orte, die sich in der Nähe stark befahrener Straßen befinden. Ansonsten schwankt die durchschnittliche Moosartenanzahl pro Baum in den einzelnen Kartierungsorten zwischen 0,12 auf der Avenida Las Americas und dem Höchstwert von 3,8 im Botanischen Garten der Stadt. Somit liegt die mittlere Anzahl epiphytischer Moosarten an allen Bäumen zusammen nur im Durchschnitt bei einer Art pro Baum. Kartierungsorte mit im Durchschnitt mehr als einer Art pro Baum befinden sich abseits von stark befahrenen Straßen, wie z.B. auf den Außenanlage der forstwirtschaftlichen Fakultät (mit 2 Arten pro Baum), im eher dörflichen Stadtteil La Pedregosa (mit 2,75 Arten pro Baum) und dem außerhalb der Stadt gelegen Monte Zerpa (mit 3,2 Arten pro Baum).

4.4 Artendiversität

Abbildung 11 zeigt die Anzahl epiphytischer Moose und Flechten in den unterschiedlichen Kartierungsorten. Die niedrigste Artenanzahl mit nur 2 Arten am Kartierungsort ist auf der Plaza El Llano in der Innenstadt zu finden. Die höchste Anzahl mit 44 unterschiedlichen Arten weist der botanische Garten im Norden der Stadt auf. Auf der Abbildung ist zu erkennen, dass sich die Orte mit höherer Artendiversität an den Stadträndern und im Norden der Stadt befinden. Niedrige Diversität ist im Zentrum der Stadt sowie an stark befahrenen Straßen zu verzeichnen.

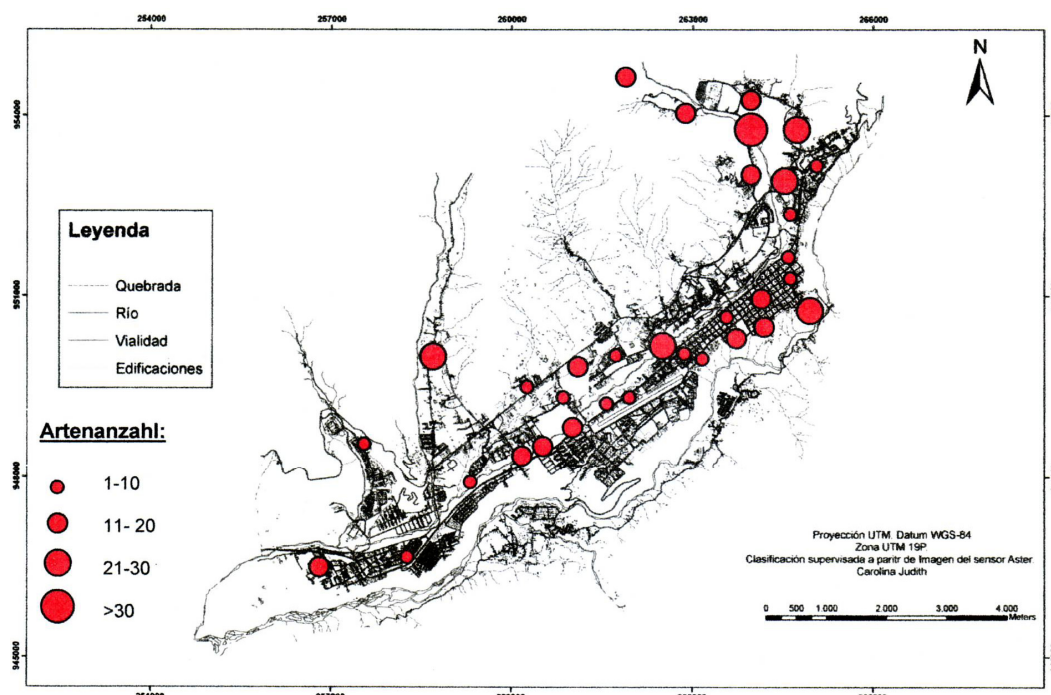


Abbildung 11: Anzahl der Moos- und Flechtenarten pro Kartierungsort

In 32 Kartierungsorten liegt die Anzahl der kartierten Flechtenarten deutlich höher als die der Moosarten. Nur im Bereich des Monte Zepa im äußersten Norden der Stadt sind mehr Moosarten als Flechtenarten zu finden.

4.4.1 Korrelation mit der Verkehrsbelastung

Die einzelnen Kartierungsorte wurden mit Hilfe der erstellten Skala für das Verkehrsaufkommen (Tab. 1, Kapitel 3.3.1) wie folgt aufgeteilt:

Stufe 1 (sehr geringes Verkehrsaufkommen):

- Monte Zerpa

Stufe 2 (geringes Verkehrsaufkommen):

- Lecho del Rio Albarregas
- Parque La Isla
- Botanischer Garten
- Parque Los Poetas
- La Pedregosa
- Forestal

Stufe 3 (geringes bis hohes Verkehrsaufkommen):

- Hinterer Teil des Botanisches Gartens
- Zumba
- Plaza Las Heroínas
- Avenida Carnevali
- Santa Rosa
- Parque Beethoven

Stufe 4 (hohes Verkehrsaufkommen):

- Santa Barbara
- Plaza Bolívar
- Plaza Milla
- Parque Glorias Patrias
- Parque Los Conquistadores
- Parque La Columna
- Plaza Bolívar, La Parroquia
- Los Curos
- Parque Ciudad de los niños

Stufe 5 (sehr hohes Verkehrsaufkommen):

- Avenida Las Americas
- Plaza Julio Salas
- Plaza El Llano
- Avenida Andres Bello
- Parque Andres Bello
- Parque Las Tres Méridas
- Parque El Ejercito
- Parque Los Escritores Méridenses
- Avenida Urdaneta

- Avenida Los Proceres
- Avenida Universidad

Mit Hilfe einer Korrelationsanalyse nach Spearman wurde der Zusammenhang zwischen dem Verkehrsaufkommen und der Anzahl der epiphytischen Moos- bzw. der Flechtenarten überprüft. Das Ergebnis der Analyse zeigt jeweils signifikante negative Korrelationen in beiden Fällen (Tab. 10).

Tabelle 10: Korrelationsanalyse nach Spearman zwischen dem Verkehrsaufkommen und der Artenanzahl der Moose und Flechten

Verkehrsaufkommen	r_s
Anzahl Flechtenarten	-0,553**
Anzahl Moosarten	-0,617**

**Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2- seitig) signifikant

Abbildung 12 zeigt, dass sowohl die Anzahl der Moosarten als auch die Anzahl der Flechtenarten an einem Kartierungsort mit zunehmender Höhe des Straßenverkehrs sinkt.

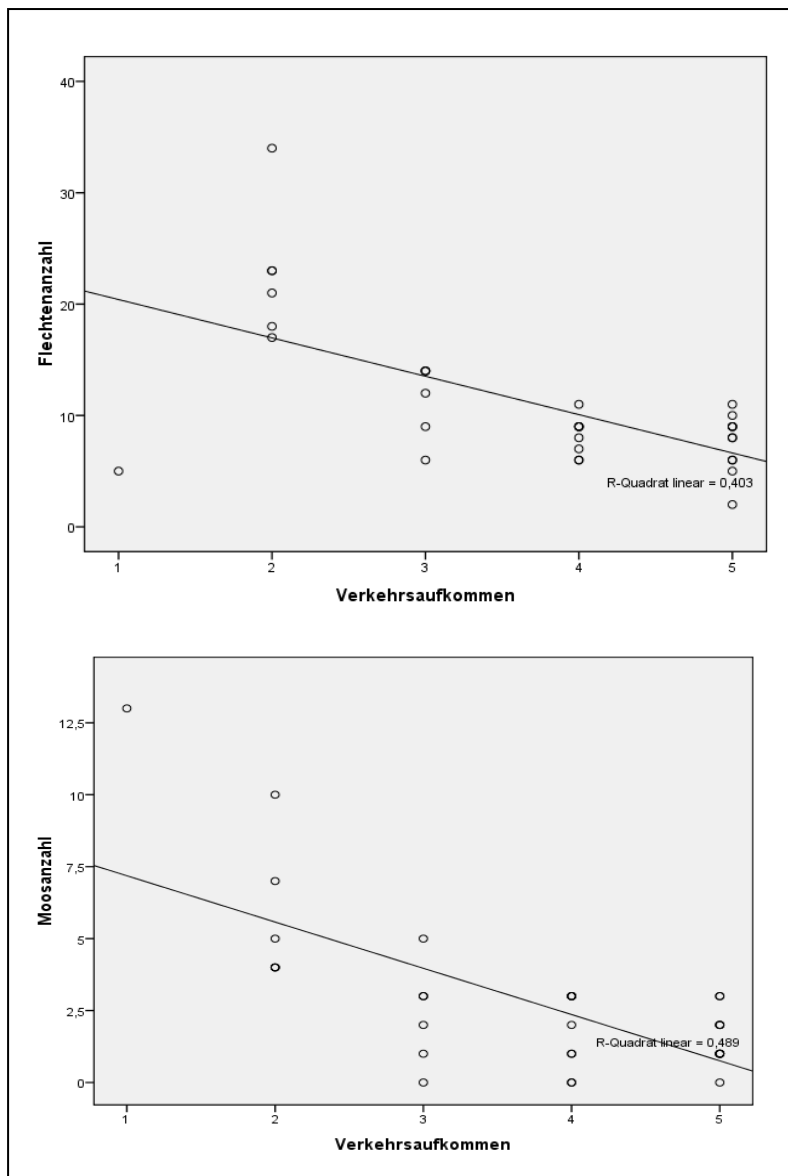


Abbildung 12: Streuungsdiagramm und Regressionsgrade der Moos- bzw. Flechtenartenanzahl in Abhängigkeit von dem Verkehrsaufkommen

4.5 Ergebnisse der Kartierung nach VDI- Richtlinie 3799, Blatt 1 (1995)

Für jeden Kartierungsort wurde, wie in Kapitel 3.6 beschrieben, ein Luftgütwert ermittelt.

4.5.1 Lufthygienische Situation, ermittelt aufgrund des Flechtenvorkommens

Die für die verschiedenen Kartierungsorte ermittelten Luftgütwerte liegen im Bereich zwischen 0,6 und 33,2. Der Mittelwert liegt bei 15,5.

Die mittlere Standardabweichung des Projektes von $s_p = 7,6$ ergab eine Klassenbreite der Luftgüteklassen von 9,95. Zur leichteren Darstellung wurde die Breite der Luftgüteklassen

auf 10 aufgerundet. Insgesamt konnten somit 4 Klassen unterschiedlicher Luftgüte aufgestellt werden (Abb.13).

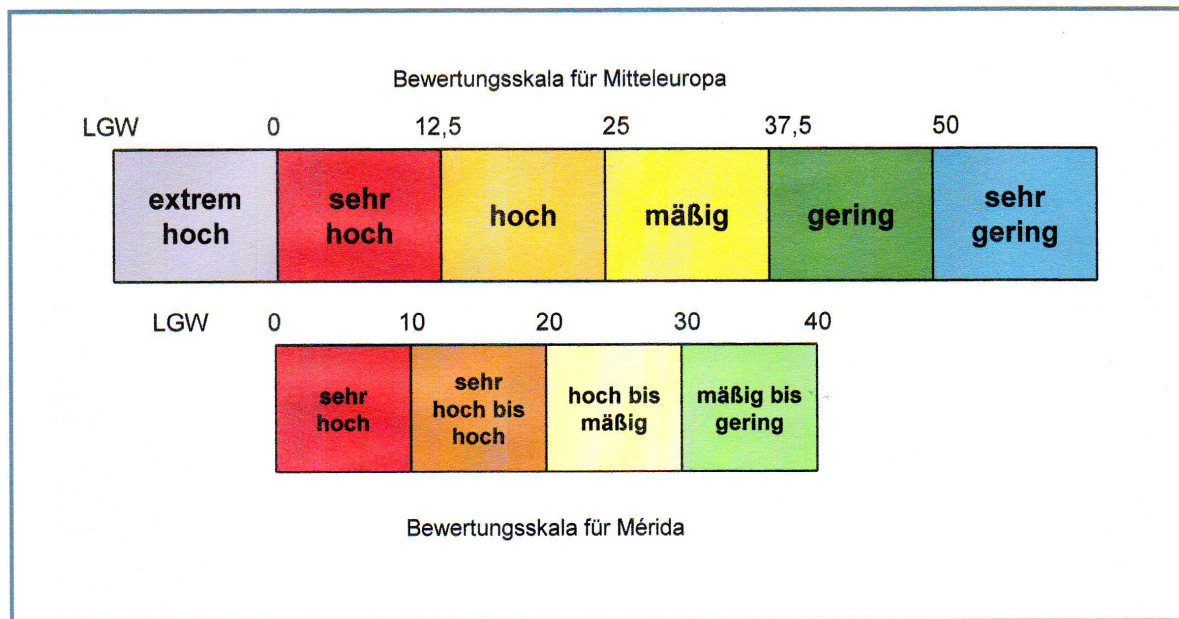


Abbildung 13: Einordnung der (anhand des Flechtenvorkommens ermittelten) Luftgüteklassen für Mérida in die mitteleuropäische Bewertungsskala

In der Stadt Mérida reicht die ermittelte lufthygienische Belastung von „sehr hoch“ bis „mäßig bis gering“. Knapp 70% der untersuchten Kartierungsorte besitzen eine sehr hohe bzw. eine sehr hohe bis hohe lufthygienische Belastung (Abb. 14). Nur zwei (6%), der gesamten kartierten Orte in Mérida, zeigen eine Belastung der Luftqualität, die als mäßig definiert werden kann.

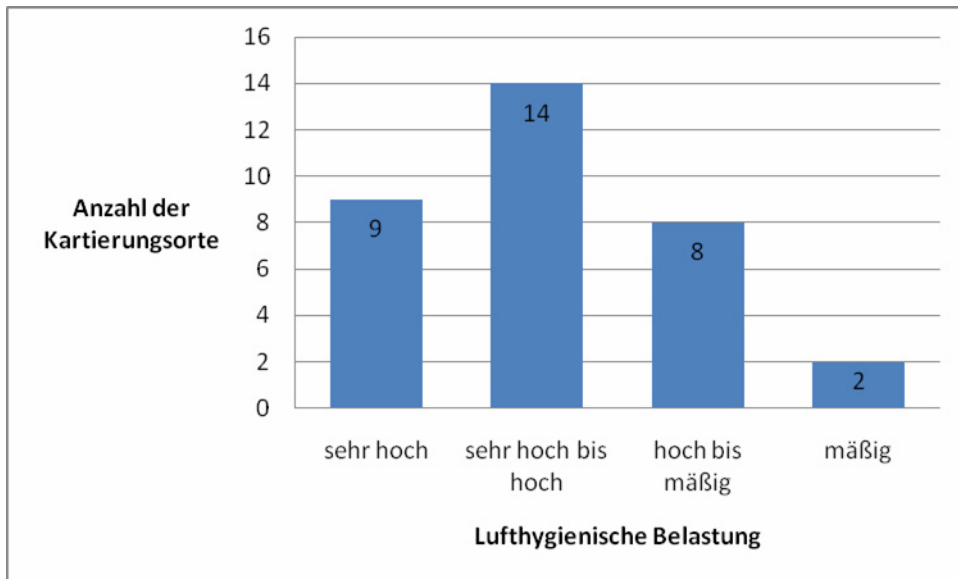


Abbildung 14: Häufigkeit der Luftgüteklassen im Untersuchungsgebiet (ermittelt anhand des Flechtenvorkommens)

Eine sehr hohe lufthygienische Belastung in Mérida ist an insgesamt 9 verschiedenen Kartierungsorten anzutreffen. Die höchste Belastung mit dem niedrigsten Luftgütewert von 0,6 ist dabei in der Innenstadt auf der Plaza El Llano vorzufinden. Auch an den stark befahrenen Straßen Avenida Urdaneta und Avenida Los Proceres sowie in dem im Süden der Stadt gelegenen Stadtteil Los Curos herrscht eine sehr hohe lufthygienische Belastung. Die beste Luftqualität mit einer mäßigen Belastung liegt im Vergleich dazu im botanischen Garten der Stadt und im Park Los Poetas vor.

Abbildung 15 zeigt die Verteilung der verschiedenen Luftgüteklassen, die anhand des Flechtenvorkommens für die Stadt Mérida ermittelt wurde. Eine Zonierung der Luftqualität, die sich von der Innenstadt Richtung Stadtrand verbessert, ist nicht zu erkennen. Jedoch zeigt sich eine gewisse Tendenz der Luftverbesserung Richtung Norden der Stadt. Vor allem dort befinden sich Orte mit hoher bis mäßiger oder mäßiger Belastung.

Der nördlichste Punkt der Kartierung (Monte Zerpa) wurde anhand der gesammelten Daten als sehr hoch belastet eingestuft. Da dort jedoch kein bzw. nur sehr geringer Verkehr herrscht, spielen hier andere Faktoren eine Rolle, wie z.B. die Höhenlage und mikroklimatische Begebenheiten, die das Ergebnis beeinflussen.

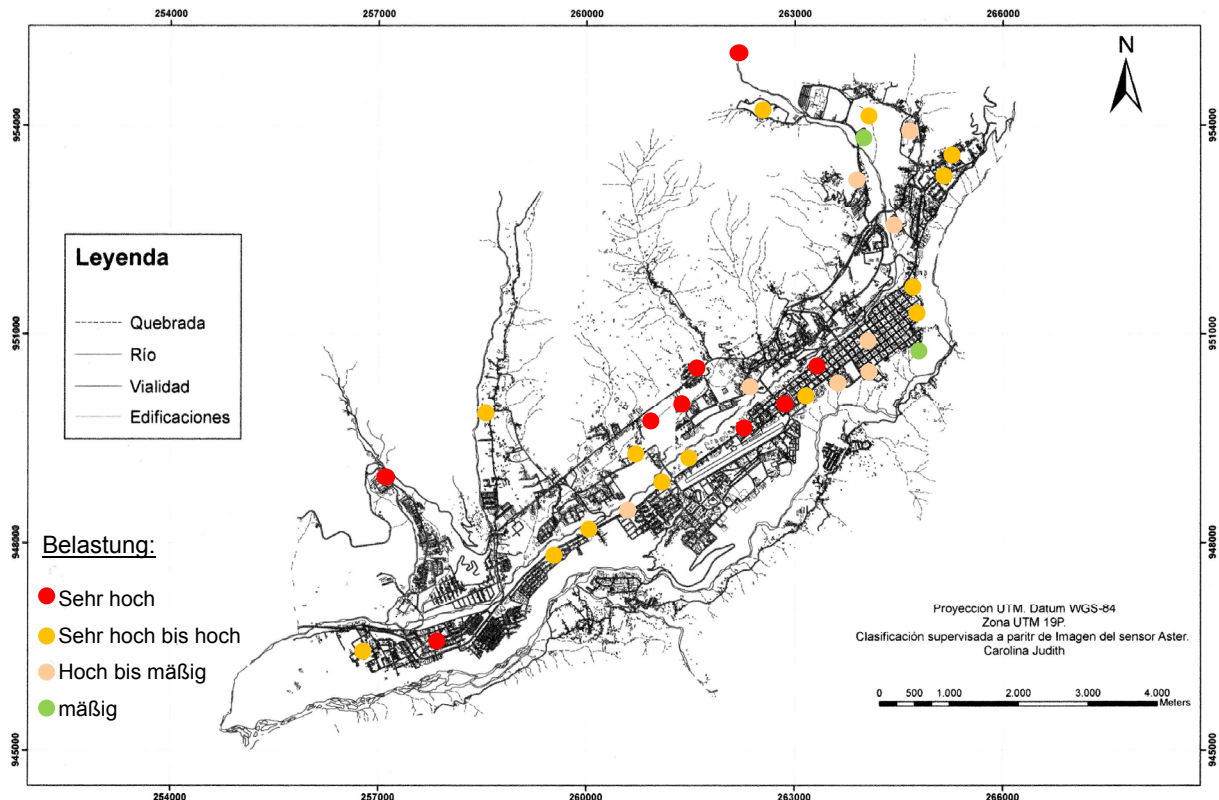


Abbildung 15: Lufthygienische Belastung (ermittelt anhand des Flechtenvorkommens)

Abbildung 16 zeigt den Zusammenhang zwischen den ermittelten Luftgütwerten für die verschiedenen Kartierungsorte und den mittleren Frequenzsummen der häufigsten Flechtenarten. Die meisten Arten zeigen dabei eine positive Korrelation mit den errechneten Luftgütwerten, d.h., je höher der Luftgütwert eines Ortes ist, desto höher ist die Frequenz dieser Arten dort. Die Flechten *Graphis sp.1*, *Leptogium coralloideum*, *Usnea spp.* und *Canoparmelia spp.* besitzen höhere Korrelationskoeffizienten als die restlichen Arten und sind somit am häufigsten an Orten zu finden wo hohe Luftgütwerte erreicht werden.

Nur zwei der hier untersuchten Arten weisen einen negativen Korrelationskoeffizienten auf (*Hyperphyscia spp.* und *Pyxine coccinea*). Dies bedeutet, dass diese Flechten dort am ehesten wachsen, wo die Luftgütwerte und somit die Frequenzen der anderen Arten niedrig sind.

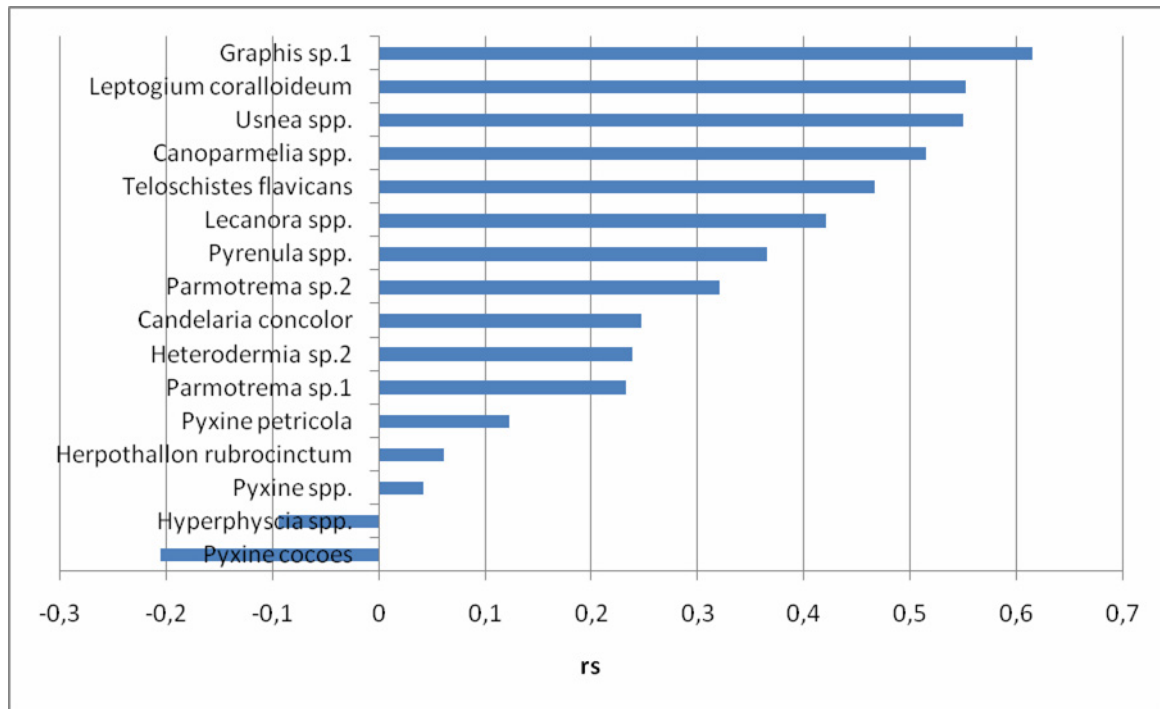


Abbildung 16: Zusammenhang zwischen den Luftgütwerten und den Frequenzen der häufigsten Flechtenarten; ermittelt mit dem Spearmanschen Korrelationskoeffizienten r_s

4.5.2 Lufthygienische Situation, ermittelt aufgrund des Moosvorkommens

Die ermittelten Luftgütwerte anhand des Moosvorkommens liegen im Bereich zwischen 0 und 15,4 und sind somit deutlich niedriger als die Luftgütwerte, die mit Hilfe der epiphytischen Flechten ermittelt wurden. Der Durchschnitt aller Luftgütwerte ist 3,2.

Die mittlere Standardabweichung von $s_p = 3,26$ ergibt eine Klassenbreite der Luftgüteklassen von 4,27. Insgesamt können somit vier verschiedene Luftgüteklassen unterschieden werden (Abb. 17). Diese reichen von einer sehr hohen bis zu einer hohen Luftbelastung.

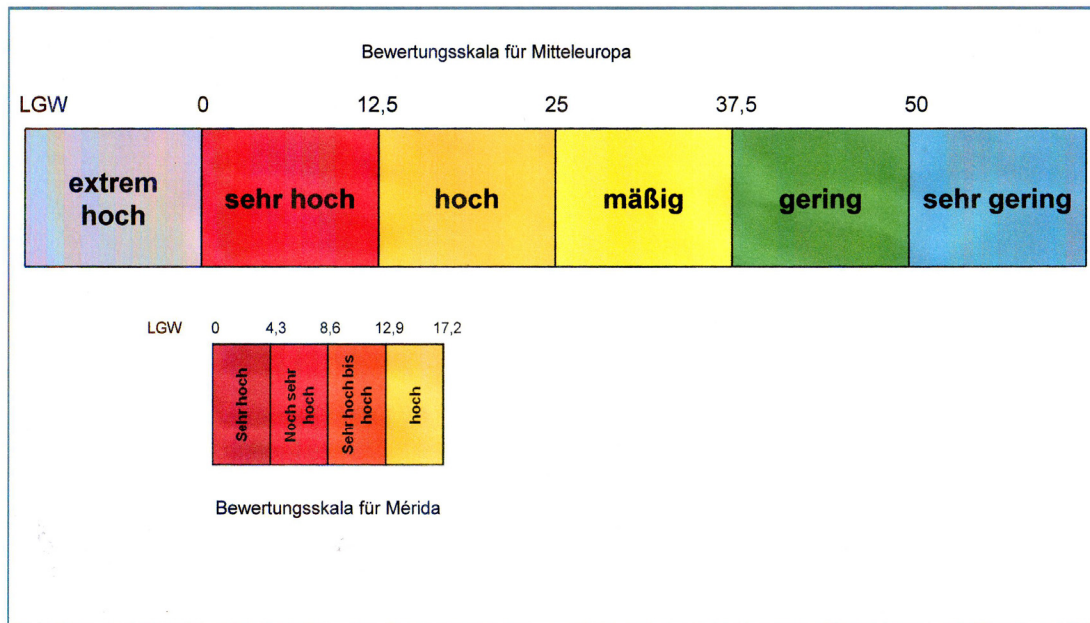


Abbildung 17: Einordnung der (anhand des Moosvorkommens ermittelten) Luftgüteklassen für Mérida in die europäische Bewertungsskala

Anders als bei den Ergebnissen der Flechtenkartierung zeigt die Auswertung der Luftgüteklassen durch die epiphytischen Moose eine eher einseitige Belastung der Luft in der Stadt Mérida. Da in insgesamt vier Kartierungsorten auf den untersuchten Bäumen kein epiphytisches Moosvorkommen zu verzeichnen war, ergab sich für diese Orte jeweils ein Luftgütewert von 0. Knapp 95% aller Kartierungsorte zeigen eine lufthygienische Belastung auf, die als „sehr hoch“ bzw. „noch sehr hoch“ bezeichnet werden kann (Abb.18). Nur zwei der Kartierungsorte (6%) haben eine sehr hohe bis hohe bzw. hohe lufthygienische Belastung vorzuweisen. Die beste Luftqualität ist mit einem Luftgütewert von 15,4 auf dem Monte Zerpa vorzufinden. Gefolgt von dem botanischen Garten mit einem LGW von 10,8.

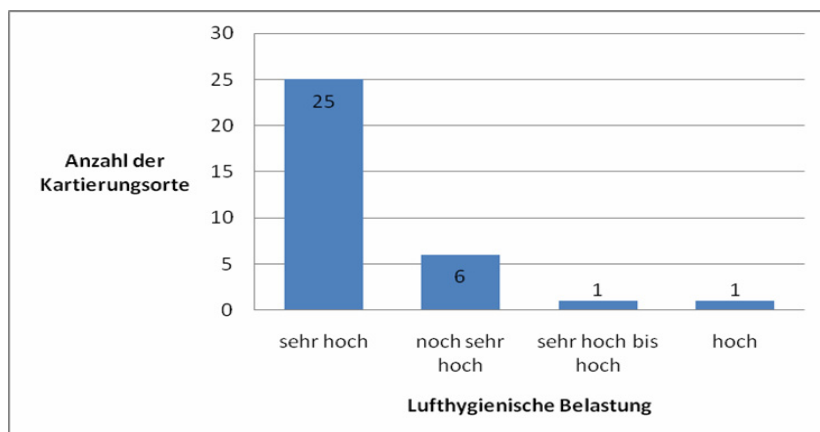


Abbildung 18: Häufigkeit der Luftgüteklassen im Untersuchungsgebiet (ermittelt anhand des Moosvorkommens)

Die Verteilung der ermittelten Luftgüteklassen zeigt Abbildung 19. Auch hier ist zu erkennen (ähnlich wie in der Flechtenauswertung), dass sich die Orte mit der besseren Luftqualität im Norden der Stadt befinden. Anders als bei der Auswertung mit Hilfe der Flechten ist hier jedoch, wie zu erwarten, der Monte Zerpa, als der Ort mit der geringsten Luftbelastung ermittelt worden.

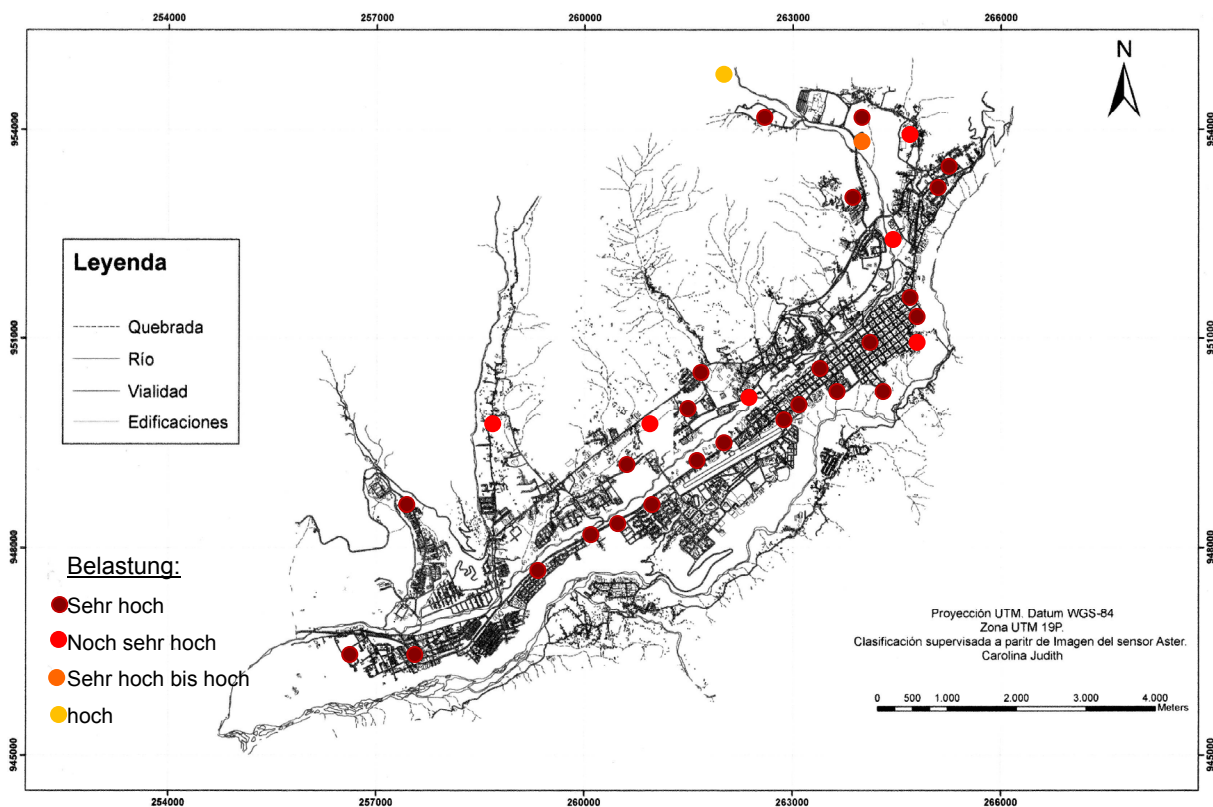


Abbildung 19: Lufthygienische Belastung (ermittelt anhand des Moosvorkommens)

Für die vier am häufigsten kartierten Moosarten wurden der Zusammenhang zwischen den errechneten Luftgütewerten und den mittleren Frequenzen untersucht (Abb. 20). Alle untersuchten Arten weisen positive Korrelationskoeffizienten auf. Den höchsten Korrelationskoeffizienten erreicht das Lebermoos *Lejeunea flava*.

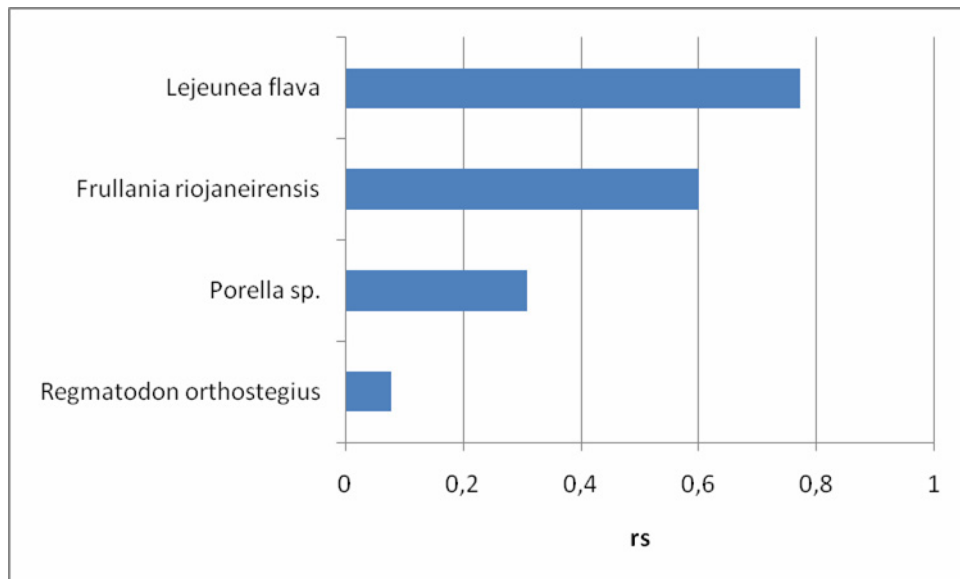


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen den Luftgütewerten und den Frequenzen der häufigsten Moosarten; ermittelt mit dem Spearmanschen Korrelationskoeffizient r_s

4.5.3 Lufthygienische Situation, ermittelt aufgrund des Epiphytenvorkommens (Moose und Flechten zusammen)

In der folgenden Auswertung werden die epiphytischen Moose und Flechten nicht mehr getrennt voneinander behandelt wie bisher, sondern gehen zusammen in die Berechnung der Luftgüte ein.

Die Luftgütewerte befinden sich im Bereich zwischen 0,6 und 44. Der durchschnittliche Luftgütewert liegt bei 18,7.

Mit einer mittleren Standardabweichung von $s_p = 8,73$ wurde eine Klassenbreite der Luftgüteklassen von 11,42 errechnet. Angelegt an die Bewertungsskala für Mitteleuropa ergeben sich 4 unterschiedliche Luftgüteklassen von „sehr hoch“ bis „mäßig bis gering“ (Abb. 21).

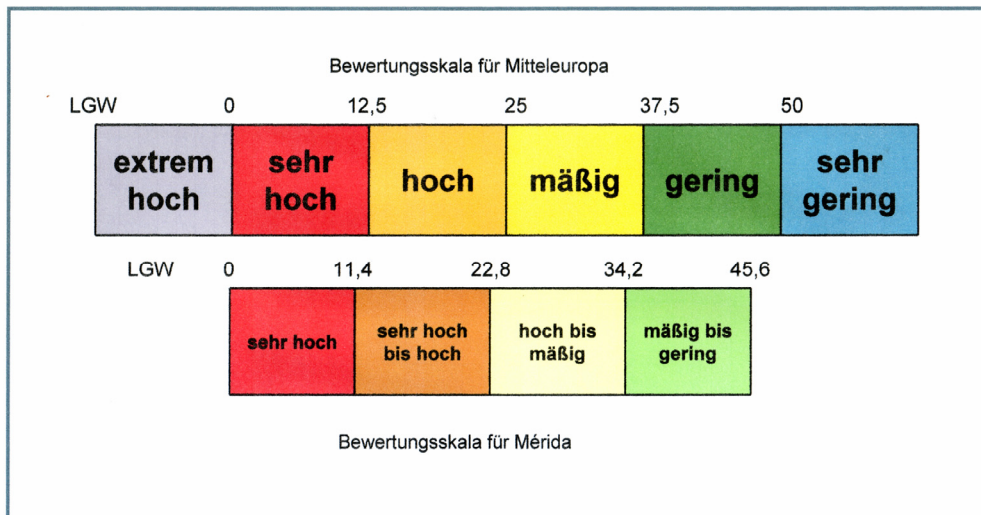


Abbildung 21: Einordnung der (anhand des Moos- und Flechtenvorkommens ermittelten) Luftgüteklassen für Mérida in die mitteleuropäische Bewertungsskala

Die gemeinsame Auswertung mit allen epiphytischen Moosen und Flechten ergibt in knapp 76% aller Kartierungsorte eine sehr hohe bzw. sehr hohe bis hohe lufthygienische Belastung (Abb. 22). Wie auch schon bei der Flechtenauswertung sind die zwei Orte mit der geringsten Belastung der botanische Garten und der Park Los Poetas.

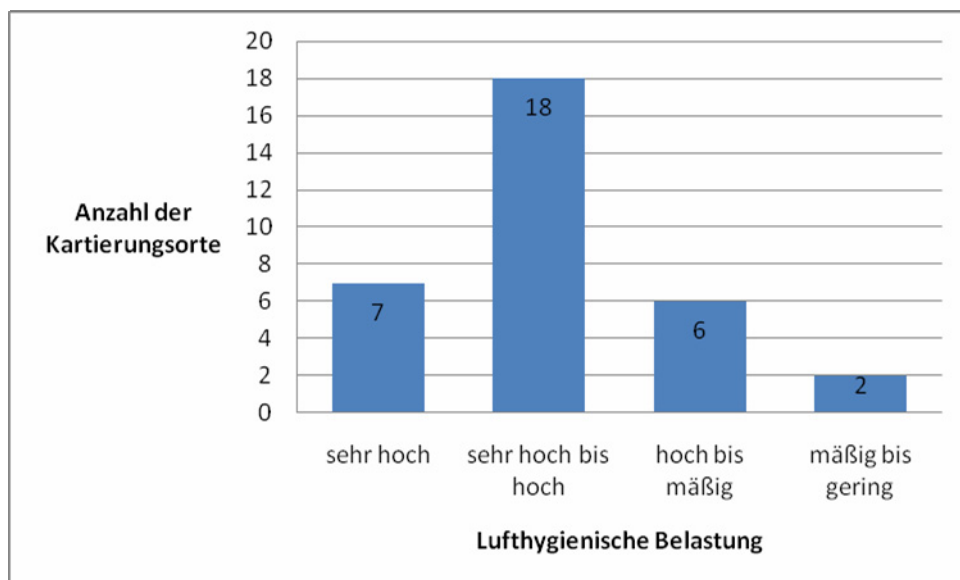


Abbildung 22: Häufigkeit der Luftgüteklassen im Untersuchungsgebiet (ermittelt anhand des Moos- und Flechtenvorkommens)

Abbildung 23 zeigt die Verteilung der verschiedenen Luftgüteklassen in der Stadt Mérida. Wie auch bei den zwei vorherigen Auswertungen sind vor allem im nördlichen Teil der Stadt, die Orte mit der besten lufthygienischen Situation zu finden.

Der Kartierungsort Monte Zerpa ist diesmal weder bei den Orten mit der höchsten Luftbelastung noch als der Ort mit der besten Luftbelastung eingeteilt. Die Belastung wurde bei dieser Auswertung als „sehr hoch bis hoch“ definiert. Mit einem Luftgütewert von 20 liegt der Monte Zerpa aber schon fast in der nächst besseren Luftgüteklasse.

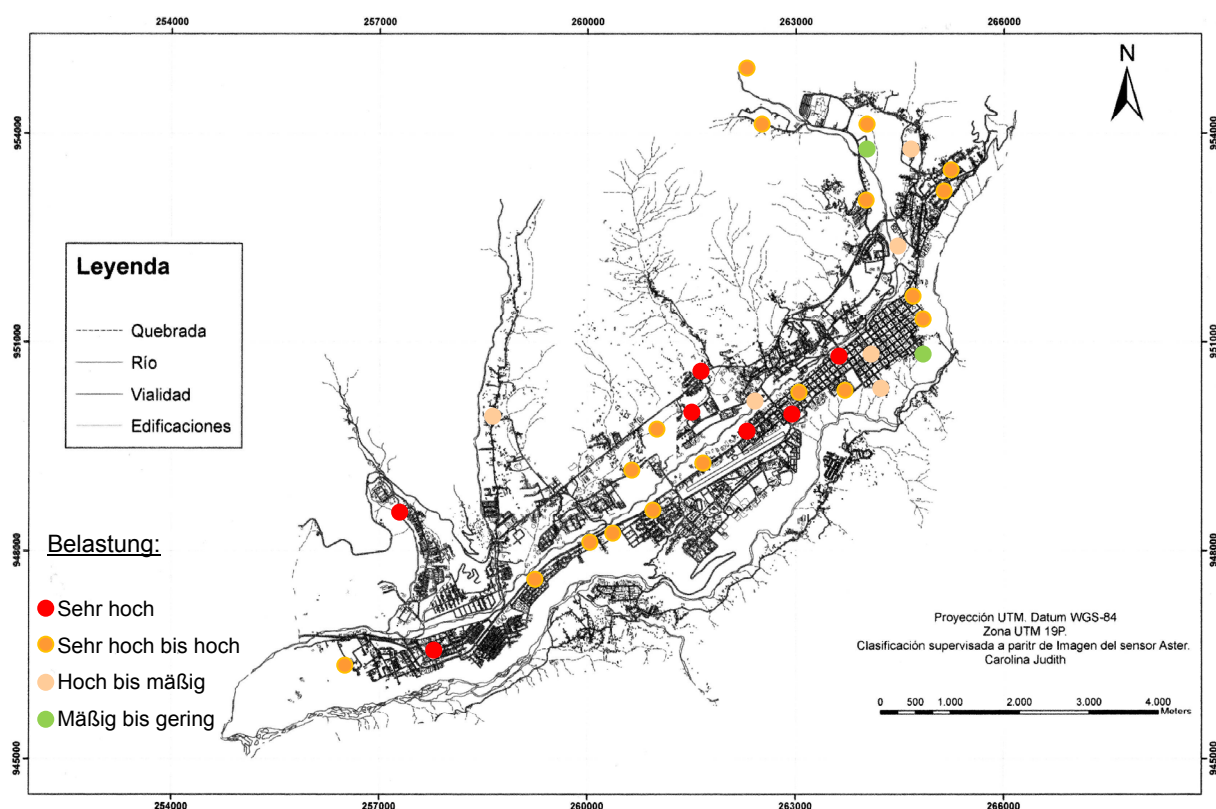


Abbildung 23: Lufthygienische Belastung (ermittelt anhand des Moos- und Flechtenvorkommens)

4.6 Toxizitätswerte

Anhand der Ergebnisse aus der Kartierung wurde versucht einzelnen Moos- und Flechtenarten Toxizitätswerte zuzuordnen. Diese Werte stellen ein Maß für die jeweilige Empfindlichkeit der Art gegenüber Luftschadstoffen dar. Dafür wurde eine Skala entwickelt, die in mehrere Stufen unterteilt ist (siehe Tab. 4, Kapitel 3.10). Die den Arten zugeordneten

Werte reichen von Stufe 1 bis Stufe 5. Wobei die Stufe 1 für sehr empfindliche Arten steht und die Stufe 5 für sehr toxitolerante Arten.

Als sehr empfindlich gegenüber Luftschadstoffen gilt eine Art, wenn sie nur sehr selten im gesamten Untersuchungsgebiet kartiert wurde, und nur an Orten zu finden ist, die die beste Luftqualität im Vergleich zu den anderen Orten aufweisen und an denen ein nur geringes bis gar kein Verkehrsaufkommen zu verzeichnen ist. Demgegenüber stehen die hoch toxitoleranten Arten, die im Vergleich zu den anderen Arten hohe lufthygienische Belastungen ertragen und an Orten mit hohem Verkehrsaufkommen zu finden sind.

Die epiphytischen Flechten und Moose der Stadt Mérida wurden wie folgt aufgeteilt:

Stufe 1 (sehr empfindliche Arten):

- *Hemithecium sp.*
- *Leucolejeunea sp.*

Stufe 2 (empfindliche Arten):

- *Coenogium spp.*
- *Dirinaria applanata*
- *Hyperphyscia minor*
- *Parmotrema reticulatum*
- *Pseudocyphellaria aurata*
- *Plagiochila spp.*

Stufe 3 (gering toxitolerante Arten):

- *Canoparmelia spp.*
- *Graphis sp.1*
- *Herpothallon rubrocinctum*
- *Pyrenula spp.*
- *Teloschistes flavicans*
- *Usnea spp.*
- *Acroporium spp.*
- *Schlotheimia toquata*

Stufe 4 (toxitolerante Arten):

- *Candelaria concolor*
- *Heterodermia sp.2*
- *Hyperphyscia adglutinata*
- *Leptogium corallideum*
- *Parmotrema sp.1*
- *Physcia sp.3*

- *Pyxine* spp.
- *Pyxine petricola*
- *Frullania riojaneirensis*
- *Lejeunea flava*
- *Porella* sp.
- *Regmatodon orthostegius*

Stufe 5 (hoch toxitolerante Arten):

- *Hyperphyscia* spp.
- *Parmotrema* sp.2
- *Pyxine cocoes*

4.7 Epiphytische Moos- und Flechtengesellschaften

In die Auswertung der Epiphytengesellschaften auf den untersuchten Trägerbäumen in Mérida gingen insgesamt 34 Arten (5 Moos- und 29 Flechtenarten) ein.

Drei verschiedene epiphytische Gruppen lassen sich unterscheiden (Tab. 11). Die größte Einheit bilden dabei *Pyxine cocoes*, *Candelaria concolor* und *Parmotrema* sp.1. Diese kommen vor allem an Orten mit hohem Verkehrsaufkommen vor. Die zweite Gruppe besteht aus *Parmotrema* sp.1 und *Canoparmelia* spp., die sowohl an Orten mit hoher lufthygienischer Belastung, als auch an weniger belasteten Gebieten zu finden ist. Die letzte Gruppe, bestehend aus den zwei Lebermoosarten *Frullania riojaneirensis* und *Lejeunea flava*, kennzeichnet dagegen die weniger belasteten Orte in Mérida.

5. Diskussion

5.1 Trägerbäume

Die Weißesche (*Fraxinus americana*) ist der am häufigsten kartierte Baum in dieser Untersuchung. Diese Baumart kommt natürlicherweise vor allem in Nordamerika vor und wird in Südamerika sehr gerne als Stadtbaum in Parkanlagen, auf Plätzen und an Straßen angepflanzt. Ähnlich verhält es sich mit den tropischen Baumarten *Tabebuia rosea* und *Erythrina poepegiana*, die vor allem wegen ihrer schönen Blüten mit Vorliebe in Städten gepflanzt werden. Diese drei häufigsten Baumarten sind recht gleichmäßig über die gesamte Stadt Mérida verteilt, so dass dadurch ein guter Vergleich zwischen den unterschiedlichen Kartierungsorten und dem Bewuchs der Bäume mit Epiphyten bzw. der daraus errechneten Luftgüte möglich ist. Außerdem weisen alle drei Trägerbaumarten jeweils eine hohe Diversität an epiphytischen Moosen und Flechten auf, so dass sie als gut geeignete Trägerbäume einzuordnen sind.

Wie die Ergebnisse verdeutlichen, können verschiedene Faktoren den Bewuchs mit epiphytischen Moosen und Flechten an einem Baum beeinflussen.

Die Analyse nach Spearman zwischen dem pH-Wert der Borke und der Anzahl der auf dem Baum wachsenden epiphytischen Moos- bzw. Flechtenarten ergab jeweils eine signifikante Korrelation. Dies bedeutet, dass die Anzahl der epiphytischen Arten eines Baumes in der Stadt Mérida mit der Höhe des pH-Wertes der Borke ansteigt. Der Effekt, dass hohe Niederschlagswerte und hohe Luftfeuchte, wie sie in den Tropen vorzufinden sind, die Präferenz der epiphytischen Arten für bestimmte Substrate bzw. Trägerbaumarten überdecken (FRAHM, 1998), konnte bei dieser Untersuchung nicht bestätigt werden, und das obwohl der Jahresniederschlag der Stadt Mérida mit insgesamt 1779 mm (STRASBURGER, 2002) fast 2,5 mal so hoch ist, wie der Niederschlag einer mitteleuropäischen Stadt. Günstige Bedingungen für die Besiedlung mit Moosen und Flechten scheint die Borke von *Erythrina poepegiana* zu bieten, da sie, im Vergleich zu den anderen Baumarten, einen recht hohen pH-Wert besitzt. Dies spiegelt sich auch in Abbildung 5 (Kapitel 4.1) wieder. Die Anzahl der Flechtenarten auf *Erythrina poepegiana* ist die zweithöchste unter allen kartierten Baumarten.

Im Mérida besaß der Großteil der untersuchten Bäume einen mittleren Borken-pH-Wert unter 6. Im Vergleich zu Untersuchungen in Mitteleuropa ist dieser pH-Wert eher niedrig. So lagen bei einer Kartierung im Ruhrgebiet die pH-Werte der Borken bei der Mehrheit der Bäume über 6, einzelne Messungen ergaben sogar Werte im leicht basischen Bereich (FRANZEN, 2001). Der pH-Wert der Borke kann durch Luftschadstoffe beeinflusst werden. So bewirkt

z.B. Schwefeldioxid eine Versauerung von Borke (VAN DOBBEN & TER BRAAK, 1998). Seit Anfang der 1990er Jahre der Anteil von SO_2 in der Luft in Deutschland durch Nutzung von schwefelärmeren Brennstoffen und Rauchgasentschwefelung zurückgeht (FRANZEN, 2004), ist der pH-Wert der Borken angestiegen und auch die Menge an Epiphyten in vorher belasteten Gebieten. Durch den Rückgang von SO_2 in der Luft ist die Bedeutung von Stickstoffverbindungen gestiegen. Diese entstehen vornehmlich in der Landwirtschaft sowie auch beim Straßenverkehr (FRANZEN, 2004). Atmosphärisches Ammoniak hat dabei z.B. den Effekt, dass es den Borken-pH erhöht (VAN DOBBEN & TER BRAAK, 1998). Dies könnte ein weiterer Grund für die höheren pH-Werte in Mitteleuropa sein.

Die niedrigeren Borken-pH-Werte im Mérida lassen sich auf mehrere Faktoren zurückführen. So führen z.B. hohe Niederschläge, wie sie in den Tropen vorherrschen, zu einer Auswaschung von basischen Staubimprägnierungen am Baumstamm (FRAHM, 1995). Außerdem kann auch die hohe Verkehrsbelastung in Mérida zu den sauren pH-Werten beitragen. So wurde z.B. noch 1995 dem Benzin Blei in hohen Mengen zugemischt (MARCANO et al., 1996). Je höher der Bleigehalt der Luft ist, desto niedriger ist der pH-Wert der Borke. Zusätzlich fand MARCANO et al. (1995) heraus, dass durch die Nordwinde Schadstoffe aus weiter entfernten Regionen (Maracaibo-See) bis nach Mérida hineingetragen werden, wie z.B. flüchtiges Quecksilber, welches als Abfallprodukt der Petrochemie und Chlor- /Natron-Fabriken entsteht. Dieses Quecksilber kann weite Strecken durch den Wind mitgetragen werden. Auch Hg hat den Effekt, dass es den pH-Wert herabsetzen kann (MARCANO et al., 1996). Desweiteren kann natürlich auch das Vorhandensein von Schwefeldioxid in der Atmosphäre ein Grund für die niedrigen pH-Werte sein.

Inwieweit diese Luftschadstoffe noch heute in der Atmosphäre eine Rolle spielen, müsste durch gezielte Messungen herausgefunden werden.

Dass die gemessenen pH-Werte mit in der Stadt vorhandenen Luftschadstoffen zusammenhängen könnten, bekräftigt eine Untersuchung in einem Bergregenwald, der sich 57 km nordwestlich von der Stadt Mérida befindet (ENGWALD, 1999). Dort besaß der Großteil, der untersuchten Bäume einen Borken-pH-Wert zwischen 6,5 und 7,2 und liegt somit höher als die Werte in der Stadt.

Ein weiterer Faktor, der die Ansiedlung von Epiphyten beeinflussen kann, ist die Inklination des Baumstammes. Anhand von Korrelationsanalysen konnte auch hier ein Zusammenhang zwischen der Stammneigung und der Artenanzahl der Moose sowie Flechten nachgewiesen werden. Die Anzahl der Arten steigt mit der Neigung der Baumstämme. Dies ist zum einem damit begründet, dass die Abflussgeschwindigkeit von Regenwasser geringer ist, was den Epiphyten sehr entgegen kommt, da sie ihre Nährstoffe aus dem Niederschlag beziehen,

und zum anderem damit, dass Humus und Staub auf geneigten Flächen besser akkumuliert werden können, als auf senkrechten Baumstämmen und somit bessere Bedingungen vor allem für nährstoffliebende Arten bieten.

Desweiteren kann auch die Borkentextur (glatt oder rissig) von Bedeutung für die Ansiedlung von Epiphyten sein. Tiefrissige Borke schützt die Moose und Flechten z.B. besser vor Austrocknung, da der Wasserablauf verlangsamt wird, und außerdem vor zu starker Sonneneinstrahlung, so dass diese von epiphytischen Arten bevorzugt wird (DILG; 1998). Bei der Untersuchung in Mérida konnte dies jedoch nicht generell bestätigt werden. Zwar besitzt *Fraxinus americana* eine rissige Borke und weist auch die höchste Artenvielfalt auf, aber eine ebenfalls hohe Vielfalt an Epiphyten ist auf *Erythrina poepegiana* zu finden, die eine eher glatte Borke besitzt. Auch ist die durchschnittliche Artenanzahl bei Bäumen mit glatter oder rissiger Borke mit 5,03 Arten bzw. 4,92 sehr nah beieinander, so dass die Struktur der Borke zumindest in Mérida keine Rolle bei der Ansiedlung der Epiphyten zu spielen scheint. Dies könnte damit zu erklären sein, dass die Vorteile, die eine rissige Borke bietet, wie z.B. die Verzögerung des Wasserablaufes, durch die Höhe der Niederschläge in den Tropen überdeckt werden.

Der Stammumfang der Trägerbäume scheint in Mérida keinen besonders großen Einfluss auf die Artenzahl der epiphytischen Moose und Flechten zu haben. Nur bei *Tabebuia rosea* konnte eine signifikante Korrelation zwischen Stammumfang und Anzahl der Flechtenarten festgestellt werden. Je größer der gemessene Stammumfang, desto mehr Flechtenarten sind auf dem Baumstamm von *Tabebuia rosea* zu finden. Dies hängt damit zusammen, dass der Umfang eines Stammes bis zu einem gewissen Grad das Baumalter widerspiegelt. Aus diesem Grund erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass sich Epiphyten auf dem Stamm niederlassen mit dem Alter des Baumes. Ebenso kann sich das Mikroklima für die Epiphyten mit dem Alter der Bäume verbessern, da z.B. durch die Zunahme der Baumkrone die Insolation verringert wird. Desweiteren nimmt mit zunehmendem Alter eines Baumes die Auswaschung von Chemikalien mit allelopathischen Eigenschaften aus der Borke zu, dies wiederum führt zu einem Anstieg der Epiphytenmenge auf einem Baumstamm (KOOPMANN, 2005).

Bei den anderen untersuchten Baumarten konnte dagegen kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Stammumfang und der Epiphytenmenge festgestellt werden. Somit scheinen die positiven Effekte, die ein großer Stammumfang und somit ein älterer Baum den Epiphyten bieten könnten, eine eher geringere Rolle für die Ansiedlung bzw. die Artenanzahl von Moosen und Flechten in Mérida zu spielen.

Die Auswertung der Expositionen ergab keine eindeutige Bevorzugung einer Himmelsrichtung der epiphytischen Moose und Flechten auf den untersuchten Trägerbäumen. Am häufigsten ist die Nord- bzw. Westseite der Baumstämme bewachsen. Die vorherrschenden Winde in Mérida kommen zum einem aus Südwesten aus der Region Táchira und zum anderem aus dem Norden vom Maracaibo-See her (MARCANO et al., 1996). Somit bevorzugen die Epiphyten in Mérida die windexponierten Seiten am Baumstamm.

In Mitteleuropa dagegen ist die am stärksten bewachsene Seite im Südwesten zu finden (DILG, 1998; FRANZEN, 2001) und orientiert sich somit auch an der windexponierten Baumseite. Diese bietet den Epiphyten gute Bedingungen, weil hier der Wind und der Regen gegen drücken und diese Seite somit am feuchtesten ist.

5.2 Epiphytische Moose und Flechten im Untersuchungsgebiet

In Mérida wurden fast dreimal so viele epiphytische Flechtenarten gefunden wie Moosarten. Besonders an sehr verkehrsreichen Orten waren keinerlei Moose an den untersuchten Trägerbäumen aufzufinden. Dies hängt damit zusammen, dass Moose sehr viel empfindlicher auf Luftschadstoffe reagieren, z.B. auf Schwefeldioxid (FRAHM, 1998). An den am geringsten belasteten Orten war auch die Anzahl der kartierten Moosarten am höchsten. Ein Vergleich von Laub- und Lebermoosarten zeigt, dass zwar die Anzahl der einzelnen Laubmoosarten höher liegt als die Anzahl der Lebermoosarten, jedoch die drei am häufigsten kartierten Moosarten zu den Lebermoosen gehören und insgesamt 58% aller gefundenen Moosarten ausmachen (siehe Abb. 10, Kapitel 4.3). Dies ist in soweit erstaunlich, da Lebermoose empfindlicher auf Luftverschmutzungen reagieren als Laubmoose (FRAHM, 1998) und somit in einer verkehrsreichen Stadt wie Mérida eigentlich seltener auftreten sollten. Das Lebermoos *Frullania riojaneirensis* ist das am häufigsten kartierte Moos und findet sich sogar auf Bäumen wieder, die direkt an stark befahrenen Straßen stehen. Auch beim Vergleich der Frequenzsummen bei Laub- und Lebermoosarten, gehen die Lebermoose als Gewinner hervor. Insgesamt gesehen ist die mittlere Frequenzsumme aller Moosarten mit einem Wert von 3,16 jedoch im Vergleich zu den Flechten sehr niedrig.

Bei den Flechten ist der häufigste Wuchsformtyp die Laubflechte, gefolgt von der Krustenflechte und abschließend von der Strauchflechte. Die Strauchflechten finden sich nur an Orten mit geringer Luftbelastung wieder, somit scheinen sie der empfindlichste Wuchsformtyp zu sein. Dies wurde auch bei einer Kartierung in der Stadt Bonn festgestellt, dort fehlten Strauchflechten komplett in der Innenstadt und anliegenden Stadtteilen (DILG, 1998).

Der Vergleich der Artenanzahlen von epiphytischen Moosen und Flechten zwischen der Kartierung in Bonn und der in Mérida zeigt, dass der Anteil der Moose mit 38 Arten in Bonn höher liegt als in Mérida, dagegen jedoch die Anzahl der Flechten in Bonn mit 54 unterschiedlichen Arten niedriger ist als in den Tropen (DILG, 1998).

5.3 Kartierung nach der VDI-Richtlinie 3799 (Blatt 1, 1995)

Die für Mitteleuropa geltende alte VDI-Richtlinie 3799 (Blatt 1, 1995) zur Ermittlung und Beurteilung phytotoxischer Wirkungen von Immissionen mit Flechten (Flechtenkartierung zur Ermittlung des Luftgütwertes) ergab bei der vorliegenden Untersuchung brauchbare Ergebnisse für die tropische Andenstadt Mérida in Venezuela. Somit scheint die Übertragbarkeit dieser VDI-Richtlinie auch auf tropische Städte möglich.

Nicht alle Kriterien der Richtlinie konnten bei der Kartierung in Mérida eingehalten werden, wie z.B. die Einteilung des Untersuchungsgebietes in gleichgroße Rasterquadrate. Dies erschien nicht sinnvoll, da es zeitlich sehr aufwendig ist und die Verteilung bzw. die Dichte von geeigneten und zugänglichen Trägerbäumen in dieser Stadt recht inhomogen ist. Somit wurde stattdessen eine Punktkartierung durchgeführt, die aber der Qualität der Ergebnisse nicht zu schaden scheint.

Die strengen Vorgaben bezüglich der Trägerbaumauswahl erscheinen sinnvoll. So konnte gezeigt werden, dass sowohl die Inklination als auch teilweise der Stammumfang den Epiphytenbewuchs beeinflussen kann. Ebenso kann die Einteilung der Bäume in verschiedene Gruppen bezüglich der Borken-pH-Werte als sinnvoll bestätigt werden.

Auch die für Mitteleuropa erstellte Belastungsskala kann als Vorlage für tropische Städte genutzt werden.

Die Übertragung der VDI-Richtlinie auf epiphytische Moose erscheint zumindest für die Stadt Mérida machbar. Es konnten, wie bei der Flechtenkartierung, vier unterschiedliche Luftgüteklassen ermittelt werden. Jedoch sind diese relativ enggefasst und ergeben bei der Anlegung an die europäische Bewertungsskala nur die grobe Unterscheidung zwischen einer sehr hohen oder einer hohen lufthygienischen Belastung, so dass insgesamt gesehen kein sehr differenziertes Bild der Luftbelastung in Mérida mit Hilfe der Moose erstellt werden konnte. Dies hängt damit zusammen, dass im Untersuchungsgebiet das Vorkommen von epiphytischen Moosen im Vergleich zu den Flechten deutlich geringer ist.

Dagegen scheint die Übertragbarkeit der VDI-Richtlinie auf Moose in Europa nicht sehr sinnvoll zu sein, wie Untersuchungen in der Stadt Bonn und am Westrand des Ruhrgebietes gezeigt haben (DILG, 1998; FRANZEN, 2001). Auch dort ist das ausschlaggebende Kriterium die jeweils geringe Artenanzahl der epiphytischen Moose in den Untersuchungsgebieten.

Der Versuch die epiphytischen Moose und Flechten mit Hilfe der VDI-Richtlinie zusammen auszuwerten, ergab ganz brauchbare Ergebnisse. Sie gleichen in etwa den Ergebnissen der Flechtenauswertung, mit der Ausnahme, dass die Luftbelastung am Monte Zerpa besser bewertet wurde. Dadurch, dass Moose und Flechten zusammen in die Auswertung mit eingehen, fällt es bei den Ergebnissen nicht mehr so stark ins Gewicht, wenn z.B. die Anzahl der Flechtenarten durch die Dominanz der Moose gering gehalten wird.

Somit bietet also die gemeinsame Auswertung von Moosen und Flechten die besten Ergebnisse.

5.4 Lufthygienische Belastung der Stadt Mérida

Sowohl die Ergebnisse der Flechtenkartierung als auch die der Mooskartierung ergeben das Bild einer hohen lufthygienischen Belastung in der Stadt Mérida. Fast in allen Bezirken der Stadt ist die Luftbelastung als hoch oder sehr hoch einzustufen. Innerhalb der Stadt haben nur der Botanische Garten sowie der Park Los Poetas eine etwas bessere Luftqualität vorzuweisen. Da in der Stadt kaum industrielle Emissionen zu verzeichnen sind, ist die hohe Belastung mit Luftschadstoffen auf den immensen Straßenverkehr in der gesamten Stadt zurückzuführen. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen wieder. Die Orte, die nicht direkt an stark befahrenen Straßen liegen, sondern etwas abseits davon, zeigen die geringste Luftbelastung und erhielten die besten Bewertungen.

Der Vergleich der Ergebnisse aus der Flechten- sowie der Mooskartierung zeigt, dass mit Hilfe der Flechten eine differenziertere Auswertung möglich war. Die Auswertung anhand der Moose wurde erschwert durch das geringere Artenvorkommen innerhalb der Stadt. Trotzdem decken sich die Ergebnisse aus den beiden Kartierungen weitestgehend.

Eine große Unstimmigkeit im Vergleich der Ergebnisse zeigt sich nur beim Kartierungsort Monte Zerpa. Bei der Flechtenkartierung wurde dort die lufthygienische Belastung als sehr hoch, und somit in die schlechteste Luftgüteklasse, eingestuft. Die Mooskartierung jedoch weist diesen Ort, als den Ort mit der besten Luftqualität der ganzen Stadt aus. Dieses Beispiel zeigt wie sehr mikroklimatische Gegebenheiten und die Höhenlage das Ergebnis einer Kartierung beeinflussen oder gar verfälschen können. Der Monte Zerpa liegt ganz am nördlichen Zipfel der Stadt und ist mit über 2000m NN um einiges höher als die restlichen Kartierungsorte. Eine Belastung mit Verkehr ist fast nicht zu verzeichnen, da dort nur eine einzige Straße hinaufführt, die so gut wie gar nicht befahren ist. Die Luftqualität sollte also, ähnlich wie beim Ergebnis der Mooskartierung, als gut eingestuft werden. Bei der Flechtenkartierung fällt ins Gewicht, dass die Anzahl der Arten dort sehr gering ist. Es

wurden nur 5 unterschiedliche Flechtenarten kartiert. Die durchschnittliche Anzahl der Flechtenarten pro Baum lag bei 1,8. Dagegen wurden 13 verschiedene Moosarten gefunden, die im Gegensatz zu den Flechten jeweils hohe Frequenzen und eine hohe Bedeckung auf den Baumstämmen aufwiesen. Die durchschnittliche Anzahl der Moose pro Baum lag bei 3,2 und ist somit einer der höchsten Werte innerhalb der gesamten Stadt. Dies ist damit zu erklären, dass der Anteil der epiphytischen Moose in tropischen Gebieten mit der Meereshöhe stark zunimmt. Besonders ab einer Höhe von 1800 m ist ein sprunghafter Anstieg der Moosarten zu verzeichnen (FRAHM, 2001).

Da die Höhenlage also einen großen Einfluss auf das Vorkommen und die Häufigkeit von epiphytischen Moosen und Flechten hat und somit das Ergebnis der Kartierung beeinflussen kann, wäre es besser den Kartierungsort Monte Zerpa aus der Untersuchung auszuschließen.

5.5 Toxitoleranzwerte

Mit Hilfe der erstellten Toxitoleranzwerte sollte die Empfindlichkeit der kartierten Moos- und Flechtenarten als eine relative Abstufung dargestellt werden.

Als hoch toxitolerant wurden folgende drei Flechtenarten eingestuft: *Pyxine cocoes*, *Hyperphyscia* spp. und *Parmotrema* sp.2. Diese drei Arten sind an Orten mit der schlechtesten Luftqualität und dem höchsten Verkehrsaufkommen zu finden. So sind z.B. *Pyxine cocoes* und *Parmotrema* sp.2 die einzigen Arten, die auf den Bäumen der stark belasteten Plaza El Llano in der Innenstadt wachsen. Desweiteren kommen sie auch auf Bäumen an sehr stark befahrenen Straßen, wie der Avenida Los Proceres vor. Für die Flechten *Pyxine cocoes* und *Hyperphyscia* spp. wurde zusätzlich noch festgestellt, dass sie gerade in den stark belasteten Gebieten häufig vorzufinden sind (Abb. 16, Kapitel 4.5.1). Sie sind also in der Lage hohe Luftverschmutzungen auszuhalten oder werden eventuell sogar durch sie gefördert. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam eine Untersuchung von SAIPUNKAEW et al. in Chiang Mai in Thailand. Dort wurde festgestellt, dass besonders tolerante Flechten gegenüber Luftverschmutzung die Arten *Hyperphyscia adglutinata* und *Pyxine cocoes* sind (in HAWKSWORTH et al., 2005).

Als Arten, die sehr empfindlich auf Luftverschmutzungen reagieren, wurden die Krustenflechte *Hemithecium* sp. und das Lebermoos *Leucolejeunea* sp. eingestuft. Diese sind jeweils in den beiden am geringsten belasteten Kartierungsorten (Parque Los Poetas und Botanischer Garten) aufzufinden. In der Nähe von stark befahrenen Straßen waren sie dagegen nie zu finden.

Wichtig zu beachten ist, dass die Einteilung der gefundenen Moos- und Flechtenarten in unterschiedliche Toxitolanzstufen nur lokale Gültigkeit besitzt. Bei Arten mit sehr großen Arealen können sich die Standortansprüche in den verschiedenen Gebieten stark unterscheiden und somit auch die Toxitolanz derselben Art (FRAHM, 1998).

Besonders die Einstufung als sehr empfindliche oder empfindliche Arten erweist sich als schwer, da das Fehlen einer Art in einem belasteten Gebiet nicht zwangsläufig bedeutet, dass sie dort nicht existieren könnte. Andere Parameter, wie z.B. mikroklimatische Gegebenheiten oder auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Art fallen hier mit ins Gewicht. Um aussagekräftigere Ergebnisse in bezug auf die Toxitolanz einer Art zu erlangen, wären deswegen Transplantationsversuche sowie auch genaue Messungen von eventuellen Luftschadstoffen vor Ort oder auch Begasungsversuche im Labor zu empfehlen.

5.6 Methodenvergleich zur Beurteilung der Luftqualität

Wie gezeigt werden konnte, kann die alte VDI-Richtlinie 3799 (Blatt 1, 1995) für die Ermittlung der Luftqualität in tropischen Städten verwendet werden. Das Prinzip dieser Methode besteht aus einer Kombination der Artenzahl der Epiphyten an einem Baum sowie der Frequenz jeder einzelnen vorkommenden Art.

Eine Alternative zu dieser Methode wäre z.B. eine Kartierung nur nach Artenzahlen. Die Abbildung 11 in Kapitel 4.4 stellt die Anzahl der Moos- und Flechtenarten pro Kartierungsort dar. Der Vergleich mit der Karte, die die ermittelte lufthygienische Belastung in Mérida darstellt (Abb. 23, Kapitel 4.5.3), zeigt, dass sich die Orte mit der höchsten Anzahl an epiphytischen Arten mit den Orten der besten Luftqualität decken. Das bedeutet, dass in diesem Falle eine Kartierung nur nach Artenzahlen ein ähnliches Ergebnis erzielen würde, wie die Kartierung nach der VDI-Richtlinie. Bei der Kartierungsmethode nur nach Artenzahlen wird die Häufigkeit der Arten außer Acht gelassen. Somit wird eine Art, die mit nur einer sehr geringen Häufigkeit vorkommt, genauso bewertet, wie eine Art, die eine hohe Frequenz aufweist. D.h., es erfolgt nur eine qualitative (Arten) Erfassung der Epiphyten und keine quantitative (Häufigkeit). Hierbei stellt sich die Frage, inwieweit die Häufigkeit einer Art bei der Bewertung der Luftqualität von Bedeutung ist, bzw. wie wichtig es ist, ob eine Art nur eine Frequenz von 1 aufweist oder eine Frequenz von 10. Eine Art, die sehr empfindlich auf Luftschadstoffe reagiert, würde bei einer Frequenz von 1 bei der Auswertung der Luftgüte durch ihre geringe Frequenz fast gar keine Rolle spielen, sodass die Luftqualität dadurch zu schlecht bewertet würde. Eine Kombination mit den Toxitolanzwerten der Arten könnte hierbei Abhilfe schaffen. Diese Idee wird bei der sogenannten HTI- Methode (Häufigkeits-Toxitolanz- Index) von KRICKE (1998) umgesetzt.

Weitere Alternativen zu der VDI- Methode wären z.B. eine Kartierung nach Zeigerarten oder aber eine Kartierung nach Gesellschaften. In beiden Fällen wäre das zu erwartende Ergebnis jedoch nicht so detailliert wie das Ergebnis bei der Anwendung der VDI- Richtlinie. Bei einer Kartierung nach Zeigerarten besteht das Problem, dass nicht alle kartierten Arten einer Toxitolanzstufe zugeordnet werden konnten. Außerdem ist die Einstufung in die unterschiedlichen Toxitolanzstufen mit Vorsicht zu genießen, da die Bewertung der Arten nur anhand der gesammelten Daten in der Stadt Mérida erfolgte und Erfahrungswerte aus anderen südamerikanischen Städten fehlen. Um die Luftbelastung an einem Ort auf der Basis der Toxitolanzwerte einzuschätzen, muss darauf geachtet werden, dass die Aussagekraft der empfindlichen Arten höher ist, als die der toxitoleranteren Arten. Die Anwesenheit einer hoch toxitoleranten Art bedeutet nicht zwangsläufig, dass an diesem Ort die Luftqualität als sehr schlecht einzustufen ist.

Auch die Kartierung nach Gesellschaften würde kein differenziertes Bild der unterschiedlichen Luftbelastung in Mérida ergeben. Zwar konnten drei Vergesellschaftungen herausgearbeitet werden, die jeweils unterschiedlichen Belastungsstufen zu zuordnen sind, aber auch hier fehlen Erfahrungswerte und es kommt zwischen den Gesellschaften zu Überschneidungen.

Um die Ergebnisse aus der VDI-Methode noch zu untermauern, würden sich dagegen z.B. Transplantationsversuche, wie sie u.a. in Costa Rica durchgeführt wurden (MÉNDEZ & FOURNIER, 1980), anbieten. Dabei könnten mehrere Exemplare einer bestimmte Flechten- oder Moosart aus einem unbelasteten Gebiet in die unterschiedlichen Kartierungsorte verfrachtet werden und über einen bestimmten Zeitraum vor Ort beobachtet und anschließend im Labor untersucht werden. Durch die Unterschiede bezüglich der Schädigungs- oder Absterberate der jeweiligen Arten kann eine vergleichende Aussage über die lufthygienische Belastung an den verschiedenen untersuchten Orten gemacht werden. Außerdem kann zusätzlich noch die Akkumulation von Schadstoffen in den Arten gemessen werden, sodass ein Vergleich zwischen der Höhe der Luftschadstoffe in den einzelnen Orten möglich ist. Diese Untersuchungen sind nicht nur bei den transplantierten Arten machbar, sondern auch bei den Arten, die an den Kartierungsorten natürlicherweise vorkommen.

6. Zusammenfassung

Zwischen den Monaten März und Mai im Jahr 2008 wurde im Stadtgebiet von Mérida (Venezuela) eine Kartierung der epiphytischen Moose und Flechten, angelehnt an die für Mitteleuropa geltende alte VDI-Richtlinie 3799 (Blatt 1, 1995), durchgeführt. Zusätzlich wurden die epiphytischen Gesellschaften in der Stadt festgehalten sowie den Moosen und Flechten Toxikoleranzwerte zugeordnet.

Bei der Kartierung wurden insgesamt 149 Bäume in 33 unterschiedlichen Orten untersucht. Dabei konnten 72 Flechten- und 26 Moosarten nachgewiesen werden.

Die Kartierung nach der VDI-Methode wurde einmal getrennt für Moose und Flechten durchgeführt, und einmal mit beiden Pflanzengruppen zusammen. Das Untersuchungsgebiet konnte jeweils in vier unterschiedliche Luftgüteklassen unterteilt werden. Dabei ergab die gemeinsame Auswertung von epiphytischen Moosen und Flechten das sinnvollste Ergebnis. Bei allen drei Untersuchungen wurde der schlechteste Luftgütewert jeweils auf der Plaza El Llano in der Innenstadt ermittelt. Die beste Luftqualität befindet sich im Vergleich dazu im botanischen Garten sowie im Parque Los Poetas.

Es konnten Korrelationen zwischen dem Vorkommen der Arten und den Borken-pH-Werten, dem Verkehrsaufkommen sowie Stammumfang und Stamminklination nachgewiesen werden.

Anhand der gesammelten Daten wurden einigen Flechten- und Moosarten Toxikoleranzwerte zugeordnet. Als hoch toxischtolerante Arten wurden *Hyperphyscia* spp., *Parmotrema* sp. 2 und *Pyxine cocoas* eingestuft.

Die Auswertung der Epiphytengesellschaften ergab drei unterschiedliche Gruppen, die verschiedenen Belastungsstufen zugeordnet werden konnten. Die Gruppe aus *Pyxine cocoas*, *Candelaria concolor* und *Parmotrema* sp.1 ist vor allem an Orten zu finden, die ein hohes Verkehrsaufkommen und somit eine hohe lufthygienische Belastung aufweisen. Dem gegenüber steht die Gruppe aus den Lebermoosen *Frullania riojaneirensis* und *Lejeunea flava*, die besonders die Orte mit geringer Verkehrsbelastung bevorzugen.

Anhand dieser Diplomarbeit konnte gezeigt werden, dass die VDI-Richtlinie 3799 (Blatt 1, 1995) auch in Mérida zu brauchbaren Ergebnissen führt und somit für die Arbeit in tropischen Gebieten zu empfehlen ist.

7. Literaturverzeichnis

- AGUILERA, M., AZÓCAR, A. & E. GONZÁLEZ JIMÉNEZ (2003): Biodiversidad en Venezuela. Tomo I. Fundación Polar. Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- BARKMAN, J.J. (1958): Phytosociology and ecology of cryptogamic epiphytes. Assen.
- BURGA, C.A., KLÖTZLI, F. & G. GRABHERR (2004): Gebirge der Erde. Eugen Ulmer Verlag. Stuttgart.
- CARDENAS, A.L. (1965): Geografía física de Venezuela. Talleres Graficos Universitarios. Mérida, Venezuela.
- CHURCHILL, S.P. & E. L. LINARES C. (1995): Prodrum Bryologiae Novo- Granatensis. Introduccion a la Flora de Musgos de Colombia. Biblioteca José Jerónimo Triana 12: 1- 924.
- CLAUDIO DELGADILLO, M. & ANGELES CÁRDENAS (2000): Urban Mosses in Mexico City. Anales del Instituto de Biología. Seria Botanica. Vol. 71, número 002, pp. 63- 72.
- CONTI, M.E. & G. CECCHETTI (2001): Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review. Environmental Pollution 114: 471- 492.
- DELGADILLO, C. & A. S. CARDENAS (2000): Urban mosses in Mexico City. Anales de Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Botánica 71 (2): 63- 72.
- DIERSCHKE, H. (1994): Pflanzensoziologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- DILG, C. (1998): Epiphytische Moose und Flechten als Bioindikatoren der Luftqualität im Stadtgebiet von Bonn. Limprichtia 11: 1- 94.
- EL NACIONAL; Cartografía Nacional (1998): Atlas práctico de Venezuela. El Nacional. Caracas, Venezuela.
- ELLENBERG, H., WEBER, H.E., DÜLL, R., WIRTH, V., WERNER, W. & D. PAULISSEN (1944): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. 2. Auflage. Scripta Geobotanica, Volume 18. Verlag Erich Goltze, Göttingen.
- ENGWALD, S. (1999): Diversität und Ökologie der vaskulären Epiphyten in einem Berg- und einem Tieflandregenwald in Venezuela. Dissertation, Rheinische Friedrichs- Wilhelms- Universität Bonn.
- ESTRABOU, C., STIEFKENS, L., HADID, M., RODRÍGUEZ, J.M. & A. PÉREZ (2005): Estudio comparativo de la comunidad líquénica en cuatro ecosistemas de la provincial de Córdoba. Bol. Soc. Argent. Bot. 40 (1- 2): 1- 10.
- FRAHM, J.P. (1995): pH- Messungen von Eichenborken in Kalk- und Silikatgebieten. Bryologische Rundbriefe No. 20: 6- 7.
- FRAHM, J.P. (1998): Moose als Bioindikatoren. Quelle & Meyer, Wiesbaden.
- FRAHM, J.P. (2001): Biologie der Moose. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin.
- FRANZEN, I. (2001): Epiphytische Moose und Flechten als Bioindikatoren der Luftqualität am Westrand des Ruhrgebietes. Limprichtia 16: 1- 79.
- FRANZEN- REUTER, I. (2004): Untersuchungen zu den Auswirkungen atmosphärischer Stickstoffeinträge auf epiphytische Flechten und Moose im Hinblick auf die Bioindikation. Dissertation, Rheinische Friedrichs- Wilhelms- Universität Bonn.

- FREY, W. & R. LÖSCH (2004): Lehrbuch der Geobotanik. Spektrum Akademischer Verlag, München.
- GRADSTEIN, S.R., CHURCHILL, S.P. & N. SALAZAR- ALLEN (2001): Guide to the Bryophytes of Tropical America. *Memoirs of the New York Botanical Garden* 86: 1- 577.
- GOUDIE, A. (2002): Physische Geographie- Eine Einführung. 4. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, München.
- HAWKSWORTHS, D.L., ITURRIAG, T. & A. CRESPO (2005): Líquenes como bioindicadores de contaminación y cambios medio- ambientales el los trópicos. *Rev. Iberoam. Micol.* 22: 71- 82.
- HOHENWALLNER, D. (2000): Bioindikation mittels Moosen im dicht bebauten Stadtgebiet Wiens. *Limprichtia* 15: 1- 88.
- HUMER- HOCHWIMMER, K. & H.G. ZECHMEISTER (2001): Die epiphytischen Moose im Wienerwald auf Wiener Stadtgebiet und ihre Bedeutung für die Bioindikation von Luftschadstoffen. *Limprichtia* 18: 1- 99.
- JOVAN, S. & B. MC CUNE (2005): Air- Quality Bioindication in the Greater Central Valley of California, with Epiphytic Macrolichen Communities. *Ecological Applications* 15 (5): 1712- 1726.
- KIRSCHBAUM, U. & V. WIRTH (1997): Flechten erkennen- Luftgüte bestimmen. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- KLEMENT, O. (1955): Prodomus der mitteleuropäischen Flechtengesellschaften. Feddes. Reppert. Beih. 135: 5- 194.
- KOOPMANN, R. (2005): Allelopathic effects of bark phenols on epiphytic lichens. Dissertation. Rheinische Friedrichs- Wilhelms- Universität Bonn.
- LAMPRECHT, H. (1958): Der Gebirgsnebelwald der venezolanischen Anden. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 2: 89- 115.
- LAMPRECHT, J. (1992): Biologische Forschung: Von der Planung bis zur Publikation. Verlag Paul Parey, Berlin, Hamburg.
- LAUER, W. (1975): Vom Wesen der Tropen. Klimaökologische Studien zum Inhalt und zur Abgrenzung eines irdischen Landschaftsgürtels. Akademie der Wissenschaft und der Literatur, Mainz. Franz Steiner Verlag, Wiesbaden.
- LEÓN- VARGAS, Y., ENGWALD, S. & M.C.F. PROCTOR (2006): Microclimate, light adaptation and desiccation tolerance of epiphytic bryophytes in two Venezuelan cloud forests. *Journal of Biogeography* 33: 901- 913.
- MARCANO, V. (1994): Introducción al estudio de los líquenes y su clasificación. Colección Flora Liquéncia de los Andes. Vol. I. Ediciones del Museo de Ciencia, Tecnología, Artes y Oficios, Mérida, Venezuela.
- MARCANO, V., RODRÍGUEZ- ALCÓGER, V. & MORALES; A. (1996c): Utilización de líquenes para la medición de la contaminación del aire por metales pesados urbanos de América Latina y su relación con la salud pública. I. Mérida, Venezuela. *Ernstia* 6: 3- 40.
- MÉNDEZ, O. & L.A. FOURNIER (1980): Los líquenes como indicadores de la contaminación atmosférica en el area metropolitana de San José, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 28: 31- 38.
- MONASTERIO, M. (1980): Estudios en los Paramos Andinos. Ediciones de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

- MONGE- NÁJERA, J., GONZÁLES, M. I., RIVAS ROSSE, M. & V.H. MÉNDEZ- ESTRADA (2002): Twenty years of lichen cover change in a tropical habitat (Costa Rica) and its relation with air pollution. *Revista de Biología Tropical* 50 (1): 309- 319.
- MONGE- NÁJERA, J. GONZÁLES, M. I., RIVAS ROSSI, M. & V. H. MÉNDEZ (2002): A new method to assess air pollution using lichens as bioindicators. *Revista de Biología Tropical* 50 (1): 321- 325.
- MÜLLER, U. (1997): Diversität epiphytischer Moose eines westandinen Bergregenwaldes in Ecuador. Diplomarbeit. Rheinische Friedrichs- Wilhelms- Universität Bonn.
- MÜLLER, U. & J.P. FRAHM (1998): Diversität epiphytischer Moose eines westandinen Bergregenwaldes in Ecuador. *Tropical Bryology* 15: 29- 43.
- NÖSKE, N. (2004): Effekte anthropogener Störung auf die Diversität kryptogamischer Epiphyten (Flechten, Moose) in einem Bergregenwald in Südecuador. Dissertation. Georg- Augustus- Universität Göttingen.
- SCHMIDTHÜSEN, F. (1988): Venezuela. Goldstadtverlag, Pforzheim.
- SCHUBERT, C. & L. VITAS (1993): El Cuaternario de la Cordillera de Mérida. Andes Venezolanos. Universidad de los Andes. Fundación Polar. Mérida, Venezuela.
- SOLGA, A. (2003): Untersuchungen zur Eignung von Moosen als Bioindikatoren atmosphärischer Stickstoffeinträge. Dissertation. Rheinische Friedrichs- Wilhelms- Universität, Bonn.
- STRASBURGER, E. (2002): Lehrbuch der Botanik. 35. Auflage. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm.
- TREMP, H. (2005): Aufnahme und Analyse vegetationsökologischer Daten. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- VAN DOBBEN, H.F. & C.J.F. TER BRAAK (1998): Effects of Atmospheric NH₃ on Epiphytic Lichens in the Netherlands: The Pitfalls of Biological Monitoring. *Atmospheric Environment* Vol. 32, No. 3, pp. 551- 557.
- VAN DOBBEN, H.F.; WOLTERBEEK, H.Th., WAMELINK, G.W.W. & TER BRAAK (2001): Relationship between epiphytic lichens, trace elements and gaseous atmospheric pollutants. *Environmental Pollution* 112: 163- 169.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.) (1995): VDI- Richtlinie 3799, Blatt 1: Messen von Immissionswirkungen, Ermittlung und Beurteilung phytotoxischer Wirkungen von Immissionen von Flechten. Flechtenkartierung zur Ermittlung des Luftgütwertes (LGW). Düsseldorf.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.). (2004): VDI- Richtlinie 3975, Blatt 13: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Flechten (Bioindikation). Kartierung der Diversität epiphytischer Flechte als Indikator für die Luftgüte. Düsseldorf.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.) (2005): VDI- Richtlinie 3957, Blatt 12: Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen (Bioindikation). Kartierung der Diversität epiphytischer Moose als Indikator für Luftqualität. Düsseldorf.
- VILA, M.- A. (1967): Aspectos Geográficos del Estado Mérida. Corporación Venezolana de Fomento, Caracas.

- WIRTH, V. (1995): Die Flechten Baden- Württembergs. Teil 1 und 2. 2. Auflage. Ulmer Verlag, Stuttgart.
- WOLF, J.H.D. (1993): Ecology of epiphytes and epiphytic communities in montane rain forests, Colombia. Dissertation, University of Amsterdam.

<http://www.venezuelatuya.com/estados/merida.htm>

<http://www.lib.utexas.edu/maps/venezuela.html>

Danksagung

Bei allen, die mir beim Gelingen dieser Arbeit geholfen und mir immer wieder Mut zugesprochen haben, möchte ich mich herzlich bedanken.

Für die Ermöglichung dieser Arbeit, die Unterstützung und gute Betreuung bedanke ich mich bei Herrn Prof. Jan-Peter Frahm.

Herrn PD Dr. Bodo Maria Möselers danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Yelitza León- Vargas gilt mein Dank für die Betreuung in Mérida.

Ich danke Herrn Dr. Marcano und vor allem Herrn Dr. Harrie Sipman für die Hilfe bei der Bestimmung der Flechten.

Gracias a Jannellis, Duchicela, Amari y Chia.

Danke Benjamin.

Nicht zuletzt sei auch meinen Eltern und meinem Bruder gedankt, die mir den Aufenthalt in Venezuela ermöglicht haben, mich immer unterstützen und mit viel Geduld, guten Worten und Ideen zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig verfasst wurde und, dass ausschließlich die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden.

Bonn, den 10.11.2008

Sandra Reimer