

Untersuchungen zur epiphytischen Flechtenvegetation und zum Borken-pH-Wert in Bielefeld (NRW): Eine Vergleichsstudie 40 Jahre später

Investigations on the epiphytic lichen vegetation and the bark pH value
in Bielefeld (North Rhine-Westphalia): A comparative study 40 years later

Imke SCHRÖDER, Yasmina SAIDI, Stefanie BOLTERS DORF, Bielefeld

Mit 20 Abbildungen und 2 Tabellen

Inhalt	Seite
1 Einleitung	6
1.1 Luftverschmutzung und Emissionsentwicklung	6
1.2 Flechten und Bioindikation	8
1.3 Der Borken-pH-Wert als Bioindikator	9
1.4 Ziel dieser Studie	9
2 Das Untersuchungsgebiet	9
2.1 Klima	10
2.2 Geomorphologie	10
2.3 Konflikte zwischen Nutzung und Naturraum	12
3 Material und Methoden	12
3.1 Kartierung und Probennahme	12
3.2 Aufbereitung der Borkenproben	13
3.3 Aufbereitung der Studie von Gerhardt & Größer-Hellriegel	13
3.4 Statistische Auswertung	14
4 Ergebnisse	14
4.1 Ergebnisse 2021	14
4.2 Vergleich der Ergebnisse aus den Jahren 1981 und 2021	16
5 Diskussion	23
5.1 Die Flechtendiversität	23
5.2 Der Borken-pH-Wert	25
5.3 Flechtenwüsten	26
6 Fazit	27
Literatur/References	27

Verfasserinnen:

Imke Schröder, Auf der Hude 18, 32584 Löhne, E-Mail: imke.schroeder@uni-bielefeld.de
Yasmina Saidi, Stefanie Boltersdorf (Universität Bielefeld), Universitätstr. 25, 33615 Bielefeld,
E-Mail: stefanie.boltersdorf@uni-bielefeld.de

Zusammenfassung

Die Emissionsbelastung in Deutschland hat sich in den letzten 40 Jahren stark verändert. Diese Emissionsveränderungen werden auch von der heimischen Flora reflektiert. Im Raum Bielefeld wurde zuletzt vor 40 Jahren eine großflächige Flechtenkartierung von GERHARDT & GRÖSSER-HELLRIEGEL (1983) durchgeführt. Diese Studie wird in dieser Arbeit wiederholt, um die Veränderungen der Flechtenflora und des Borken-pH-Wertes in Bielefeld zu betrachten. Dazu wird eine einfache Flechtenkartierung an 51 Stationsbäumen in 51 1 x 1 km großen Quadranten im Nordwesten von Bielefeld durchgeführt. Dabei wird die Anwesenheit von Flechten an den Stationsbäumen und maximal 10 weiteren Bäumen im Umkreis notiert und eine Borkenprobe zur pH-Wert Analyse genommen.

Es ist festzustellen, dass sich die Flechtenflora in Bielefeld in den letzten 40 Jahren gänzlich gewandelt hat. Sowohl die Flechtendiversität als auch die Borken-pH-Werte sind angestiegen. Acidophyten, die 1981 noch dominierten, sind stark zurückgegangen. Im Jahre 2021 dominieren die Nitrophyten. Die Krustenflechte *Lecanora conizaeoides*, im letzten Jahrhundert noch eine der häufigsten Flechten in Europa, ist im Untersuchungsgebiet nicht mehr anzutreffen. Der Borken-pH-Wert, der 1981 stark sauer war, entspricht 2021 annähernd einem pH-Wert unter natürlichen Verhältnissen. Die positiven Veränderungen in der Emissionsbelastung, vor allem die Abnahme der sauren Emissionen, machen sich somit auch in Bielefeld bemerkbar. Dies wird allerdings überlagert durch die zunehmende Belastung durch eutrophierende Luftverschmutzungen. Die Flechtenzusammensetzung in Bielefeld wird immer noch durch anthropogenes Handeln bestimmt, statt der Acidophyten, welche durch saure Schadstoffe gefördert wurden, werden nun die Nitrophyten durch die eutrophierenden Verbindungen gefördert.

Abstract

The air pollution in Germany has changed drastically over the last 40 years. Those changes are reflected by the local flora. The last lichen mapping in Bielefeld was done 40 years ago by GERHARDT & GRÖSSER-HELLRIEGEL (1983). This study replicates their work to look at the changes in the lichen flora and bark pH-value in Bielefeld. A simple lichen mapping on 51 sample trees in 51 1 by 1 km quadrants in the northwest of Bielefeld was conducted. The presence of the lichen on the sample tree and at maximum 10 more trees in the area was noted and a bark sample for the analysis of the bark pH was taken.

The lichen flora has undergone a complete change. The lichen diversity and bark pH-values have risen. Acidophytes strongly decreased, 2021 the nitrophytes dominate. The crustose lichen *Lecanora conizaeoides*, one of the most found lichen of the last century in Europa, is completely absent. The bark pH-value was 1981 very acidic. In 2021 the bark pH is nearly equivalent to a pH under natural circumstances. The positive changes in the pollution load, especially the decrease in acidic emissions, are very visible in Bielefeld. However, this is overshadowed by the increase in eutrophic emissions. The lichen composition in Bielefeld is still determined by anthropogenic actions. Instead of the acidophytes which were favoured by acidic emissions, nitrophytes are now favoured by eutrophic emissions.

Keywords: lichen mapping, bark pH, Bielefeld, emissions

1 Einleitung

1.1 Luftverschmutzung und Emissionsentwicklung

Luftverschmutzung ist allgegenwärtig und kann sowohl der menschlichen Gesundheit als auch der Umwelt schaden (BEGON et al. 2017). Luftschadstoffe machen zwar nur einen kleinen Anteil des Luftgemisches aus, können als solche Spurenelemente aber eine Vielzahl schädlicher Wirkungen nach sich ziehen (BARGAGLI 1998). Die für die menschliche Gesundheit problematischsten Stoffe stellen derzeit Feinstaub, Ozon und Stickoxide dar (EUA 2020). Für die Umwelt ist zusätzlich die Eutrophierung von Ökosystemen, die übermäßige Einbringung von Nährstoffen, ein großes Problem. In der EU sind 61 % aller natürlichen Lebensräume überdüngt (UMWELTBUNDESAMT 2015). Hauptverursacher ist mit zwei Dritteln die Überdüngung mit Gülle oder Mineraldünger in der Landwirtschaft und die

Tierhaltung (UMWELTBUNDESAMT 2015). Die Emission von reaktiven Stickstoffverbindungen hat sich in Europa in der letzten 100 Jahren vervierfacht (UMWELTBUNDESAMT 2015).

In Europa wurde in den letzten Jahrzehnten eine allgemeine Verbesserung der Luftqualität beobachtet. Vor allem in den Städten kommt es aber immer noch zu Grenzüberschreitungen (EUA 2020; KESSINGER et al. 2021). Bei den eutrophierenden Emissionen konnte kaum ein Rückgang verzeichnet werden (s. Abb. 1). Erhebliche Fortschritte wurden dagegen bei sauren Emissionen durch Schwefel- und Stickstoffverbindungen gemacht (EUA 2020). Ein Rückgang anthropogener Emissionen vor Ort ist aber nicht immer ausreichend, um die Luftqualität zu steigern. Zum einen gibt es nicht immer eine lineare Beziehung zwischen Emissionsrückgang und Schadstoffkonzentrationen in der Luft, zum anderen können Schadstoffe auch über weite Strecken aus anderen Ländern oder auch Kontinenten transportiert werden (EUA

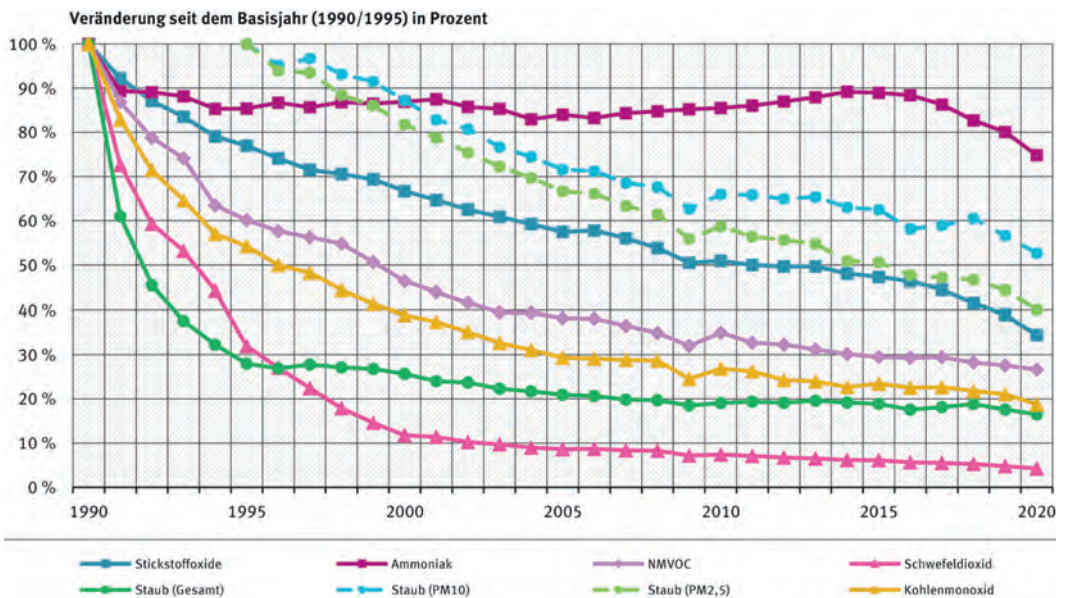


Abb. 1: Darstellung ausgewählter Emissionen von Schadstoffen in der Bundesrepublik Deutschland von 1990 bzw. 1995 bis 2019 (UMWELTBUNDESAMT 2021).

Fig. 1: Representation of selected emissions of pollutants in the Federal Republic of Germany from 1990 and 1995 to 2019 (UMWELTBUNDESAMT 2021).

2020). Die Steigerung der Luftqualität und die Emissionssenkung müssen folglich als globale Aufgabe betrachtet werden.

Die Quellen für Luftverschmutzung sind vielfältig, als Hauptquellen sind die Verbrennung fossiler Energieträger, industrielle Prozesse, der Einsatz von Lösungsmitteln, die Landwirtschaft, die Abfallbehandlung und natürliche Emissionsquellen, wie Vulkanausbrüche, verwehter Staub und Meersalzversprühungen zu nennen (EUA 2020; KESSINGER et al. 2021).

Im letzten Jahrhundert haben sich unter anthropogenem Einfluss die Emissionen von Schwefelgasen, dabei vor allem SO_2 , in der Atmosphäre global gesehen verdoppelt. Die Ablagerungen von Schwefel haben sich in einigen Ökosystemen sogar verdreißigfacht. Schwefel wird größten Teils bei der Nutzung fossiler Brennstoffe freigesetzt. In der Atmosphäre reagieren die Schwefelgase mit dem vorhandenen Wasser zu gelöster Schwefelsäure, die einen wesentlichen Bestandteil des Phänomens sauren Regens ausmacht (BEGON et al. 2017). Durch strenge Reglementierung ist seit den 1970er Jahren der Ausstoß von Schwefelgasen in den USA und Europa stark zurückgegangen, saurer Regen stellt kaum noch ein Problem dar (BEGON et al. 2017; EUA 2020; UMWELTBUNDESAMT 2021). Heutzutage rücken hier eutrophierende Emissionen in den Vordergrund, da Stickstoff in Form von Salpetersäure auch zum sauren Regen beitragen kann. Saurer Regen ist aber kein Problem der Vergangenheit, in anderen Regionen der Welt, vor allem in China, spielt er zunehmend eine Rolle. Saurer Regen kann viele langanhaltende Umweltprobleme nach sich ziehen, so zum Beispiel Fischsterben in Seen, Waldsterben und einen allgemeinen Rückgang des pflanzlichen Artenreichtums (BEGON et al. 2017).

Der Stickstoffkreislauf wird heutzutage im Wesentlichen durch den Menschen bestimmt (BARGAGLI 1998). Ähnlich wie bei Schwefel hat sich die Konzentration des biologisch wirksamen Stickstoffs seit der Ermöglichung der

industriellen Stickstofffixierung 1909 und der daraus resultierenden Herstellung von Kunstdünger global vervielfacht (BEGON et al. 2017). Diese Überbelastung mit Stickstoff zieht diverse gesundheitliche und ökologische Folgen nach sich, wie einen Verlust an Biodiversität, eine Erhöhung des Treibhauseffektes durch Distickstoffmonoxid und die Katalysierung der Bildung von toxischem bodennahem Ozon (BEGON et al. 2017). Die Eindämmung der Eutrophierung und die damit zusammenhängende Bildung von bodennahem Ozon und Feinstaub ist daher eines der Hauptziele der Luftreinhaltung in diesem Jahrhundert.

In Abbildung 1 ist die Entwicklung der Emissionen ausgewählter Schadstoffe in der Bundesrepublik Deutschland zwischen 1990 und 2019 dargestellt. Schwefeldioxid, welches im 20. Jahrhundert einen der Hauptluftschadstoffe darstellte, ist heute kaum noch von Relevanz. Die Ammoniak-Emissionen bleiben dagegen seit 1991 auf einem gleichbleibenden Niveau und auch die Stickstoffoxid-Belastung sank nur auf 40 % ab. Die Feinstaub-Belastung durch PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ Partikel nahm nur zur Hälfte ab. In Deutschland ist die Landwirtschaft mit 95 % der Hauptemittent von Ammoniak. Dabei stammen über 70 % der Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung, unter der auch das Wirtschaftsdüngen mit Stallmist und Gülle fällt (GEUPEL et al. 2021). Die Mineraldünger- und Gärrestausbringung verursacht ca. 25 % der gesamten Ammoniakemissionen (UMWELTBUNDESAMT 2020).

Veränderungen in der Emissionsbelastung werden auch von der heimischen Flora reflektiert, zum Beispiel als Schädigung des Organismus oder Veränderungen in der Artenzusammensetzung. Die Beobachtung und Auswertung dieser Auswirkungen werden als Biomonitoring bezeichnet. Als Bioindikatoren werden unter anderem Flechten und höhere Pflanzen, wie beispielsweise Bäume, genutzt (ARNDT et al. 1987).

1.2 Flechten und Bioindikation

Flechten (*Lichenes*) sind symbiontische Lebensgemeinschaften aus einer Grünalge oder Cyanobakterium, dem sogenannten Photobionten, und einem Pilz, dem sogenannten Mycobionten (NASH 2008). Morphologisch werden Flechten in drei Gruppen eingeteilt: Die Krustenflechten, Blattflechten und Strauchflechten (NASH 2008). Eine Untergruppe der Krustenflechten bilden die leprösen Flechten. Lepröse Flechten haben einen einfachen Aufbau und unstrukturierten Thallus (NASH 2008). Flechten sind weltweit verbreitet und in fast allen terrestrischen Habitaten zu finden und häufig epiphytisch (NASH 2008). Sie können aber auch Steine und Boden besiedeln und sind somit Teil der organischen Kruste. Sie spielen eine wichtige Rolle in der Zersetzung und Entwicklung von Böden, im Energiefluss und Mineralkreislauf (NASH 2008).

Flechten sind poikilohyde Organismen und reagieren daher sehr empfindlich auf Emissions-Veränderungen, da sie sowohl Wasser als auch Nährstoffe über die Atmosphäre beziehen (NASH 2008). Zudem führt die Aufnahme von Wasser über Nebel und Tau, die höhere Stoffkonzentrationen aufweisen, die Aufnahme über die gesamte Thallusoberfläche und die fehlende Kontrolle über den Gaswechsel zu einer verstärkten Akkumulation von Schadstoffen (NASH 2008). Unterschiedliche Flechtenarten reagieren aber unterschiedlich stark auf Luftverunreinigungen und spezifische Schadstoffe mit verschiedenen ausgeprägten Toleranzen (NASH 2008). Daher können Flechten wie Pflanzen Zeigerwerte zugeteilt werden. 2010 veröffentlichte Volkmar Wirth seine erweiterte und überarbeitete Fassung mit sechs Zeigerwerten, der Lichtzahl L, der Temperaturzahl T, der Kontinentalitätszahl K, der Feuchtezahl F, der Reaktionszahl R und der Eutrophierungszahl N. Die Eutrophierungszahl N, ehemals Nährstoffzahl, gibt nun das Ausmaß der Eutrophierung an den üblichen Standorten wieder, in erster Linie durch die Zufuhr von Stickstoff-Verbindungen von

außen. Ein Wert für die Toxizität wird nicht mehr aufgeführt, da sich die lufthygienische Situation gänzlich geändert hat und die Werte vornehmlich an der SO_2 -Belastung orientiert waren (WIRTH 2010). Auf Grundlage dieser Zeigerwerte und weiteren Beobachtungen werden Flechten auch nach ihrem ökologischen Verhalten eingeteilt. Eutrophierungstolerante Flechten mit einer hohen Eutrophierungszahl sind nitrophytisch oder auch nitrophil. Flechten, die ein saures Substrat vorziehen und weniger eutrophierungstolerant sind, sind acidophytisch oder auch anitrophytisch. Flechten sind substratspezifisch, die Zusammensetzung von Flechtengemeinschaften an Bäumen ist vor allem abhängig von dem pH-Wert der Borke und der Sensibilität gegenüber toxischen Substanzen (VAN HERK 2001). Nitrophytische Arten bevorzugen einen hohen Borken-pH-Wert, acidophytische Arten haben eine hohe Sensibilität gegenüber NH_3 und verschwinden in Arealen mit Konzentrationen von mehr als 35 g/m^3 (VAN HERK 2001).

Seit dem 19. Jahrhundert wird bereits ein Rückgang der Flechten in urbanen Regionen in Europa beobachtet (NASH 2008). Maßgebend dafür waren beziehungsweise sind Schwefeldioxid, Fluorwasserstoff, Ozon, Düngemittel und Schwermetalle (ARNDT et al. 1987). Flechten werden daher als Bioindikatoren zur Erkennung des langjährigen Gesamteinflusses biologisch wirksamer Luftverunreinigungen verwendet (ARNDT et al. 1987). Zur Standardisierung der Flechtenkartierung veröffentlichte der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 1991 seine erste VDI-Richtlinie zu Flechtenkartierung (VDI 1991). Seitdem folgten weitere VDI-Richtlinien und teils wurden Richtlinien auch zurückgezogen. Flechten werden nicht nur zum Monitoring der Luftgüte eingesetzt, es können beispielsweise auch die Auswirkungen des Klimawandels (INSAROV & SCHROETER 2002) und die städtische Überwärmung (STAPPER & KRICKE 2004) beobachtet werden.

Mit Annäherung an Großstädte oder Industriegebiete nimmt die Vitalität, Flächen-

deckung, Individuen- und Artenanzahl ab und es kann zu einer Ausbildung von Flechtzonen kommen. Fehlen im Zentrum von Ballungsräumen Flechten vollkommen, so werden diese Zonen als Flechtenwüsten bezeichnet (ARNDT et al. 1987). Durch die Einführung verschiedener Maßnahmen zur Luftreinhaltung kommt es seit den 80er Jahren aber zu einer Wiedereinwanderung von Flechten in die Städte (ARNDT et al. 1987; FRANZEN-REUTER 2004; BELLARDTS 2020; BORCHARDT 2020). Dabei handelt es sich aber nicht um die ursprünglich vorhandenen Artgemeinschaften. Die aktuellen Luftverhältnisse begünstigen vor allem nitrophytische Arten, acidophytische und antrophytische Arten gehen stark zurück (WIRTH 2010).

1.3 Der Borken-pH-Wert als Bioindikator

Eine weitere Möglichkeit der Emissionsuntersuchung ist das Biomonitoring mit der Borke von Bäumen (BARGAGLI 1998). Dabei werden der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit und der Schwefelgehalt als allgemeine Messungen des Säuregehalts der Umwelt genutzt. Der pH-Wert der Borke wird von verschiedensten Faktoren beeinflusst, wie der Art, dem Alter des Baumes, der Gesundheit des Baumes, der Dicke der Borkenprobe und dem Bodentyp. Trotzdem korreliert der pH-Wert der Borke häufig mit der durchschnittlichen Schwefeldioxid-Konzentration in der Luft, dieser Zusammenhang ist stärker bei Laubbäumen als bei Nadelbäumen (BARGAGLI 1998). Der Elementargehalt der Borke eignet sich zur Messung von räumlich-zeitlichen Trends in der (Spuren-)Elementkontamination, die Deposition erfolgt vornehmlich durch trockene Deposition, den Aufprall von Luftpartikeln und durch den Stammabfluss (BARGAGLI 1998). Aufgrund dieses Zusammenhanges mit Emissionen haben sich auch die pH-Werte der Borke immer wieder geändert. Die hohen SO_2 -Konzentrationen führten im letzten Jahrhundert zu einer starken Ansäuerung der Borke

und dementsprechend einem niedrigen pH-Wert. Der Rückgang dieser Emissionen und der zeitgleiche Anstieg an eutrophierenden Emissionen führten in diesem Jahrhundert zu einer gegenteiligen Entwicklung: Der Borken-pH-Wert wird durch die basischen Emissionen angehoben (VAN HERK 2001).

1.4 Ziel dieser Studie

In den letzten 40 Jahren kam es zu großen Veränderungen in der Emissionsbelastung, Luftqualität, Flechtendiversität und den Borken-pH-Werten durch anthropogenes Handeln. Im Jahre 1981 wurde zuletzt eine flächendeckende Bestandsaufnahme der Flechten in Bielefeld und eine Borken-pH Wert-Messung durchgeführt (GERHARDT & GRÖSSER-HELLRIEGEL 1983). Um zu betrachten, was sich in den letzten 40 Jahren verändert hat, wie sich die Flechtendiversität mit der Emissionsbelastung verändert hat und ob sich die Borken-pH-Werte verändert haben, wurde die Studie von Gerhardt & Grösser-Hellriegel in dieser vorliegenden Arbeit wiederholt.

Spiegeln sich die allgemeinen Trends in der Emissionsbelastung auch in Bielefeld wieder?

Diese Studie behandelt zu diesen Fragen daher die folgenden Hypothesen:

1. Die Flechtendiversität hat zugenommen. Nitrophytische Arten kommen am häufigsten vor, acidophytische Arten sind seltener.
2. Der Borken-pH-Wert ist angestiegen. Durch die eutrophierenden Emissionen ist er nun aber höher als der von anthropogen verursachten Emissionen unbeeinflusste Borken-pH-Wert.
3. Im Untersuchungsgebiet existieren keine Flechtenwüsten mehr.

2 Das Untersuchungsgebiet

Die Stadt Bielefeld wurde auf Grundlage der Studie von Gerhardt & Größer-Hellriegel in 1 x 1 km große Raster eingeteilt (s. Abb. 2).

In dieser Studie wird von der dargestellten Fläche nur die 51 km² große Fläche im Nordwesten Bielefelds untersucht. Diese Fläche wird im Folgenden Untersuchungsgebiet (USG) genannt, das gesamte von GERHARDT & GRÖSSER-HELLRIEGEL 1981 untersuchte Gebiet Gesamtuntersuchungsgebiet (GUSG).

Die Stadt Bielefeld zählte zum Ende des Jahres 2020 333.509 Einwohner*innen. Mit einer Fläche von 258,82 km² ist Bielefeld die größte Stadt der Region Ostwestfalen-Lippe (STADT BIELEFELD 2021).

2.1 Klima

Nordrhein-Westfalen wird weitgehend ozeanisch geprägt und zählt zum warmgemäßigten Regenklima (KLIMAAATLAS NRW 2020). Die Jahresdurchschnittstemperatur betrug 2019 10,7 °C, der durchschnittliche Niederschlag 815 mm und die mittlere jährliche Sonnenscheindauer 1717 Stunden (DEUTSCHER WETTERDIENST 2020).

Die Jahresdurchschnittstemperaturen liegen in Bielefeld aufgrund der Mittelgebirgslage unter den NRW-Durchschnitt. Die mittlere Jahrestemperatur betrug im Zeitraum von 1991 bis 2020 9,8 °C (KLIMAAATLAS NRW 2020). Durch den Steigungsregen am Bielefelder Osning werden zudem die Niederschlagsmengen auf bis zu 1050 mm/a erhöht (LANUV 2021). Das Klima ist insgesamt also kühler und feuchter.

2.2 Geomorphologie

Die Stadt Bielefeld wird durch die naturräumlichen Großeinheiten Ravensberger Hügelland im Norden und Westen und den Bielefelder Osning, der sich von Nordwesten nach Südosten durch Bielefeld zieht, geprägt. Südöstlich des Osnings schließt sich in den Randgebieten Bielefelds die naturräumliche

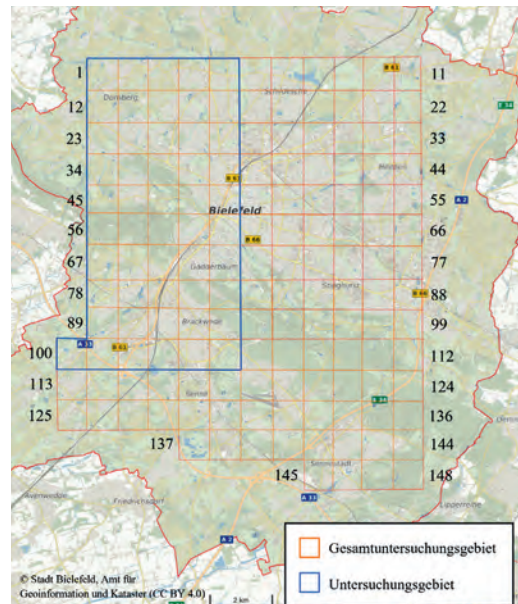


Abb. 2: Das Gesamtuntersuchungsgebiet auf Grundlage GERHARDT & GRÖSSER-HELLRIEGEL (1983). Blau umrandet ist das in dieser Studie betrachtete Untersuchungsgebiet dargestellt.

Fig. 2: The entire study area based on GERHARDT & GRÖSSER-HELLRIEGEL (1983). The study area considered in this study is outlined in blue.

Großeinheit Ostmünsterland an (LANUV 2021).

Das Untersuchungsgebiet wird von allen drei dieser Naturraumeinheiten beeinflusst und umfasst die Stadtteile Dornberg, Brackwede, Babenhausen, Gadderbaum und Bielefeld-Zentrum. Der Norden wird durch den Landschaftsraum Enger Hügelland geprägt. Der Bielefelder Osning mit den Landschaftsräumen Kirhdornberger Hügel- und Bergland, Östliches Osning-Vorland, Haller Osning und Osning-Kamm und Lippischer Wald zieht sich mittig von Nordwesten nach Südosten durch das Untersuchungsgebiet. Im Südwesten wird das Untersuchungsgebiet durch den Haller Sandhang, die Steinhagener Lehmplatte, die Stukenbrocker Lehmplatte und die Obere Senne beeinflusst (LANUV 2021). Das Untersuchungsgebiet und die Landschaftsräume sind in Abbildung 3 dargestellt.

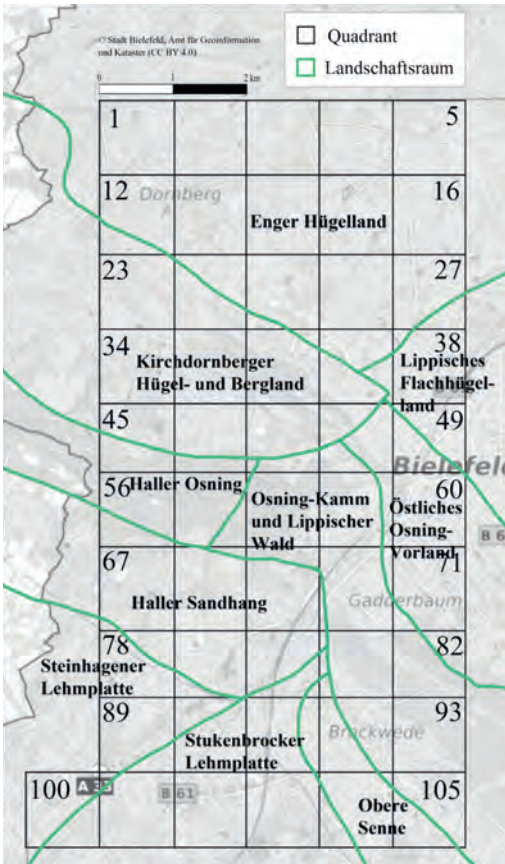


Abb. 3: Das Untersuchungsgebiet und die Landschaftsräume auf Grundlage der Landesinformationssammlung NRW (LANUV 2021).

Fig. 3: The study area and the landscape areas based on the State Information Collection NRW (LANUV 2021).

2.2.1 Das Ravensberger Hügelland

Das Ravensberger Hügelland ist ein mesozoisches Berg- und Hügelland. Durch die Else-Werre-Niederung ist es in das nördliche flachwellige Quernheimer Hügel- und Bergland und in das morphologisch bewegtere Herforder Hügelland im Süden getrennt. Der geologische Untergrund des Herforder Hügellandes besteht aus Gesteinen der oberen Trias und unteren Jura (LANUV 2021). Die häufigste Bodenart ist die Parabraunerde, welche teils pseudovergleyt ist, wenn wasserstauende

Gesteine im Untergrund liegen. Die potenziell natürliche Vegetation des Herforder Hügellandes ist der Flattergras-Buchenwald, der Waldbestand ist allerdings stark reduziert (LANUV 2021).

In das Untersuchungsgebiet hinein reichen die Landschaftsräume Lippisches Flachhügelland und Enger Hügelland. Das Enger Hügelland nimmt dabei den Norden des Untersuchungsgebietes ein, während das Lippische Flachhügelland nur ein wenig im Nordosten des Untersuchungsgebietes reinreicht (LANUV 2021). Geologisch wird der Landschaftsraum weitgehend von einer Liasmulde, der sogenannten Herforder Liasmulde, geprägt, welche großflächig mit Löss überlagert wurde. Das Gebiet wird vorwiegend agrarwirtschaftlich genutzt (LANUV 2021).

2.2.2 Der Bielefelder Osning und der Teutoburger Wald

Der Bielefelder Osning ist ein von Nordwesten nach Südosten verlaufendes mesozoisches Berg- und Hügelland. Der Schichtkamm (Osning) ist weithin über das Münsterland sichtbar. Im Norden schließen sich Vorberge an den Osning an, die aus zwei schmaleren Einzerrücken bestehen. Den geologischen Untergrund bilden Gesteine des Mesozoikums, dabei vor allem Muschelkalk und Sandstein (LANUV 2021). Der Osning selbst besteht hauptsächlich aus Sandstein, auch Osning-Sandstein genannt. Die im Nordwesten parallel zum Osning verlaufenden Schichtkämme sind aus Muschelkalk geformt. Der Schichtkamm-Charakter geht im Lipper Wald südöstlich des Haller und Brackweder Osning verloren und geht dort in ein breit angelegtes Bergland über. Die typischen Bodenbildungen über dem Carbonatgestein sind Rendzina und Braunerde-Rendzina, für den Sandstein sind podsolierte Böden charakteristisch (LANUV 2021). Der Osning-Kamm ist noch weitgehend bewaldet, die Mulde beim Haller-Osning wird

jedoch ackerbaulich genutzt. Im Bereich der Vorberge wechseln sich landwirtschaftliche Nutzflächen mit bewaldeten Kuppen oder Schichtkämmen ab. Die Kammregion ist bis auf verkehrstechnische Passorte gering bis unbesiedelt. Die natürliche potenzielle Vegetation sind Buchenwälder (LANUV 2021). Der Teutoburger Wald ist ein im Biotopverbund bedeutender Mittelgebirgskorridor mit überwiegend naturnah ausgeprägten und artentypischen Buchenwäldern. Zudem stellt er eines der größten und wichtigsten Waldgebiete für den Schutz der Waldmeister-Buchenwälder dar. Aufgrund seiner besonderen geologischen Beschaffenheit ist der Teutoburger Wald als Grundwassergefährdungsgebiet ausgewiesen. Früher wurden in dem Gebiet Sandstein- und Eisenerzabbau betrieben, heute wird teils noch Kalkstein abgebaut (LANUV 2021).

2.2.3 Das Ostmünsterland

Das Ostmünsterland bildet das östliche und nördliche Randgebiet der „Westfälischen Tieflandsbucht“ und ist eine durch basenarme Substrate geprägte Moränen- und Terrassenlandschaft. Das weitgehend ebene Gebiet wird durch zahlreiche Gewässer zerschnitten. Ein bewegteres Relief mit sich allmählich anschließenden Sanderflächen entsteht in Annäherung an den Bielefelder Osning im Nordosten (LANUV 2021). Der tiefere geologische Untergrund wird von Gesteinen der Oberkreide gebildet, darauf aufgelagert sind Bildungen der saaleeiszeitlichen Grundmoräne. Örtlich stehen Geschiebelehme oberflächennah an. Die Nordmünsterländer Sande schließen sich nördlich der Ems bis nahe an den Osning an (LANUV 2021). Südöstlich der Nordmünsterländer Sande schließen sich die Nordmünsterländer Lehmplatten an. Hier wird das Landschaftsgefüge von einer Reihe von Geschiebelehminseln bestimmt. Das Gebiet der Senne folgt nach Osten und zieht sich entlang des Bielefelder Osning hin (LANUV

2021). In der Oberen Senne liegt der Grundwasserspiegel weiter unter Flur, daher ist das Gebiet recht wasserarm. Die Böden des Ostmünsterlandes sind zu einem überwiegenden Teil deutlich bis stark grundwasserbeeinflusst. Als natürliche potenzielle Vegetation ergeben sich daraus feuchtigkeitsliebende Waldformen. Das Ostmünsterland wird intensiv landwirtschaftlich genutzt, große Waldgebiete existieren nur noch im Bereich der Senne oder auf Dünenfeldern. Einzelhöfe und Streusiedlungen herrschen vor. Zu Ziegeleizwecken wurden früher die oberflächennah anstehenden Geschiebelehme der Nordmünsterländer Lehmplatten abgebaut (LANUV 2021).

2.3 Konflikte zwischen Nutzung und Naturraum

Wesentliche Konflikte zwischen menschlicher Nutzung und Naturraum stellen im Untersuchungsgebiet die Zersiedlung, die Siedlungserweiterung, der Ausbau von Straßen und Wegenetzen, Eingriffe in den Wasserhaushalt, der naturferne Zustand vieler Gewässer, die Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung, Verkehrsemissionen und Schad- und Nährstoffeinträge aus umliegenden Flächen auf Magerstandorte (LANUV 2021).

3 Material und Methoden

3.1 Kartierung und Probennahme

Das Untersuchungsgebiet wurde in 51 1x1 km Quadranten eingeteilt, basierend auf der Studie „Untersuchungen zur epiphytischen Flechtenvegetation im Raum Bielefeld“ von GERHARDT & GRÖSSER HELLRIEGEL (1983). In jeden Quadranten wurde möglichst mittig ein Stationsbaum ausgewählt. Zusätzlich wurden maximal 10 Bäume im Umkreis von 200 m betrachtet. Ab 50 cm Stammhöhe wurden die vorkommenden Flechten notiert, dabei wurde

unterschieden, ob sie am Stationsbaum oder im Umkreis vorkamen. Als Bestimmungsliteratur dienten Ulmers Taschenatlas Flechten und Moose (WIRTH & DÜLL 2018) und Flechten von Nord- und Mitteleuropa: Ein Bestimmungsbuch (MOBERG et al. 1992). Lepröse Flechten wurden auch aufgenommen, aber nicht bis auf die Art bestimmt.

Zusätzlich wurden kategorisierte Standortparameter aufgenommen: Die Flächennutzung, Baumart, Stammdurchmesser, Wuchsform, Stammlänge, Borke, Standort, Entfernung von großen und kleinen Hindernissen, Windsituation, Wassersituation, Lichtsituation, Deckungsgrad aller Flechten, Vitalität der Flechten, Verkehr und Geländeform. Die Parameter Stammdurchmesser, Wuchsform und Entfernung wurden gemessen und die Baumart bestimmt, die restlichen Parameter wurden vor Ort geschätzt. Zur quantitativen Analyse des pH-Wertes wurden Proben der Borke mit einer Bügelziehhacke genommen.

3.2 Aufbereitung der Borkenproben

Die Borkenproben wurden im Trockenschrank (T5025, Heraeus, Hanau, Deutschland) für 6 Tage bei 105 °C getrocknet und anschließend mit einer Schwingmühle (RETSCH MM400, Retsch GmbH, Haan, Deutschland) für 2 min bei 400 bpm homogenisiert. 1,4 g der Proben wurde eingewogen und in Zentrifugenröhrchen (50 ml) (Falcon Tubes, Corning B.V. Life Sciences, Amsterdam, Niederlande) überführt und mit 20 ml destilliertem Wasser versetzt. Von jeder Probe wurde jeweils eine Parallele angefertigt. Mithilfe von Schüttelgeräten (IKA Labortechnik KS 250 basic und IKA-Werke HS501 digital, IKA-Werke GmbH & Co. KG, Staufen, Deutschland) wurden die Proben für 4 Stunden kräftig geschüttelt. Vor der Messung wurde das pH-Meter (pH 50 Violab (Bench Meter), Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe, Deutschland) mit zwei Pufferlösungen mit den pH-Werten 7,00 und 4,01

kalibriert. Der pH-Wert wurde dann direkt in der unfiltrierten Suspension gemessen.

3.3 Aufbereitung der Studie von Gerhardt & Größer-Hellriegel

Ein wesentlicher Unterschied in der Vorgehensweise zu der Studie von Gerhardt & Größer-Hellriegel und dieser Studie liegt darin, welche Flechten aufgenommen wurden. In dieser Studie wurden nur die epiphytische Flechten, welche am Stamm wachsen, betrachtet. Flechten, die an der Baumbasis wuchsen, wurden nicht kartiert. Auch wurden lepröse Flechten nicht genauer bestimmt und als eine Art gewertet. In dieser Studie wurde zudem auch nur ein Teil des Gesamtuntersuchungsgebietes von 51 km² betrachtet. Es wird daher zwischen dem Gesamtuntersuchungsgebiet GUSG und dem Untersuchungsgebiet USG unterschieden. Die Unterschiede in der Flechtenkartierung wurden bei der Aufbereitung der Ergebnisse aus 1981 berücksichtigt, indem die Arten, die an der Stammbasis gefunden wurden, nicht gewertet wurden und die leprösen Flechten zu einer Art zusammengefasst wurden.

Eine Sonderstellung nimmt hierbei das ehemalige Gebiet der Voruntersuchung im Nordwesten des Untersuchungsgebietes (Quadranten 1, 2, 3, 12, 13, 14, 23, 24, 25, 34, 35, 36) ein. Hier wurden in der Studie von Gerhardt & Größer-Hellriegel circa 2000 Bäume untersucht, unabhängig von Art und Zustand und es wurden keine Stationsbäume beprobt. Für diesen Bereich liegen daher keine Daten über die Flechtendiversität und den Borken-pH-Wert vor. Lediglich über die Flechtenzonen konnten Rückschlüsse auf die vorgefundene Artenzahl getroffen werden, die Werte für diesen Bereich sind dementsprechend Schätzwerte. Zudem wurden die zusätzlich gefundenen epiphytischen Flechtenarten diesem Bereich zugesprochen. Die Voruntersuchung wurde in dieser Studie nicht wiederholt.

3.4 Statistische Auswertung

Die aufgenommenen Daten wurden in Microsoft Excel (Version Microsoft 365, Microsoft Corporation, Redmond, USA) aufbereitet. Die Darstellung in Diagrammen erfolgte mit Origin 2021b (Version 9.8.5.212 (Lehre), OriginLab Corporation, Northampton, USA). Zum Vergleich der Daten aus 1981 und 2021 wurde der Pearson Chi-Quadrat Test und bei Bedarf der exakte Fisher-Test durchgeführt. Als Statistikprogramm wurde RStudio Desktop (Version 1.4.1717, RStudio Incorporated, Boston, USA) verwendet.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse 2021

4.1.1 Standortparameter

Insgesamt wurden 51 Bäume beprobt. Am häufigsten wurde *Quercus robur* beprobt, gefolgt von *Tilia platyphyllos*. Vereinzelt wurden zudem *Pyrus communis*, *Malus domestica* und *Acer pseudoplatanus* beprobt (Abb. 4).

Die erhobenen Daten zur Flächennutzung sind in Abbildung 5 dargestellt. Bei der Flächennutzung wurde zwischen Kernbebau-

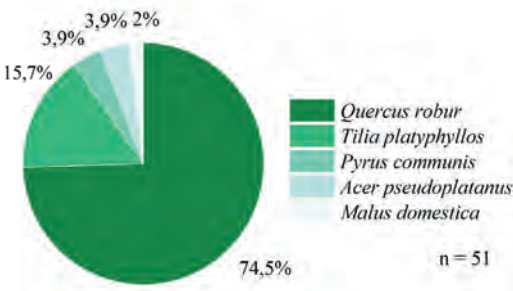


Abb. 4: Darstellung der beprobten Baumarten in Prozent, n = 51.

Fig. 4: Depiction of the sampled tree species in percent, n = 51.

ung, lockerer Bebauung, Dorf, Industriegebiet, Parkanlage, Friedhof, Privatgarten, Brache, Wiese, Weide, Acker und Wald unterschieden. Einem Quadranten konnten auch mehrere Flächennutzungen zugesprochen werden. Am häufigsten wurde in lockerer Bebauung, Parkanlagen, Wäldern und an Äckern kartiert (Abb. 5).

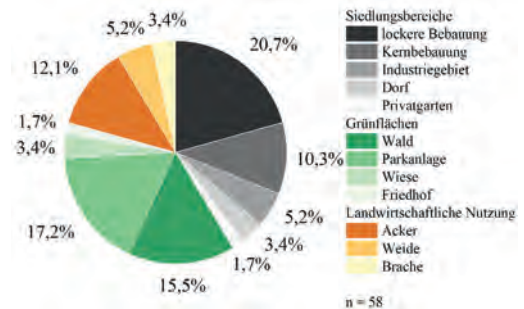


Abb. 5: Darstellung der Flächennutzung. Die verschiedenen Kategorien wurden nochmals in Überkategorien eingeteilt und farblich abgegrenzt. Siedlungsbereiche sind in Graustufen dargestellt, Grünflächen in grün und Flächen der landwirtschaftlichen Nutzung in orange, n = 58.

Fig. 5: Depiction of the land use. The different categories were additionally categorised in upper categories and differentiated in color. Settlement areas are depicted in shades of grey, Green areas in green and agricultural areas in orange, n = 58.

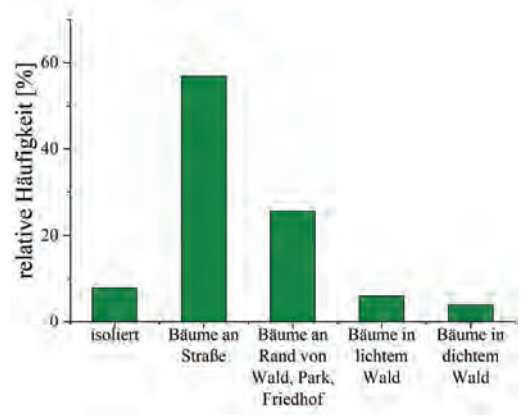


Abb. 6: Darstellung der relativen Häufigkeit der verschiedenen Standorte, n = 51.

Fig. 6: Depiction of the relative frequency of the different locations, n = 51.

Der Großteil der Stationsbäume befindet sich an Straßen, gefolgt von Bäumen am Rand von Wäldern, Friedhöfen und Parkanlagen. Vereinzelt standen die Stationsbäume auch isoliert oder in lichten und dichten Wäldern (Abb. 6).

An allen Stationsbäumen wurde ein Flechtenbewuchs festgestellt, es lag also immer ein Deckungsgrad der Flechten über 0% vor. An den meisten Stationsbäumen lag der geschätzte Deckungsgrad aller Flechten zwischen 1 bis 20 %, gefolgt von 41 bis 80 % und 21 bis 40 %. An 4 Stationsbäumen wurde ein Deckungsgrad zwischen 81 und 100 % festgestellt.

Der Standortfaktor Verkehr ist in Abbildung 7 dargestellt. Straße wurden hierbei als befestigte bzw. geteerte Weg für Automobile definiert. Zufahrten, Fahrrad-, Feld-, und Wanderwege stellen keine Straßen dar. Der Großteil der Stationsbäume befand sich an keinen Straßen (35,3 %) und lediglich leicht befahrenen Straßen (29,4 %). 23,5 % befanden sich an mittel befahrenen Straßen und 11,8 % an stark befahrenen Straßen.

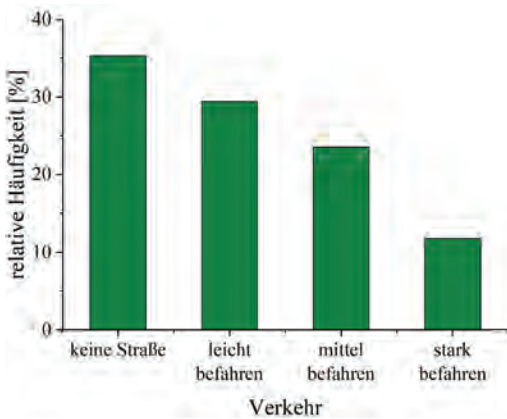


Abb. 7: Darstellung der relativen Häufigkeit des Verkehrs, n = 51. Eine Straße ist definiert als ein befestigter/ geteierter Weg für Automobile. Zufahrten, Fahrradwege, Feld- und Wanderwege stellen keine Straßen dar.

Fig. 7: Depiction of the relative frequency of traffic, n = 51. A street is defined as a paved/tarred path for automobiles. Driveways, bikeways, dirt roads and trails do not count as streets.

4.1.2 Flechtenkartierung

Es wurden 35 verschiedene Flechtenarten in den 51 Quadranten kartiert, lepröse Flechten wurden hierbei als eine Art betrachtet. Davon waren 22 Arten Blattflechten, 7 Krustenflechten und 6 Strauchflechten. Insgesamt wurden über die 51 Quadranten 603 Flechten kartiert. Daraus wurde die relative Häufigkeit für die verschiedenen Lebensformen berechnet, welche in Abbildung 8 dargestellt ist. Mit 74,1 % dominieren die Blattflechten, gefolgt von den Krustenflechten mit 20,8 %. Strauchflechten machen mit 5,1 % nur einen kleinen Anteil aus (Abb. 8).

Die häufigsten Flechten waren *Physcia adscendens* (51), *Xanthoria parietina* (51), *Candelaria concolor* (50) und *Physcia tenella* (49). Diese vier Arten wurden in fast jedem Raster vorgefunden. Häufig kamen *Parmelia sulcata* (43), *Lecidella elaeochroma* (37), *Parmelia subrudecta* (37), *Candelariella* sp. (35), *Phaeophyscia orbicularis* (34), *Melanohalea exasperatula* (33) und *Amandinea punctata* (32) vor. Seltener wurden *Lepröse Flechten* (20), *Flavoparmelia caperata* (17), *Evernia prunastri* (14), *Ochrolechia turneri* (14), *Parmelia saxatilis* (11), *Melanelixia glabratula* (10), *Hypogymnia physodes* (10) und *Cladonia digitata* (10) angetroffen. Vereinzelt wurden *Physcia stellaris* (7), *Physconia grisea* (6), *Plamatia glauca* (6), *Ramalina farinacea* (4),

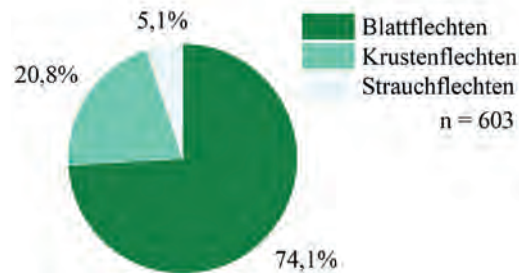


Abb. 8: Darstellung der prozentualen Verteilung der Lebensformen der betrachteten Flechten, n = 603.

Fig. 8: Depiction of the percentage distribution of the lichen live forms, n = 603.

Lecanora chlorotera (4), *Lecanora carpinea* (3), *Physcia aipolia* (3), *Hypogymnia tubolosa* (2), *Melanelixia subargentifera* (2) und *Physconia persidiosa* (2) angesprochen. Nur jeweils ein Exemplar wurde von *Cladonia pyxidata*, *Flavopunctelia flaventior*, *Pseudovernia furfuracea*, *Punctelia jeckeri*, *Usnea dasopoga* und *Xanthoria polycarpa* vorgefunden.

In Abbildung 9 ist die räumliche Verteilung der Flechtendiversität dargestellt. Durchschnittlich wurden pro Quadrant 11,8 Flechtenarten vorgefunden. Am meisten Flechten wurden im Quadranten 24 gefunden mit 23 Flechtenarten, am wenigsten im Quadrant 69 mit 4 Flechtenarten.

Es wurden 10 nitrophytische Arten vorgefunden (s. Spalte ökologisches Verhalten in Tabelle 1). Von den 583 (ohne lepröse Flech-

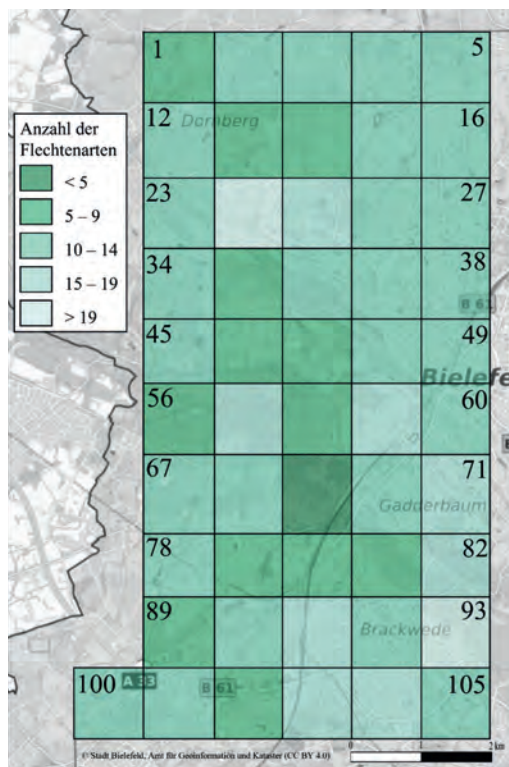


Abb. 9: Darstellung der Anzahl der Flechtenarten in Klassen pro Quadranten.

Fig. 9: Depiction of the amount of lichen species in classes per quadrant.

ten) angesprochenen Individuen sind 352 nitrophytische Arten, dies entspricht 60,4 %. Der Anteil der 14 acidophytischen Arten liegt bei 14,4 % an Individuen. Die 10 neutrophytischen Arten machen 25,2 % der angesprochenen Individuen aus. Obwohl die nitrophytischen Arten nur 29 % (also 10 von den 35 Arten) der vorgefundenen Artenvielfalt ausmachen, dominieren sie mit 60,4 % in der Frequenz (Vorkommen in den 51 Quadranten) in der sie vorkommen.

4.1.3 Borken-pH-Werte

Die Ergebnisse der pH-Wert Messung der Borke sind in Abbildung 10 dargestellt. Durchschnittlich wurde ein pH-Wert von 5 gemessen, der niedrigste pH-Wert lag bei 4,2, der höchste bei 5,9. 50 % der pH-Werte lag zwischen 4,7 und 5,2. Die höchsten durchschnittlichen pH-Werte wurden bei *Tilia platyphyllos*, *Malus domestica* und *Acer pseudoplatanus* gemessen, welche zwischen 5,3 und 5,4 liegen, die Borke dieser Bäume ist also basischer als im Gesamtdurchschnitt. Der durchschnittliche pH-Wert von *Quercus robur* ist mit 4,9 leicht saurer als im Gesamtdurchschnitt. Die sauerste Borke wurde bei *Pyrus communis* mit einem durchschnittlichen pH-Wert von 4,7 gemessen mit. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass die Stichprobengröße für die Baumarten *Acer pseudoplatanus*, *Malus domestica* und *Pyrus communis* lediglich 2 bzw. 1 beträgt.

4.2 Vergleich der Ergebnisse aus den Jahren 1981 und 2021

Zusammenfassend traf die Studie von Gerhardt & Größer-Hellriegel über das Gesamtuntersuchungsgebiet (GUSG) folgende Aussagen: 66 % aller Stationsbäume zeigten nur einen Flechtenbewuchs mit *Lepraria incana* und *Lecanora conizaeoides* auf. Insgesamt wurden 31 verschiedene Arten kartiert, inklu-

sive Arten, die nur an der Baumbasis gefunden wurden. Im Untersuchungsgebiet (USG) wurden 9 verschiedene Flechtenarten an Stationsbäumen kartiert: *Amandinea punctata*, *Candelariella xanthostigma*, *Hypocenomyce scalaris*, *Hypogymnia physodes*, *Physcia tenella*, *Lecanora conizaeoides*, *Lecanora chlorotera*, *Lecanora muralis* und *Lepraria incana*. Hinzu kamen 9 Arten, die im Gebiet der Voruntersuchung angetroffen wurden: *Physcia adscendens*, *Candelariella aurella*, *Cladonia fimbriata*, *Evernia prunastri*, *Pleurosticta acetabulum*, *Parmelia tiliacea*, *Pertusaria albescens*, *Physcia caesia* und *Xanthoria parietina*. Insgesamt liegen von den 35 Arten des GUSG also 18 im USG vor.

Die größte beobachtete Flechtendiversität (ohne *Lepraria incana*) in einem Quadranten im USG lag 1981 bei 4 Arten. 2021 lag die geringste beobachtete Flechtendiversität bei 4, die höchste bei 23. Die Flechtendiversität pro Quadrant ist also deutlich gestiegen. Auch wurden 2021 17 Arten mehr im USG vorgefunden, die Artendiversität hat sich in 40 Jahren also fast verdoppelt. Auch die gesamte Flechtenhäufigkeit in allen 51 Quadranten ist rapide angestiegen, so wurden 1981 insgesamt 69 Flechten vorgefunden und 2021 603 Flechten. Die vorgefundenen Flechtenarten, ihre Lebensformen, ihre Häufigkeiten im Jahr 1981 und 2021, ihre Nährstoffzahlen N, ihr ökologisches Verhalten und ihre Ökologie und Verbreitung sind zusammengefasst in Tabelle 1 dargestellt.

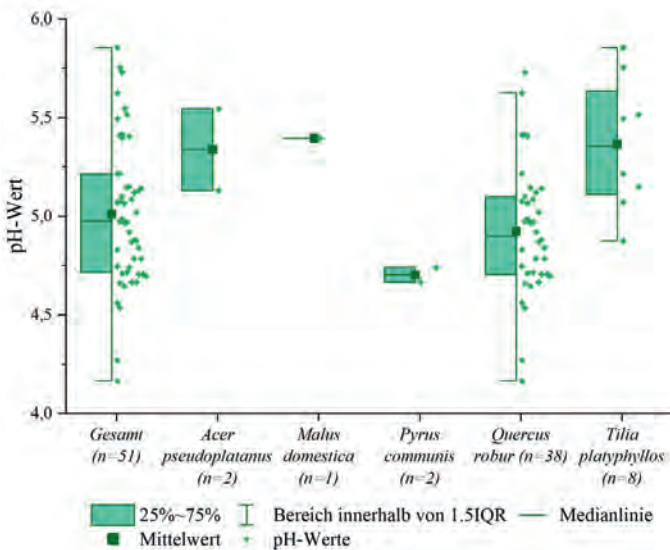


Abb. 10: Darstellung der pH-Wert Messung der Borke als halbes Boxplot mit Messpunkten. Von links nach rechts sind alle pH-Werte (n = 51) zusammen dargestellt und dann aufgeschlüsselt nach den Baumarten *Acer pseudoplatanus* (n = 2), *Malus domestica* (n = 1), *Pyrus communis* (n = 2), *Quercus robur* (n = 38) und *Tilia platyphyllos* (n = 8). Im Kasten liegen 25 bis 75 % aller Werte, die Antennen reichen bis zum Maximal bzw. Minimalwert. Die Linie kennzeichnet den Median, das Quadrat den Mittelwert.

Fig. 10: Depiction of the bark pH-value as a half box plot with measuring points. From right to left: All pH-values (n = 51), pH-values of *Acer pseudoplatanus* (n = 2), *Malus domestica* (n = 1), *Pyrus communis* (n = 2), *Quercus robur* (n = 38) and *Tilia platyphyllos* (n = 8). In the box are 25 to 75 % of values, the antennae reach to the maximum or minimum. The line marks the median, the square marks the average.

4.2.1 Vergleich der Lebensformen

Auch die Zusammensetzung der Lebensformen hat sich geändert, welche in Abbildung 11 dargestellt ist. 1981 wurden gleich viele Blatt- und Krustenflechten gefunden und nur 2 Strauchflechten. 2021 wurden überwiegend Blattflechten vorgefunden, der prozentuale Anteil der Krustenflechten nahm schwach signifikant ab und der prozentuale Anteil der Strauchflechten nahm schwach signifikant zu.

4.2.2 Vergleich des ökologischen Verhaltens

In Abbildung 12 sind die relativen Häufigkeit der acidophytischen und nitrophytischen Arten über das USG dargestellt. Als acidophytisch

Flechtenart	Lebensform	1984	2021	N	R	Ök	Ökologie und Verbreitung
<i>Amandinea punctata</i>	K	4	32	7	5	N	Auf nährstoffreicher, eutrophierter Borke; recht unempfindlich gegenüber Luftschadstoffen und Düngung; häufig
<i>Candelaria concolor</i>	B		50	7	6	N	Nährstoffreiche- und basenreiche Rinde; ziemlich selten
<i>Candelariella</i> sp.: <i>Candelariella aurella</i> und <i>Candelariella xanthostigma</i>	K	1 1	35	7 - 9	5 - 9	N	Nährstoffreiche Rinde; ziemlich häufig
<i>Cladonia digitata</i>	S		10	3	2	A	Saures Substrat; mäßig häufig; durch Eutrophierung rückgängig
<i>Cladonia fimbriata</i>	S	1		3	4	A	Lichtreich; mäßig häufig
<i>Cladonia pyxidata</i>	S		1	3	-	A	Schattig bis lichtreich; mäßig häufig
<i>Evernia prunastri</i>	S	1	14	4	3	A	Häufigste epiphytische Strauchflechte, mäßig nährstoffreiche bis arme, ± saure Rinde; ziemlich häufig
<i>Flavoparmelia caperata</i>	B		17	4	5	A	Mäßig bis ziemlich saure Rinde; empfindlich gegen saure und eutrophierende Emissionen; ziemlich häufig
<i>Flavopunctelia flaventior</i>	B		1	6	4	Ne	
<i>Hypocenomyce scalaris</i>	B	2		2	2	A	Saure, nährstoffarme Rinde; mäßig häufig/ziemlich selten
<i>Hypogymnia physodes</i>	B	2	10	3	3	A	Saure Rinde; zurückgehend
<i>Hypogymnia tubolosa</i>	B		2	4	5	A	Mäßig saure bis basenreiche Rinde; mäßig häufig; zunehmend; verträgt mäßige Eutrophierung aus Luft
<i>Lecanora carpinea</i>	K		3	4	5	A	Mäßig häufig
<i>Lecanora chlorotera</i>	K	1	4	5	6	Ne	Nährstoff- o. basenreiche Rinde; mäßige Empfindlichkeit gegen Eutrophierung; mäßig häufig
<i>Lecanora conizaeoide</i>	K	42		5	2	A	Hohe Säureresistenz; heute selten und nur auf natürlich saurer Rinde
<i>Lecanora muralis</i>	K	1		9	8	N	Hohe Toxitoleranz, eutrophierungstolerant
<i>Lecidella elaeochroma</i>	K		37	5	6	Ne	Mäßig häufig
Lepröse Flechten u.a. <i>Lepraria incana</i>	K	45	20	5	3	A	Saure Rinde; Häufig
<i>Melanelixia glabrata</i>	B		10	5	6	Ne	Saure, mäßig nährstoffreiche Rinde; mäßig häufig
<i>Melanelixia subargentifera</i>	B		2	6	7	Ne	Nährstoffreiche bzw. basenreiche Rinde; ziemlich selten, gefährdet

Tab. 1: Flechtenart, Lebensform (K = Krustenflechte, B = Blattflechte, S = Strauchflechte), Häufigkeit in 1981 und 2021, Eutrophierungszahl (Düngungstoleranz) N (WIRTH 2010), ökologisches Verhalten (N = Nitrophyt, A = Acidophyt, Ne = Neutrophyt) und die Ökologie und Verbreitung in Europa (WIRTH & DÜLL 2018).

Tab. 1: Lichen species, life form (K = crustose, B = foliose, S = fruticose), frequency in 1981 and 2021, eutrophication number (fertilization tolerance) N (WIRTH 2010), ecological behavior (N = nitrophyt, A = acidophyt, Ne = neutrophyt) and the ecology and distribution in Europe (WIRTH & DÜLL 2018).

Flechtenart	Lebensform	1984	2021	N	R	Ök	Ökologie und Verbreitung
<i>Melanohalea exasperatula</i>	B		33	3	6	Ne	Nährstoffreiche Rinde; mäßig häufig
<i>Ochrolechia turneri</i>	K		14	5	5	Ne	
<i>Parmelia saxatilis</i>	B		11	3	3	A	Saure Rinde; ziemlich selten
<i>Punctelia subrudecta</i>	B		37	5	4	Ne	Plus/minus saure Rinde; mäßig häufig
<i>Parmelia sulcata</i>	B		43	7	5	N	Häufigste Laubflechte an schwach saurer bis neutraler, nährstoffreicher Rinde; breite ökologische Amplitude
<i>Parmelina tiliacea</i>	B	1		6	5	Ne	Nährstoffreiche, mäßig saure Rinde; ziemlich selten
<i>Pertusaria albescens</i>	K	1		6	6	Ne	Eutrophierung tolerierend; mäßig häufig
<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	B		34	9	7	N	Basenreiche oder staubimprägnierte Borke; häufig
<i>Physcia adscendens</i>	B	1	51	8	7	N	Nährstoffreiche, staubimprägnierte Rinde; Zunahme durch Eutrophierung; häufig
<i>Physcia aipolia</i>	B		3	5	7	Ne	
<i>Physcia caesia</i>	B	1		9	8	N	Zunehmend durch Eutrophierung; mäßig häufig
<i>Physcia stellaris</i>	B		7	6	6	Ne	Nährstoff- zumindest basenreiche Rinde; mäßig häufig
<i>Physcia tenella</i>	B	7	9	7	6	N	Nährstoffreiche, oft staubimprägnierte Rinde; häufig, zunehmend
<i>Physconia grisea</i>	B		6	8	6	N	Besonders auf staubimprägnierter Rinde; mäßig häufig
<i>Physconia persidiosa</i>	B		2	4	6	A	Auf Laubbäumen mit poröser Rinde (reiche Rinden-Flechtengesellschaft)
<i>Platismatia glauca</i>	B		6	2	2	A	Saure, nährstoffarme Rinde; mäßig häufig
<i>Pleurosticta acetabulum</i>	B	1		5	7	Ne	Nährstoffreiche, zumindest basenreiche Rinde; mäßig häufig
<i>Pseudovernia furfuracea</i>	S		1	2	3	A	Lichtreich, saure Rinde; mäßig häufig
<i>Punctelia jeckeri</i>	B		1	6	4	Ne	Mäßig häufig
<i>Ramalina farinacea</i>	S		4	4	5	A	Mäßig häufig
<i>Usnea dasopoga</i>	S		1	2	3	A	Durch Eutrophierung rückgängig, gefährdet
<i>Xanthoria parietina</i>	B	1	51	8	7	N	Nährstoffreiche Rinde; starke Zunahme durch Stickstoffzufuhr; häufig
<i>Xanthoria polycarpa</i>	B		1	8	7	N	Nährstoffreiche Rinde; hoher pH; Zunahme durch Eutrophierung; ziemlich häufig

Tab. 1 (Fortsetzung)

Tab. 1 (Continuation)

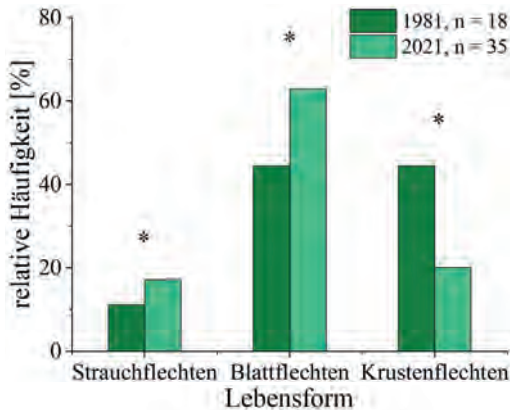


Abb. 11: Vergleich der relativen Häufigkeit der Lebensformen 1981 (n = 18) und 2021 (n = 35). Die * zeichnen das Signifikanzniveau, dabei bedeutet * = schwach signifikant mit $p < 0,05$, ** = signifikant mit $p < 0,01$ und *** = hoch signifikant mit $p < 0,001$.

Fig. 11: Comparison of the relative frequency of the life forms in 1981 (n = 18) and 2021 (n = 35). The * marks the level of significance, * = weakly significant with $p < 0,05$, ** = significant with $p < 0,01$, *** = highly significant with $p < 0,001$.

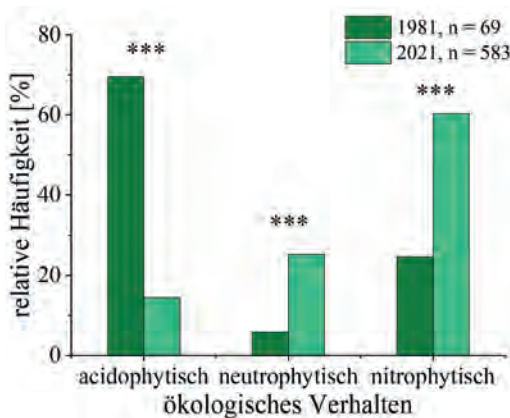


Abb. 12: Vergleich der relativen Häufigkeit der ökologischen Verhaltens 1981 (n = 69) und 2021 (n = 583). Die * zeichnen das Signifikanzniveau, dabei bedeutet * = schwach signifikant mit $p < 0,05$, ** = signifikant mit $p < 0,01$ und *** = hoch signifikant mit $p < 0,001$.

Fig. 12: Comparison of the relative frequency of the ecological behavior in 1981 (n = 69) and 2021 (n = 583). The * marks the level of significance, * = weakly significant with $p < 0,05$, ** = significant with $p < 0,01$, *** = highly significant with $p < 0,001$.

gelten Arten mit einer Reaktionszahl und/oder Eutrophierungszahl < 4 . Als nitrophytisch gelten Arten mit einer Eutrophierungszahl > 7 . Arten, die weder acido- noch nitrophytisch sind werden als neutrophytisch bezeichnet. Im Jahre 1981 überwogen die acidophytischen Arten mit mehr als 70 %, nitrophytische Arten machten gut ein Fünftel aus. Es kamen kaum neutrophytische Arten vor. Diese Arten nahmen 2021 hoch signifikant zu, auch der Anteil der nitrophytischen Arten hat sich mehr als verdoppelt. Die acidophytischen Arten hingegen haben stark signifikant abgenommen und machen 2021 den geringsten Anteil aus.

4.2.3 Vergleich der 6 häufigsten Arten

In Abbildung 13 ist die Häufigkeit der sechs am häufigsten kartierten Arten von 1981 (ausgenommen *Lepraria incana*) dargestellt und mit ihrer Häufigkeit im Jahre 2021 verglichen. *Hypogymnia physodes* und *Cladonia* sp. haben leicht zugenommen, sind in ihrer Häufigkeit im Vergleich mit allen 2021 gefundenen Arten aber im unteren Spektrum anzutreffen.

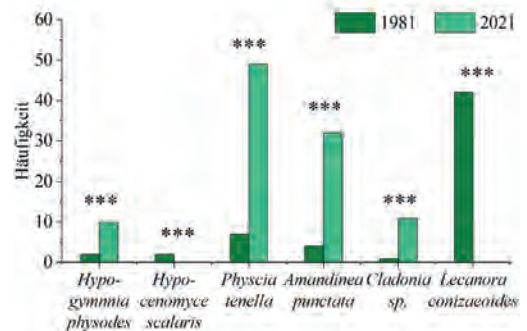


Abb. 13: Vergleich der Häufigkeit der sechs häufigsten kartierten Arten 1981 und 2021. Die * zeichnen das Signifikanzniveau, dabei bedeutet * = schwach signifikant mit $p < 0,05$, ** = signifikant mit $p < 0,01$ und *** = hoch signifikant mit $p < 0,001$.

Fig. 13: Comparison of the frequency of the six most commonly found species in 1981 and 2021. The * marks the level of significance, * = weakly significant with $p < 0,05$, ** = significant with $p < 0,01$, *** = highly significant with $p < 0,001$.

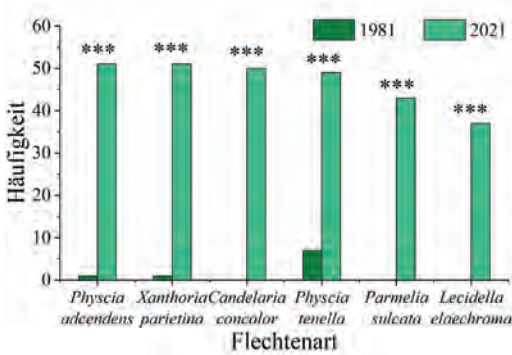


Abb. 14: Vergleich der Häufigkeit der sechs häufigsten kartierten Arten 2021 und 1981. Die * zeichnen das Signifikanzniveau, dabei bedeutet * = schwach signifikant mit $p < 0,05$, ** = signifikant mit $p < 0,01$ und *** = hoch signifikant mit $p < 0,001$.

Fig. 14: Comparison of the frequency of the six most commonly found species in 2021 and 1981. The * marks the level of significance, * = weakly significant with $p < 0,05$, ** = significant with $p < 0,01$, *** = highly significant with $p < 0,001$.

Physcia tenella und *Amandinea punctata* nahmen beide sehr stark zu. *Hypocenomyce scalaris* und *Lecanora conizaeoides* wurde beide im Untersuchungsgebiet nicht mehr gefunden. Die Unterschiede im Vorkommen der Arten sind hoch signifikant.

In Abbildung 14 ist die Häufigkeit der sechs am häufigsten kartierten Arten von 2021 dargestellt und mit ihrer Häufigkeit im Jahre 1981 verglichen. Alle sechs Arten haben deutlich zugenommen. *Candelaria concolor*, *Parmelia sulcata* und *Lecidella elaeochroma* kamen 1981 noch gar nicht im Untersuchungsgebiet vor. *Physcia adscendens* und *Xanthoria parietina* wurden 1981 lediglich jeweils einmal kartiert, während beide Arten 2021 in jedem Quadranten beobachtet werden konnten. Von den sechs häufigsten Arten 2021 gehört nur *Physcia tenella* auch zu den sechs häufigsten Arten von 1981. Auch hier sind die Unterschiede im Vorkommen der Arten hoch signifikant.

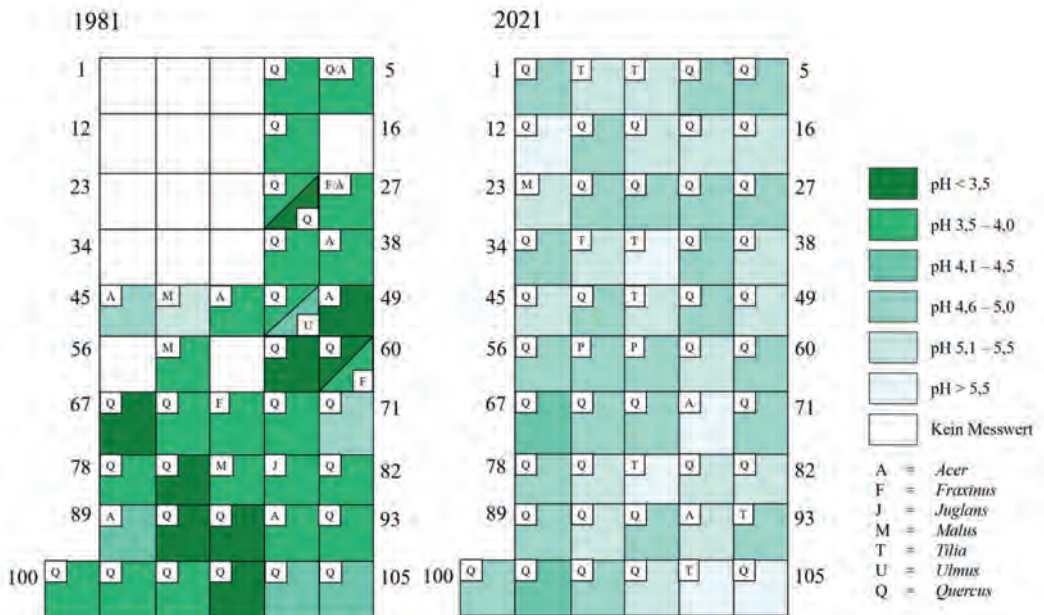


Abb. 15: Vergleich der Borken-pH-Werte 1981 und 2021 dargestellt als Karte. Die pH-Werte wurden in Klassen eingeteilt, die Art des Stationsbaumes des Quadranten wurde mit einem Buchstaben gekennzeichnet. Als Grundlage der linken Karte diente die Studie von Gerhardt & Größer-Hellriegel.

Fig. 15: Comparison of the bark pH-values in 1981 and 2021 depicted as a map. The pH-values were divided up in classes, the tree species of the quadrant is marked with a letter. The left map is based on the study of Gerhardt & Größer-Hellriegel.

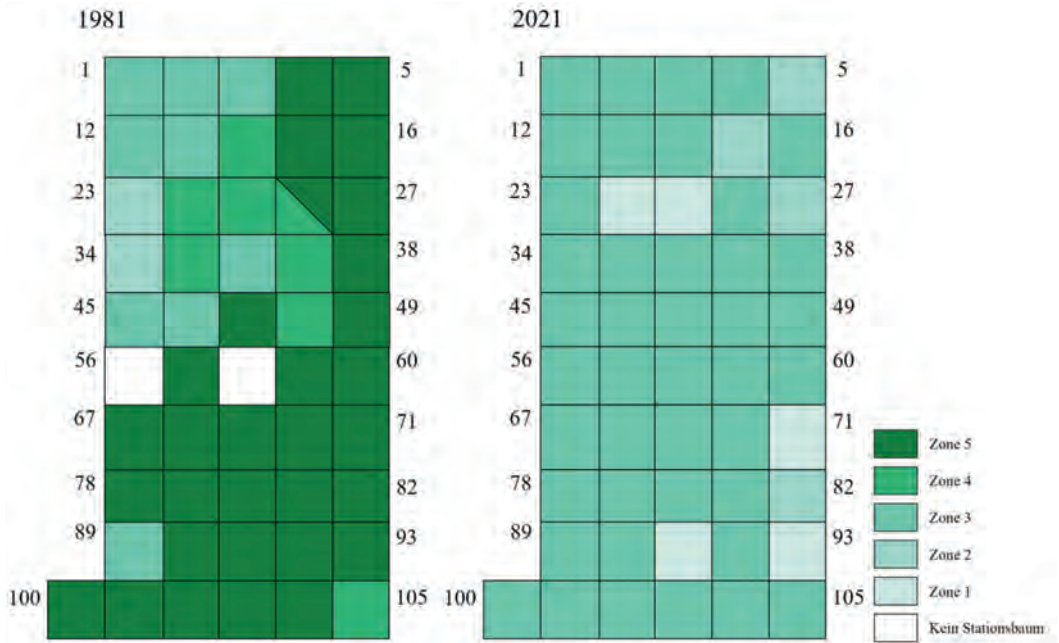


Abb. 16: Vergleich der Flechtenzonen 1981 und 2021. Als Grundlage der linken Karte diente die Studie von GERHARDT & GRÖSSER-HELLRIEGEL (1983).

Fig. 16: Comparison of the lichen zones in 1981 and 2021. The left map is based on the study of GERHARDT & GRÖSSER-HELLRIEGEL (1983).

Flechtenzonen	
1	Flechten unbeschädigt, es überwiegen acidophytische Arten. Typische Arten: <i>Platismatica glauca</i> , <i>Evernia prunastri</i> , <i>Parmelina tiliacea</i> (< 50 % nitrophytische Arten und mehr als drei rein acidophytische Arten).
2	Acido- und nitrophytische Arten kommen bereits – bei gut entwickelten Thalli – nahezu gleich häufig vor, z. B. <i>Parmelia saxatilis</i> , <i>Parmelia sulcata</i> , <i>Parmelia glabratula</i> , <i>Pleurosticta acetabulum</i> (< 50 % nitrophytische Arten und bis zu drei rein acidophytische Arten).
3	Die nitrophytischen Flechten herrschen vor, z. B. <i>Physcia tenella</i> , <i>Physcia adscendens</i> , <i>Xanthoria candelaria</i> . Diese Arten treten vereinzelt auch schon in Zone 2 auf, sind dann jedoch auf die Stammbasis beschränkt (mehr als 50 % nitrophytische Arten).
4	Krustenflechten sind typisch, z. B. <i>Amandinea punctata</i> , <i>Lecanora hagenii</i> , <i>Candelariella xanthostigma</i> . Blattflechten treten nur noch ganz vereinzelt auf. Sie sind oft geschädigt und wachsen versteckt in Borkenritzen, z. B. <i>Hypogymnia physodes</i> , <i>Hypocenomyce scalaris</i> oder <i>Physcia tenella</i> . Der Deckungsgrad beträgt maximal 5 %.
5	Keine Blattflechten mehr vorhanden. Als Krustenflechte nur noch <i>Lecanora conizaeoides</i> .

Tab. 2: Bewertungskriterien zur Einteilung der Flechtenzonen aus der Studie von GERHARDT & GRÖSSER-HELLRIEGEL (1983). In Klammern sind die zusätzlichen Bewertungskriterien dieser Studie angegeben, die auf dem ökologischen Verhalten der vorgefundenen Arten basieren.

Tab. 2: Evaluation criteria for the lichen zone classification based on GERHARDT & GRÖSSER-HELLRIEGEL (1983). In Parenthesis are the additional evaluation criteria for this study, based on the ecological behavior.

4.2.4 Vergleich der Borken-pH-Werte

Die Borken-pH-Werte sind in den 40 Jahren stark angestiegen (Abbildung 15). Lagen 1981 noch die meisten pH-Werte zwischen 3,5 und 4, so liegen 2021 die meisten 4,6 und 5. Zudem wurden 2021 auch keine pH Werte unter 3,5 oder zwischen 3,5 und 4 gemessen und lediglich 2 zwischen 4,1 und 4,5. 1981 wurde in nur einem Quadranten ein pH Wert zwischen 5,1 und 5,5 gemessen und kein pH-Wert über 5,5. 2021 hingegen wurde in sechs Quadranten ein pH Wert über 5,5 gemessen.

4.3.5 Vergleich der Flechtenzonen

Gerhardt & Größer-Hellriegel teilten in ihrer Studie die Quadranten auf Grundlage ihrer Flechtendiversität und -vitalität 5 verschiedenen Flechtenzonen zu. Die Bewertungskriterien sind in Tabelle 2 aufgelistet. Nach diesen Bewertungskriterien wurden auch die Quadranten 2021 in Flechtenzonen eingeteilt. Die räumliche Verteilung dieser Flechtenzonen ist in Abbildung 16 dargestellt.

1981 dominierte die Zone 5, auch Flechtenwüste genannt, das USG. Nur im nordwestlichen Teil des USG und im Quadranten 89 und 105 wurden auch die Zonen 2, 3 und 4 vorgefunden. Die Zone 1 lag im USG 1981 gar nicht vor. 2021 dominiert die Flechtenzone 3 das USG, in der nitrophytische Arten vorherrschen. Nur vereinzelt wurde die Zone 2 und 1 vorgefunden.

5 Diskussion

5.1 Die Flechtendiversität

5.1.1 Die Flechtendiversität 2021

Im Untersuchungsgebiet wurden insgesamt 35 verschiedene epiphytische Flechten kartiert. In der Häufigkeit des Auftretens domi-

nieren die nitrophytischen Flechten. Die Stadt Bielefeld kann mit der Stadt Bonn verglichen werden, welche eine ähnliche Einwohnerzahl hat. Im September 2020 wurde in Bonn eine Flechtenkartierung zur Bestimmung der Luftgüte durchgeführt (BELLARDTS 2020). Dabei wurden 47 Arten vorgefunden. Zu beachten ist jedoch, dass bei dieser Studie nach der VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13 vorgegangen wurde, es wurden daher mehr Bäume beprobt und teils auch in kleineren Rastern. Zudem wurden vorwiegend Trägerbäume mit einer subneutralen Borke beprobt, welche meist einen höheren Flechtenbewuchs aufweisen (VDI 2005). Es ist also nicht zwangsläufig der Fall, dass die Flechtendiversität in Bielefeld geringer ist als in Bonn. Das Arteninventar der Stadt Bielefeld ist vermutlich noch größer als die in dieser Studie aufgeführten Arten. Eine weiterführende flächendeckende Untersuchung, im Idealfall nach der VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, könnte das Arteninventar noch erweitern und weitere Aufschlüsse über die Flechtendiversität in der Stadt Bielefeld liefern.

10 der 35 kartierten Flechten gelten als nitrophytisch, mit 60,4 % der angesprochenen Individuen dominieren sie in der Flechtenflora. Die 14 acidophytischen Arten machen nur einen Anteil von 14,4 % aus. Dies spiegelt sich auch bei den vier häufigsten Arten, die in fast jedem Quadranten vorgefunden wurden, *Physcia adscendens*, *Xanthoria parietina*, *Candelaria concolor* und *Physcia tenella* wider. Alle vier Arten sind nitrophytische Blattflechten. Ähnliche Zusammensetzungen der Arten wurden auch in anderen deutschen Städten aufgezeichnet. In Bonn wurde 2020 ein Anteil der nitrophytischen Arten von 79 % beobachtet (BELLARDTS 2020). Auch in Wetzlar und Gießen wurde zwischen 1985 und 2010 eine stetige Zunahme der Eutrophierungszeiger erfasst (KIRSCHBAUM et al. 2012). Damit einher geht die gleichbleibende Belastung der eutrophierenden Luftverunreinigungen (UMWELTBUNDESAMT 2021). Die Stadt Bielefeld wird sowohl stark durch landwirtschaftliche als auch verkehrsbedingte Stickstoffemissionen

belastet. Ein Zusammenhang zwischen der Stickstoffbelastung und der Dominanz der nitrophytischen Arten ist folglich zu vermuten und konnte in anderen Studien auch bereits nachgewiesen werden (FRATI et al. 2007; BOLTERS DORF & WERNER 2013). Auch hier könnte eine weitere Kartierung mit einer Analyse des Stickstoffanteils der Flechten weitere Erkenntnisse liefern, da so auch quantitative Daten verglichen werden könnten.

5.1.2 Vergleich 1981 und 2021

Im Jahre 1981 wiesen 66 % aller Stationsbäume in der Stadt Bielefeld lediglich einen Flechtenbewuchs mit *Leprairia incana* und *Lecanora conizaeoides* auf. Im Gesamtuntersuchungsgebiet wurden 31 verschiedene Arten kartiert, 18 davon in dem in dieser Studie erneut untersuchtem Untersuchungsgebiet. Im Jahre 2021 wurden allein im Untersuchungsgebiet 35 Arten kartiert, die Flechtendiversität hat sich in 40 Jahren damit fast verdoppelt und übertrifft auch die von (GERHARDT & GRÖSSER-HELLRIEGEL 1983) für die gesamte Stadt Bielefeld festgehaltene Artendiversität. Auch die beobachtete Flechtenanzahl pro Quadrant ist rapide angestiegen. Während 1981 die größte beobachtete Flechtendiversität 4 Arten in einem Quadranten wurden ist dies 2021 nun die geringste beobachtete Flechtendiversität. Der Höchstwert pro Quadrant liegt bei 23. Die gesamte Flechtenhäufigkeit ist ebenfalls angestiegen. Im Jahre 1981 wurden 69 Flechten im Untersuchungsgebiet vorgefunden, 2021 fast das neunfache mit 603 Flechten. Ähnlich drastische Veränderungen in der Flechtendiversität und -zusammensetzung wurden auch in Augsburg (GUMPP & FRIEDMANN 2010), Bonn (BELLARDTS 2020) und London (LARSEN et al. 2007) erfasst. Die Hypothese, dass die Flechtendiversität zugenommen hat und nitrophytische Arten nun dominieren kann folglich unterstützt werden. Diese Entwicklung ist nicht nur in Bielefeld, sondern europaweit zu sehen.

Acidophytische Arten überwiegen im

Jahre 1981 mit mehr als 70 %, nitrophytische Arten machten nur gut ein Fünftel aus und neutrophytische Arten kamen kaum vor. Bei den neutrophytischen Arten kam es zu einer hoch signifikanten Zunahme und auch der Anteil der nitrophytischen Arten hat sich mehr als verdoppelt. Acidophytische Arten kommen hingegen kaum noch vor und machen nun den geringsten Anteil aus. Deutschlandweit geht der Trend zu einer Abnahme der anthropogen geförderten Acidophyten, welche überlagert wird mit der ebenfalls anthropogen geförderten Zunahme der Nitrophyten (WIRTH 2010). Zurückzuführen ist dies auf die Abnahme der sauren Luftverunreinigungen und die zeitgleiche Zunahme der eutrophierenden Luftverunreinigungen (BATES et al. 2001). Die Flechtendiversität spiegelt somit eine generelle Verbesserung der lufthygienischen Lage in Deutschland wider, weist aber gleichzeitig auf eine neue Belastung hin. Ähnlich wie acidophytische Arten, die bei den sehr hohen sauren Schadstoffkonzentrationen in Flechtenwüsten verschwunden sind, verschwinden teilweise inzwischen auch nitrophytische Arten, wenn die Stickstoff-Belastung zu hoch wird. So wurde in Düsseldorf ein Rückgang der nitrophytischen Flechten, wie *Amandinea punctata* und *Physcia tenella*, an stark belasteten Standorten beobachtet. Das Vorkommen von *Phaeophyscia orbicularis* und *Phaeophyscia nigrans* wird durch eine hohe Verkehrsbelastung hingegen gefördert (STAPPER & KRICKE 2004).

Diese Trends stellen sich auch bei den sechs am häufigsten gefundenen Arten dar. Von den 1981 häufigsten Arten kommen zwei, *Hypocenyomyce scalaris* und *Lecanora conizaeoides*, gar nicht mehr vor. Nitrophytische Arten, wie *Physcia tenella* und *Amandinea punctata*, haben sehr stark zugenommen. Die nitrophytische Arten *Candelaria concolor*, *Parmelia sulcata* und *Lecidella elaeochroma* kamen 1981 noch gar nicht vor und gehören 2021 zu den sechs häufigsten Arten. *Physcia adscendens* und *Xanthoria parietina*, die 1981 je nur einmal kartiert wurden, kommen 2021

in jedem Quadranten vor. Vor allem das gänzliche Verschwinden der acidophytischen Krustenflechte *Lecanora conizaeoides* ist bemerkenswert. Die einst durch die Schwefeldioxidbelastung geförderte und damit sehr häufige Flechte wird in Deutschland und Europa seltener und zieht sich auf saure Substrate zurück, da sie an einen pH-Wert von 3 adaptiert ist (WIRTH 1993; BATES et al. 2001; HAUCK et al. 2011). Ihr Rückzug kann schon durch kleine pH-Wert Änderungen von 0,4 eingeleitet werden (HAUCK et al. 2011). Die deutliche Abnahme von *Lecanora conizaeoides* kann sehr schnell von statten gehen. Wirth stellte in Baden-Württemberg bereits 1991 eine rapide Abnahme innerhalb von fünf Jahren fest, die auf die sinkenden sauren Immissionen zurückgeführt werden kann (WIRTH 1993). Ein völliges Fehlen der Flechte ist heute keine Seltenheit mehr (LARSEN et al. 2007; BELLARDTS 2020).

5.2 Der Borken-pH-Wert

Der durchschnittlich gemessene pH-Wert von 5 entspricht einer mäßig sauren Rinde oder auch einer Reaktionszahl von 5 (VDI 2003). Der niedrigste gemessene pH-Wert von 4,2 entspricht einer ziemlich sauren Rinde, der höchste pH-Wert von 5,9 einer subneutralen Rinde (VDI 2003). Die Hälfte aller gemessenen pH-Werte liegen zwischen 4,7 und 5,2 und damit im ziemlich bis mäßig saurem Bereich. Unter natürlichen Bedingungen ist die Borke von *Quercus robur* und *Pyrus communis* mäßig sauer (pH-Wert von 4,9 bis 5,6), die Borke der Baumarten *Acer pseudoplatanus*, *Tilia platyphyllos* und *Malus domestica* hingegen ist unter natürlichen Bedingungen subneutral (pH-Wert von 5,7 bis 7,5) (VDI 2005). Borken-pH-Werte im subneutralen Bereich werden zwar erreicht, die Durchschnittswerte der einzelnen Baumarten liegen aber alle im mäßig sauren Bereich, bei *Pyrus communis* mit 4,7 sogar im ziemlich sauren Bereich. Die Stichprobengröße für die Baumarten *Acer pseudoplatanus*, *Malus domestica* und *Pyrus*

communis ist jedoch mit 2 bzw. 1 sehr klein und daher nur bedingt aussagekräftig. Ähnliche Borken-pH-Werte werden bei *Tilia* spp. auch in Wetzlar und Gießen beobachtet mit einem pH-Wert um 5, der pH-Wert für *Malus domestica* ist mit 6,5 allerdings wesentlich höher (KIRSCHBAUM et al. 2012). Der in dieser Studie gemessene pH-Wert von 5,4 für *Tilia platyphyllos* ist leicht höher als in Wetzlar und Gießen. Die gemessenen pH-Werte für *Tilia platyphyllos* und *Quercus robur* entsprechen in Bielefeld annähernd denen unter natürlichen Bedingungen.

Die Veränderung der Flechtendiversität steht im Zusammenhang mit der Veränderung der Borken-pH-Werte, welche in den vergangenen 40 Jahren stark angestiegen sind. 1981 lagen die meisten pH-Werte zwischen 3,5 und 5, 2021 zwischen 4,6 und 5. Grund für den Anstieg der Borken-pH-Werte ist maßgeblich der Rückgang der Schwefeldioxidemissionen (BATES et al. 2001). Die Zunahme der eutrophierenden Emissionen beschleunigt durch ihre basische Wirkung den Anstieg der pH-Werte (FRAHM & SOLGA 1999). Das Anheben des Borken-pH-Wertes ist ein wesentlicher Faktor bei der erneuten Ansiedelung von Flechtengesellschaften in den Städten, da Flechten sehr substratspezifisch sind (VAN HERK 2001). Eutrophierende Emissionen begünstigen daher nitrophytische Flechten nicht nur aufgrund der Erhöhung der Nährstoffe, sondern vor allem auch durch die Erhöhung des Borken-pH-Wertes. Die vorgefundenen Flechtengemeinschaften entsprechen aufgrund der Nährstoffanreicherung daher allerdings nicht denen, die vor der Industrialisierung vorzufinden waren, obwohl die Borken-pH-Werte wieder annähernd den natürlichen Verhältnissen entsprechen (FRAHM & SOLGA 1999).

Der durchschnittliche Borken-pH-Wert im Untersuchungsgebiet ist innerhalb von 40 Jahren angestiegen und entspricht nun wieder fast den Borken-pH-Werten unter natürlichen Verhältnissen. Die Hypothese, dass die eutrophierenden Emissionen den pH-Wert so stark erhöhen, dass der pH-Wert höher ist als

unter natürlichen Verhältnissen, kann für den durchschnittlichen pH-Wert nicht unterstützt werden. Einige pH-Werte der Borke von *Quercus robur* liegen jedoch durchaus schon im subneutralen Bereich über 5 und sind damit untypisch hoch (VAN HERK 2001). Eine weitere Beobachtung des Borken-pH-Wertes in Bielefeld wäre daher wünschenswert, um die weitere Entwicklung zu erfassen.



Abb. 17: Stationsbaum. Foto: I. Schröder.

Fig. 17: Sample tree. Picture: I. Schröder.



Abb. 18: Gewöhnliche Gelbflechten (*Xanthoria parietina*). Foto: S. Boltersdorf.

Fig. 18: Common orange lichen. Picture: S. Boltersdorf.

5.3 Flechtenwüsten

Flechtenwüsten dominierten 1981 das Untersuchungsgebiet. Die Flechtenzone 3, bei der nitrophytische Arten vorherrschen, dominiert 2021. Vereinzelt tritt auch die Flechtenzone 1 und 2 auf, 1981 kam die Flechtenzone 1 gar nicht vor. Eine Einordnung der nitrophytischen Arten ist in diesem



Abb. 19: Typische Flechtengesellschaft unter weniger anthropogenem Stickstoffeinfluss. Foto: S. Boltersdorf.

Fig. 19: Typical lichen community under low anthropogenic nitrogen influence. Picture: S. Boltersdorf.



Abb. 20: Typische Flechtengemeinschaft in Bielefeld (*Parmelia sulcata*, *Xanthoria parietina*, *Physcia tenella*, *Physcia adscendens*, *Candelaria concolor*, *Candelariella* spec.). Foto: S. Boltersdorf.

Fig. 20: Typical lichen community in Bielefeld (*Parmelia sulcata*, *Xanthoria parietina*, *Physcia tenella*, *Physcia adscendens*, *Candelaria concolor*, *Candelariella* spec.). Picture: S. Boltersdorf.

Modell der Flechtenzonierung und aufgrund des Studiendesign allerdings schwierig, da nur das Vorkommen und nicht die Frequenz untersucht wurde. Eine Zonierung dieser Art ist in zeitgenössischen Studien nicht mehr üblich, da Flechtenwüsten nur noch äußerst selten angetroffen werden. Zudem werden bestimmte Zeigerarten, wie Eutrophierungszeiger, gegenüber Referenzarten gewichtet, um so Rückschlüsse über die Luftqualität und eutrophierenden Einflüsse zu ziehen (VDI 2005). Die Zonierung in Flechtenzonen wurde mit der Vereinheitlichung der Flechtenkartierung durch den Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 1991 mit der Einteilung in Luftgütezone abgelöst (VDI 1991). Auch die VDI-Richtlinien müssen immer wieder aktualisiert werden und an die aktuellen Erkenntnisse angepasst werden (VDI 2003, 2005). Trotzdem zeigt der Vergleich der Flechtenzonen zwischen 1981 und 2021 im Untersuchungsgebiet eine allgemeine Erholung der Flechtengemeinschaften auf und eine Verbesserung der Emissionsbelastung durch saure Luftschadstoffe. Die Hypothese, dass im Jahre 2021 im Untersuchungsgebiet keine Flechtenwüsten mehr existieren, wird somit unterstützt.

6 Fazit

Die Flechtendiversität in Bielefeld hat sich mit der Veränderung in der Emissionsbelastung nachweislich gewandelt. Sowohl die Flechtendiversität als auch die Borken-pH-Werte sind angestiegen. Nitrophytische Arten sind dabei sehr dominant, acidophytische Arten sind stark zurückgegangen. Das Nicht-Vorhandensein von Flechtenwüsten ist als äußerst positive Entwicklung zu betrachten. Die starke Dominanz der nitrophytischen Flechten hingegen sollte kritisch beobachtet werden, da die Gefahr der Verdrängung und Aussterbens stickstoffintoleranterer und weniger konkurrenzfähiger Flechten besteht.

Zur weiteren Beobachtung und Erforschung der Flechtendiversität und Emissionsbelastung in Bielefeld wäre eine flächendeckende Flechtenkartierung nach der aktuellen VDI-Richtlinie wünschenswert. Zudem wäre eine Beobachtung des Borken-pH-Wertes sinnvoll.

Literatur/References

- ARNDT, U., NOBEL W. & SCHWEIZER, B., 1987: Bioindikatoren. Möglichkeiten, Grenzen u. neue Erkenntnisse ; 102 Tab. Ulmer, Stuttgart.
- BARGAGLI, R., 1998: Trace elements in terrestrial plants. An ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. Springer [u.a.], Berlin [u.a.].
- BATES, J., BELL, J. & MASSARA, A., 2001: Loss of *Le-canora conizaeoides* and other fluctuations of epiphytes on oak in S.E. England over 21 years with declining SO₂ concentrations. *Atmospheric Environment* **35** (14), 2557–2568.
- BEGON, M., HOWARTH, R. W. & TOWNSEND, C. R., 2017: Ökologie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- BELLARDTS, J., 2020: Epiphytische Flechten und Moose als Bioindikatoren der Luftqualität im Stadtgebiet von Bonn unter besonderer Berücksichtigung der räumlichen Verbreitungsmuster.
- BOLTERS DORF, S. & WERNER, W., 2013: Source attribution of agriculture-related deposition by using total nitrogen and $\delta^{15}\text{N}$ in epiphytic lichen tissue, bark and deposition water samples in Germany. *Isotopes in environmental and health studies* **49** (2), 197–218.

- BORCHARDT, J., 2020: Zeitlicher Vergleich der epiphytischen Flechten- und Moosvegetation als Bioindikatoren der Luftqualität im Stadtgebiet Bonn.
- DEUTSCHER WETTERDIENST, 2020: Klimastatusbericht Deutschland. Jahr 2019. https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (Aufruf: 17.03.2020).
- EUA, 2020: Luftverschmutzung. <https://www.eea.europa.eu/de/themes/air/intro> (Aufruf: 23.11.2020).
- FRAHM, J.-P. & SOLGA, A., 1999: Der Einfluß von Stickstoffemissionen auf Moose und Flechten. Bryologische Rundbriefe **24**, 1–6.
- FRANZEN-REUTER, I., 2004: Untersuchungen zu den Auswirkungen atmosphärischer Stickstoffeinträge auf epiphytische Flechten und Moose im Hinblick auf die Bioindikation.
- FRATI, L., SANTONI, S., NICOLARDI, V., GAGGI, C., BRUNIALTI, G., GUTTOVA, A., GAUDINO, S., PATI, A., PIRINTSOS, S. A. & LOPPI, S., 2007: Lichen bio-monitoring of ammonia emission and nitrogen deposition around a pig stockfarm. Environmental pollution (Barking, Essex: 1987) **146** (2), 311–316.
- GERHARDT, A. & GRÖSSER-HELLRIEGEL, C., 1983: Untersuchungen zur epiphytischen Flechtenvegetation im Raum Bielefeld. Mit 8 Abbildungen und 6 Tabellen. Berichte des Naturwissenschaftlichen Vereins Bielefeld e. V. **26**, 161–206.
- GEUPEL, M., RICHTER, S. & SCHLESINGER, L., 2021: Stickstoff – Element mit Wirkung.
- GUMPP, A. & FRIEDMANN, A., 2010: Die Luftgüte im Stadtgebiet Augsburg 2008. Bestimmung mittels Flechtenkartierung und ein Vergleich mit dem Jahr 1985. Berichte des Naturwissenschaftlichen Vereins für Schwaben **114**, 56–72.
- HAUCK, M., OTTO, P. I., DITTRICH, S., JACOB, M., BADE, C., DÖRFLER, I. & LEUSCHNER, C., 2011: Small increase in substratum corrected pH causes the dieback of one of Europe's most common lichens, *Lecanora conizaeoides*. Annals of botany **108** (2), 359–366.
- INSAROV, G. & SCHROETER, B., 2002: Lichen Monitoring and Climate Change. In: NIMIS, P. L., SCHEIDEGGER, C., WOLSELEY, P. A. (Hrsg.): Monitoring with Lichens — Monitoring Lichens, 183–201. Springer Netherlands, Dordrecht.
- KESSINGER, S., MINKOS, A., DAUERT, U., FEIGENSPAN & S., 2021: Luftqualität 2020. Vorläufige Auswertung, 26.
- KIRSCHBAUM, U., CEZANNE, R., EICHLER, M., HANEWALD, K. & WINDISCH, U., 2012: Long-term monitoring of environmental change in German towns through the use of lichens as biological indicators: comparison between the surveys of 1970, 1980, 1985, 1995, 2005 and 2010 in Wetzlar and Giessen. Environ Sci Eur **24** (1).
- KLIMAATLAS NRW, 2020: Das Klima in NRW. https://www.klimaatlas.nrw.de/klima_nrw#:~:text=Nordrhein%2DWestfalen%20z%C3%A4hlt%20zum%20warm,allen%20Monaten%20ausreichend%20Nieder-schlag%20f%C3%A4hlt. (Abruf: 2020).
- LANUV, 2021: Landschaftsinformationssammlung NRW (@LINFOS). <http://infos.naturschutzinformationen.nrw.de/atlinfos/de/atlinfos> (Abruf: 2018).
- LARSEN, R. S., BELL, J. N. B., JAMES, P. W., CHIMONIDES, P. J., RUMSEY, F. J., TREMPER, A. & PURVIS, O. W., 2007: Lichen and bryophyte distribution on oak in London in relation to air pollution and bark acidity. Environmental pollution (Barking, Essex : 1987) **146** (2), 332–340.

- MOBERG, R., HOLMASEN, I. & JÜLICH, U., 1992: Flechten von Nord- und Mitteleuropa. Ein Bestimmungsbuch. Fischer, Stuttgart.
- NASH, T. H. (Hrsg.), 2008: Lichen biology. Cambridge University Press, Cambridge, Second edition.
- STADT BIELEFELD, 2021: Statistik kompakt. https://www.bielefeld.de/sites/default/files/datei/2021/Bielefeld_Statistik_kompakt_Bevoelkerung2020.pdf (Abruf: 31.12.2020).
- STAPPER, N. J. & KRICKE, R., 2004: Epiphytische Moose und Flechten als Bioindikatoren von städtischer Überwärmung, Standorteutrophierung und verkehrsbedingten Immissionen. *Limprichtia* (24), 187–208.
- UMWELTBUNDESAMT, 2015: Stickstoffüberschuss – ein Umweltproblem mit neuem Ausmaß. Umweltbundesamt für ambitionierte Minderungsstrategie. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/stickstoffueberschuss-ein-umweltproblem-neuem> (Abruf: 08.01.2015).
- UMWELTBUNDESAMT, 2020: Ammoniak. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschaedstoffe-im-ueberblick/ammoniak#emittenten-quellen-fur-ammoniak-in-der-landwirtschaft> (Abruf: 23.06.2020).
- UMWELTBUNDESAMT, 2021: Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990. Emissionsentwicklung 1990 bis 2019. Stand 01/2021. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschaedstoff-emissionen-in-deutschland#entwicklung-der-luftschaedstoffbelastung>
- VAN HERK, C. M., 2001: Bark pH and susceptibility to toxic air pollutants as independent causes of changes in epiphytic lichen composition in space and time. *The Lichenologist* 33 (5), 419–442.
- VDI, 1991: VDI 3799 Blatt 2. Messung von Immissions-Wirkungen; Ermittlung und Beurteilung phytotoxischer Wirkungen von Immissionen mit Flechten; Verfahren der standardisierten Flechtenexposition, 14.
- VDI, 2003: VDI 3957 Blatt 8. Flächenbestimmung epiphytischer Flechten zur ökologischen Langzeitbeobachtung. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft (Band 1a), 16.
- VDI, 2005: VDI 3957 Blatt 13. Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen mit Flechten (Bioindikation) Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für Luftgüte. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft (Band 1a), 27.
- WIRTH, V., 1993: Trendwende bei der Ausbreitung der anthropogen geförderten Flechte *Lecanora conizaeoides*? *phyto* 23 (1–4), 625–636.
- WIRTH, V., 2010: Ökologische Zeigerwerte von Flechten – Erweiterte und Aktualisierte Fassung. *Herzogia* 23 (2), 229–248.
- WIRTH, V. & DÜLL, R., 2018: Ulmers Taschenatlas Flechten und Moose. 290 Arten schnell erkennen. Ulmer, Stuttgart, [2. Auflage].