

## 25 Jahre AG Biologie / Ökologie an der TU Bergakademie Freiberg – eine Bilanz zu Lehre und Forschung

### 25 years of Biology & Ecology Unit at the TU Bergakademie Freiberg – an overview on teaching and research

Hermann Heilmeyer, Roland Achtziger, André Günther, Elke Richert, Oliver Wiche

**Zusammenfassung:** In diesem Beitrag wird eine Übersicht zu Lehre und Forschung der Arbeitsgruppe Biologie / Ökologie am Institut für Biowissenschaften der TU Bergakademie seit ihrer Gründung im Jahr 1996 gegeben. Im Zeitraum vom Wintersemester 1996 bis zum Sommersemester 2022 wurden 56 Lehrveranstaltungen entwickelt und angeboten, hauptsächlich für die Studiengänge Geoökologie und Angewandte Naturwissenschaft. Im gleichen Zeitraum wurden insgesamt 314 studentische Arbeiten (160 Studien-/Bachelorarbeiten, 136 Diplom-/Masterarbeiten, 17 Dissertationen) betreut. Die meisten Arbeiten wurden im Studiengang Geoökologie und in den Forschungsgebieten Biozönologie, Populationsbiologie, Landschaftsökologie und Ökophysiologie/Bodenökologie/Phytomining durchgeführt. Bei den in den Freilandarbeiten untersuchten Biotop- und Landschaftstypen dominierte die Bergbaufolgelandschaft (34 % der Arbeiten), gefolgt von Still- und Fließgewässern sowie Grünland- und Siedlungsbereichen. Als Beispiele für entwickelte Lehrmaterialien werden das Pflichtartenheft, das Pflichtartenmerkheft und spezielle OPAL-Kurse vorgestellt. Anhand von 16 von der Arbeitsgruppe bearbeiteten Forschungsprojekten wird gezeigt, dass sich die Schwerpunkte der Forschung von anfangs eher konzeptionellen Forschungs- und Entwicklungsprojekten auf Bundes-, Landes- und Regionalebene (z. B. Nachhaltigkeitsindikator für Artenvielfalt und Landschaftsqualität in Deutschland, Artenschutzkonzept Sachsen) hin zu mehr angewandten Projekten in den Bereichen Naturschutz/Biotop- und Landschaftsmanagement (z. B. EU-Projekt zum FFH-Monitoring mittels Fernerkundung) und Phytomining (z. B. BMBF-Projekt zur Gewinnung von Germanium mittels Pflanzen) verschoben haben. Seit 1996 wurden von den AG-Mitarbeiter(innen) insgesamt 460 Publikationen veröffentlicht, insbesondere auf den Gebieten Populationsbiologie und Biozönologie, Naturschutz und Landschaftsökologie sowie Phytomining und Ökosystemanalyse. In der seit 2016 von der AG herausgegebenen Online-Zeitschrift „Freiberg Ecology online“ (FECO) erschienen bisher 10 Bände mit insgesamt 36 Publikationen mit Ergebnissen aus Lehrveranstaltungen, studentischen Arbeiten, Forschungsprojekten oder Tagungen.

**Schlüsselwörter:** Ökologie, Lehre, Forschung; ecology, teaching, research

### 1. Einleitung

Zum Wintersemester 1996/97, also zum Zeitpunkt der Veröffentlichung 2022 vor etwas mehr als 25 Jahren, nahm die Arbeitsgruppe Biologie / Ökologie an der TU Bergakademie Freiberg ihre Arbeit auf (vgl. Heilmeyer et al. 2016a). Die **AG Biologie** (Leitung: PD Dr. Hermann Heilmeyer) war die erste Arbeitsgruppe, die dem zeitgleich gegründeten Interdisziplinären Ökologischen Zentrum (IÖZ) zugeordnet wurde (s. Groß & Stoyan 2015). Zwei Jahre später kamen die Arbeitsgruppen Geoökologie (Prof. Dr. Jörg Matschullat) und Umweltmikrobiologie (Prof. Dr. Michael Schlömann) sowie Umwelt- und Ressourcenmanagement (Prof. Dr. Jan Bongaerts) hinzu. Am 1.4.2006 wurde das Institut für Biowissenschaften der Fakultät 2 der TU Bergakademie bestehend aus der AG Biologie / Ökologie und der AG Umweltmikrobiologie gegründet.

In der Anfangszeit bestand die Hauptaufgabe der Arbeitsgruppe im Aufbau der **Lehre** in den Bereichen Biologie (Grundlagen) für die ebenfalls zum Wintersemester 1996/97 gegründeten umweltbezogenen Studiengänge Angewandte Naturwissenschaft, Geoökologie und Umweltengineering (s. Kap. 2). Derzeit umfassen die Lehrgebiete die Grundlagen und Prinzipien der Biologie insbesondere für die genannten Studiengänge sowie alle für das Grund- und Hauptstudium im Bachelor- und Masterstudiengängen Geoökologie (GÖK) und Angewandte Naturwissenschaft (NAT) relevanten ökologischen Fachgebiete von der Ökophysiologie über die Biozönologie bis hin zur Landschaftsökologie und angewandten Fragen der Naturschutzbiologie.

Entsprechend der Spezialisierung der drei Arbeitsgruppenmitglieder Prof. Dr. Hermann Heilmeyer (Ökophysiologie der Pflanzen), Dr. Elke Richert (Vegetationsökologie) und Dr. Roland Achtziger (Tierökologie) entwickelte sich auch die **Forschung** (s. Kap. 3). Wie in Abb. 1 dargestellt, reichen die Arbeitsfelder in der Grundlagenforschung von der Ebene der Organismen über die der Populationen bis hin zu Lebensgemeinschaften,

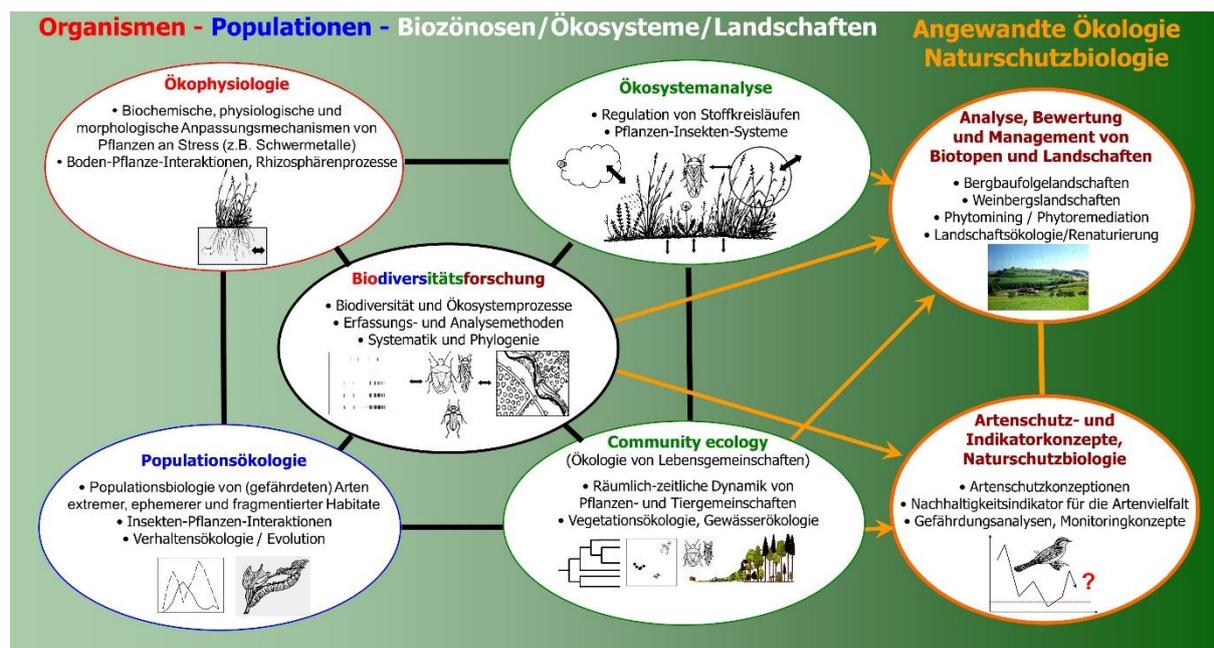
Ökosystemen und Landschaften mit der Biodiversitätsforschung als verbindendes Element. Diese Forschungsbereiche bilden wiederum die Grundlage für Forschungsarbeiten im Bereich der Angewandten Ökologie und der Naturschutzbiologie (Abb. 1). In dem 2016 gegründeten **Online-Journal** „Freiberg Ecology online (FECO)“ werden Ergebnisse aus der Lehre und Forschung der Arbeitsgruppe veröffentlicht (s. Heilmeyer et al. 2016b, Kap. 4). In diesem Beitrag wird eine **Bilanz zu 25 Jahre Lehre und Forschung** anhand der Zusammenstellung und Auswertung von Lehrveranstaltungen, studentischen Qualifizierungsarbeiten, Forschungsprojekten und Publikationen der AG Biologie / Ökologie seit 1996 gegeben.

## 2. Die Lehre der AG Biologie / Ökologie

### 2.1 Angebotene Lehrveranstaltungen seit 1996

Die von der Arbeitsgruppe seit ihrer Gründung angebotenen Lehrveranstaltungen ab dem Wintersemester 1996/97 orientierten sich inhaltlich an den in Abb. 1 dargestellten Forschungsgebieten. Neben Veranstaltungen für den Studiengang Geoökologie bot die AG Biologie / Ökologie Lehrveranstaltungen für die Studiengänge Angewandte Naturwissenschaft (NAT), Umwelt-Engineering (UWE), Chemie (CH), Geosciences (GEX), Groundwater Management (GWM), International Management of Resources and Environment (IMRE), International Business and Resources in Emerging Markets (IBRE) an oder beteiligte sich an diesen. Seit 1996 wurden insgesamt 56 verschiedene Lehrveranstaltungen bzw. Module erarbeitet und angeboten (20 Vorlesungen, 5 Seminare, 11 Praktika, 13 Übungen und 7 Geländepraktika bzw. Exkursionen, s. Tabelle A1, Anhang 1; Abb. 2). Neben eigenem Personal trugen insbesondere Mitarbeiter(innen) des Umweltforschungszentrums Leipzig/Halle (UfZ), des Naturschutzinstitutes Freiberg und des Umweltbüros Weiß dazu bei, diesen Umfang und die Breite an Lehrveranstaltungen anbieten zu können. Unter Berücksichtigung der Anzahl an Jahren, in denen die Veranstaltungen jeweils angeboten wurden, ergibt sich eine Summe von etwa 514 Veranstaltungsemestern, wobei die häufig erforderliche mehrfache Durchführung von bestimmten Praktika und Übungen noch nicht berücksichtigt ist.

Ein Schwerpunkt der Lehre im Studiengang Geoökologie lag auf der Durchführung von Geländepraktika für unterschiedliche Semester. Neben halbtägigen Veranstaltungen auf dem Campus für die Studierenden im 2. Semester, vermittelten insbesondere mehrtägige Geländeaufenthalte am Ende des Hauptstudiums vertiefende Einblicke und boten bleibende Eindrücke. Die Exkursionsziele lagen in Tschechien und der Slowakei sowie in verschiedenen Regionen Deutschlands (vgl. Tabelle A1). Wiederholte Male Gegenstand der freilandökologischen Analysen war die Vegetationsentwicklung sowohl auf jungen Flächen der Tagebaufolgelandschaft im aktiven Braunkohletagebau Welzow-Süd als auch auf Flächen in der vom historischen Erzbergbau geprägten Bergbaufolgelandschaft in Freiberg. Mit der Modularisierung der Studiengänge ab dem Wintersemester 2008/2009 ging eine umfangreiche Umstrukturierung der von der Arbeitsgruppe angebotenen Lehrveranstaltungen einher und die Anzahl abnehmender Prüfungen und Prüfungsvorleistungen wie Berichte oder Publikationsentwürfe, nahm sprunghaft zu. Für den Masterstudiengang Geoökologie ist die AG seitdem maßgeblich an der Vertiefung „Ökosystem- und Landschafts-Management“ (Ecosystem and Landscape Management) beteiligt.



**Abb. 1:** Schematische Darstellung der Lehr- und Forschungsgebiete der AG Biologie / Ökologie (Stand 2022).

**Fig. 1:** Schematic illustration of the teaching and research areas of the Biology /Ecology Unit (from 2022).



**Abb. 2:** Beispielhafte Eindrücke von Lehrveranstaltungen: (a) Praktikum „Grundlagen der Biologie“, Regenwurmversuch (2008), (b) Praktikum „Grundlagen der Biologie“, Mehlwurmversuch (2007), (c) Modul „Biotop- und Landschaftsmanagement“, Blockpraktikum Tagebau Welzow-Süd (2014), (d) Geländetag „Gehölze im Winterzustand“, Campus (2006), (e) Modul „Grundlagen des Naturschutzes“, Übung Biotopkartierung, Reiche Zeche (2014), (f) Praktikum „Biologische Verfahren der Umwelt- und Umweltsystemanalyse“, Bestimmung Saprobienindex, Kleinwaltersdorfer Bach (2008), (g) Osterzgebirgsexkursion Geisingberg (1999), (h) Modul „Biotop- und Landschaftsmanagement“, Blockpraktikum Weinbergsökologie Radebeul (2019). (Fotos: Archiv AG Biologie / Ökologie).

**Fig. 2:** Exemplary impressions from courses: (a) Practical course „basics of biology“, earthworm dissection (2008), (b) practical course „basics of biology“, meal worm experiment (2007), (c) module „habitat and landscape management“, block course mining-pit Welzow-Süd (2014), (d) Excursion „woody plants in winter“, Campus (2006), (e) module „basics of nature conservation“, practice in habitat mapping, Reiche Zeche (2014), (f) practical course „biological procedures of environmental (system) analysis, determination of sabroby index, Kleinwaltersdorfer Bach (2008), (g) excursion to the eastern ore mountains, Geisingberg (1999), (h) module “habitat and landscape management”, block course vineyard ecology Radebeul (2019). (Photos: Archive AG Biologie / Ökologie).

## 2.2 Analyse der studentischen Arbeiten in der AG Biologie / Ökologie seit 1996

In diesem Kapitel erfolgt eine Auswertung sämtlicher studentischer Graduiierungsarbeiten, die seit dem Wintersemester 1996/97 von der AG Biologie (mit-)betreut wurden (s. Auflistung der Studien- und Bachelorarbeiten sowie der Diplom-, Master- und Doktorarbeiten in Anhang 2). Gruppenarbeiten, in denen meist zwei Studierende unterschiedliche Aufgaben oder Teilaspekte einer Fragestellung bearbeiteten, wurden getrennt ausgewertet. Die Analyse ist eine Fortführung der Auswertung von 2016 (s. Heilmeier et al. 2016a).

### 2.2.1 Der analysierte Datensatz

Der in die Analyse einbezogene Datensatz umfasst 314 abgeschlossene und laufende studentische Arbeiten (Stand Sommersemester 2022), die sich entsprechend der Aufschlüsselung in Abb. 3 auf die verschiedenen **Typen** verteilen. Etwas über die Hälfte ( $n = 160$ , 51,1 %) waren Studien- und Bachelorarbeiten, der Rest verteilt sich auf Diplom- ( $n = 65$ , 21,1 %) und Masterarbeiten ( $n = 71$ , 22,7 %) sowie Dissertationen ( $n = 17$ , 5,1 %).

Die **zeitliche Entwicklung** der Arbeiten zwischen 1999 und 2012 ist in Abb. 4 dargestellt, welche im Wesentlichen den Studienverlauf (Studienarbeiten im Grundstudium, Diplomarbeiten im Hauptstudium) sowie die Umstellung von Diplom- auf Bachelor- und Master-Studiengänge in Zuge der Bologna-Reform im WS 2008/09 widerspiegelt. Insbesondere in dieser Übergangsphase zwischen 2010 bis 2016 war mit im Mittel etwa 20 studentischen Arbeiten im Jahr ein Maximum zu verzeichnen. Gegen Ende des Erfassungszeitraums nahm die Anzahl der betreuten Arbeiten auch aufgrund der allgemein zurückgehenden Studierendenzahlen ab (Abb. 4).

### 2.2.2 Auswertung nach Studiengängen

Gemäß der fachlichen Ausrichtung der Arbeitsgruppe liefen die meisten Graduiierungsarbeiten im Studiengang Geoökologie (247 Arbeiten, 78,9 %, s. Abb. 5). Entsprechend der Zielsetzung bei der Gründung der Arbeitsgruppe Biologie / Ökologie und des Interdisziplinären Ökologischen Zentrum (IÖZ) (vgl. Groß & Stoyan 2015) entfielen 289 der betreuten Arbeiten (92,3 %) auf die zeitgleich eingeführten „IÖZ-Studiengänge“ Angewandte Naturwissenschaft (Fakultät 2), Geoökologie (Fakultät 3) und Umwelt-Engineering (Fakultät 4). Weitere 12 Arbeiten liefen im Internationalen Studiengang IMRE (Fakultät 6,  $n = 6$ ) sowie in den Studiengängen Geologie/Mineralogie, Groundwater Management (Fakultät 3,  $n = 3$ ), SINReM (Fakultät 6,  $n = 1$ ) und Chemie (Fakultät 2,  $n = 1$ ). 13 externe Arbeiten (4,2 %), insbesondere Dissertationen, wurden für andere Hochschulen oder Forschungseinrichtungen wie das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ (z. B. im Rahmen von Kooperationsvereinbarungen wie HIGHGRADE) betreut.

### 2.2.3 Auswertung nach Fachgebieten der Biologie

Die meisten der ökologischen Arbeiten befassten sich mit Pflanzen bzw. Vegetation (Fachgebiet Botanik,  $n = 145$ , 46,3 %) oder mit Tieren (Zoologie,  $n = 77$ , 24,6 %) bzw. mit einer Kombination von beiden ( $n = 20$ , 6,4 %) (Abb. 6). Der Rest der Arbeiten verteilte sich auf Botanik und/oder Mikrobiologie ( $n = 7$ , 2,2 %), Bodenökologie (Bodenenzyme etc.,  $n = 14$ , 4,5 %) sowie auf sonstige Arbeitsfelder wie Landschaftsökologie, Ökotoxikologie etc. ( $n = 50$ , 16,0 %).

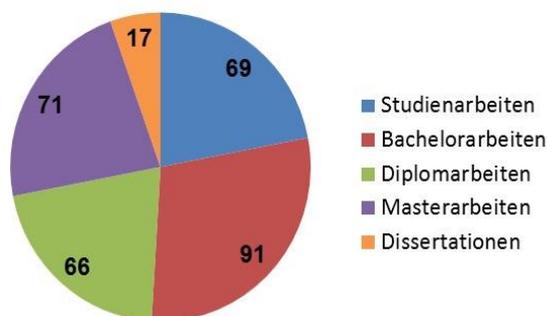


Abb. 3: Anzahl der Arbeiten pro Typ ( $n = 314$ ).

Fig. 3: Number of theses per thesis type ( $n = 314$ ).

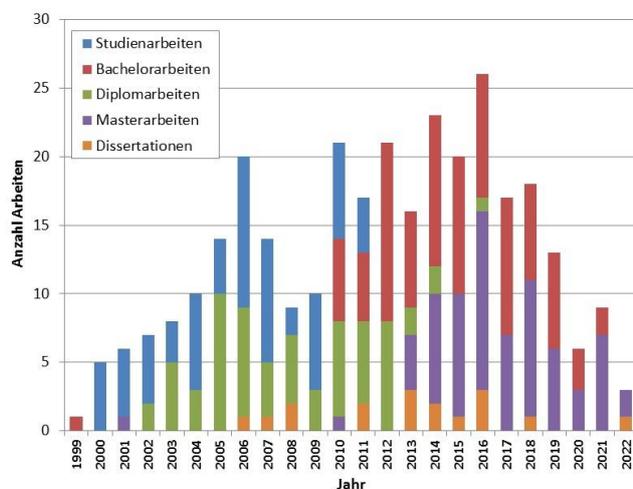
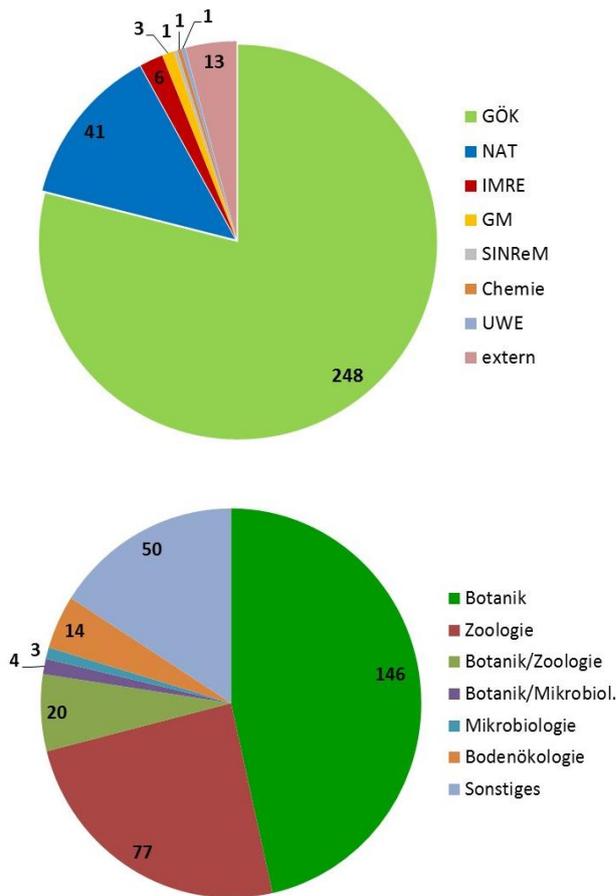


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung der Arbeiten nach Typ.

Fig. 4: Temporal development of the theses per type.



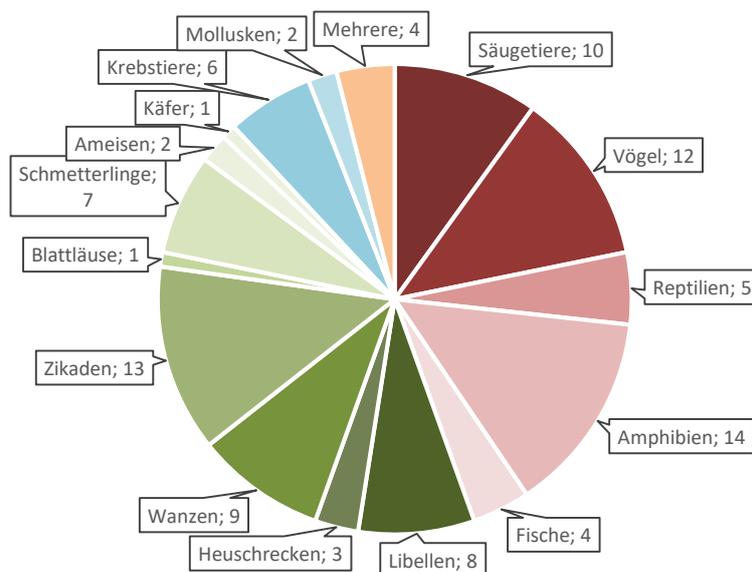
**Abb. 5:** Verteilung der Arbeiten auf die Studiengänge (n = 314). GÖK = Geoökologie, NAT = Angewandte Naturwissenschaft, IMRE = International Management of Resources and Environment, GM = Geologie/Mineralogie, SINReM = Sustainable and Innovative Natural Resource Management, UWE = Umwelt-Engineering, extern = Studiengänge außerhalb der TU Bergakademie Freiberg.

**Fig. 5:** Distribution of theses on courses of studies (n = 314). GÖK = Geocology, NAT = Applied Natural Science, IMRE = International Management of Resources and Environment, GM = Geology/Mineralogy, SINReM = Sustainable and Innovative Natural Resource Management, UWE = Environmental Engineering, extern = courses not at the TU Bergakademie Freiberg.

**Abb. 6:** Verteilung der Arbeiten auf Fachgebiete der Biologie (n = 314).

**Fig. 5:** Distribution of theses on disciplines of biology (n = 314).

Die im Rahmen der **zoologischen Arbeiten** untersuchten Tierarten bzw. Tiergruppen sind entsprechend der Anzahl der studentischen Arbeiten in Abb. 7 zusammengestellt. Von den 101 Arbeiten, in denen mindestens eine der aufgeführten Arten(gruppen) untersucht wurde, befassten sich knapp die Hälfte mit Wirbeltieren, wobei insbesondere die planungsrelevanten und naturschutzfachlich bedeutsamen Gruppen der Vögel, Amphibien, Reptilien (Zauneidechse) und Fledermäuse im Mittelpunkt standen. Innerhalb der Arbeiten über Wirbellose standen entsprechend der Spezialisierung der AG-Mitarbeiter sowie ihrer Bedeutung als Indikatorgruppen im Rahmen naturschutzbiologischer Untersuchungen bestimmte Insektengruppen wie Zikaden, Wanzen und Libellen im Mittelpunkt (Abb. 7); weitere Arbeiten befassten sich mit anderen Insektenarten(gruppen) sowie mit Mollusken oder Krebstieren.



**Abb. 7:** Untersuchte Tiergruppen mit Anzahl der Arbeiten (n = 101).

**Fig. 7:** Animal species groups studied with number of theses (n = 101).

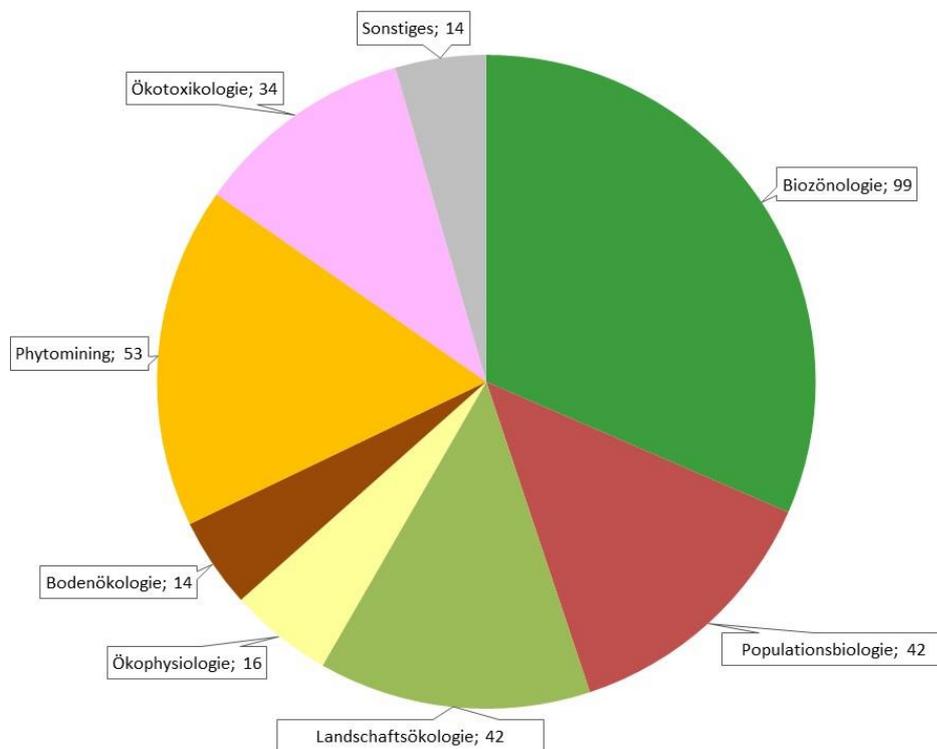
### 2.2.4 Auswertung nach Forschungsgebieten

In Abb. 8 ist die Verteilung der betreuten studentischen Arbeiten auf die Forschungsgebiete der AG Biologie/Ökologie (vgl. Abb. 1) aufgetragen. Etwa ein Drittel der Arbeiten entfiel auf den Bereich Biozönologie (Ökologie der Artengemeinschaften von Pflanzen und Tieren, Vegetationsökologie;  $n = 99$ , 31,6 %), gefolgt von den Bereichen Populationsbiologie ( $n = 42$ , 13,4 %) und Landschaftsökologie ( $n = 42$ , 13,4 %). **Freilandarbeiten** in diesen drei Bereichen machten somit etwas mehr als die Hälfte der studentischen Arbeiten aus ( $n = 183$ , 58 %); sie bildeten in vielen Fällen die Grundlage für die Beantwortung angewandter Fragen in der **Naturschutzbiologie** (vgl. Abb. 1). So wurden in den Bereichen Biozönologie und Biodiversitätsforschung zahlreiche Arbeiten zur Zusammensetzung und Diversität der Vegetation oder ausgewählter Tierartengemeinschaften wie Zikaden, Wanzen, Libellen, Vögel und Amphibien in bestimmten Lebensräumen und Ökosystemen untersucht (z. B. unterschiedlich genutztes Grünland, Bergbaufolgelandschaften, Streuobst, Weinberge, Moore, Still- und Fließgewässer, s. 2.2.5). Die landschaftsökologischen Arbeiten bezogen sich zumeist auf naturschutzfachliche Fragestellungen in ausgewählten Landschaften wie Bergbaufolgelandschaften (z. B. Häuser 2021) oder Wald- und Agrarlandschaften.

Etwa ein Viertel der Arbeiten ( $n = 82$ , 26,2 %) fielen in die Bereiche Ökophysiologie der Pflanzen ( $n = 16$ , 5,1 %), Bodenökologie ( $n = 14$ , 4,5 %) und Phytomining ( $n = 53$ , 16,6 %) (Abb. 8). Hier wurden größtenteils gezielte Experimente im **Freiland und/oder Gewächshaus** sowie im **Labor** durchgeführt. Schwerpunkte der studentischen Arbeiten bildeten hier besonders in den letzten zehn Jahren zahlreiche Untersuchungen zu Boden-Pflanze-Interaktionen und zur Rhizosphärenökologie (z. B. Wiche & Heilmeyer 2019), deren Verständnis eine wichtige Grundlage für den Einsatz von Pflanzen zur Phytoremediation von Böden und zum Phytomining von wichtigen Rohstoffen wie Germanium und anderen seltenen Erdmetallen bildet (Heilmeyer et al. 2019, Wiche et al. 2018). Die Arbeiten auf dem Gebiet der Ökotoxikologie ( $n = 34$ , 10,9 %) entstanden zumeist aus Kooperationen mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ, Department für Ökotoxikologie und waren überwiegend im Bereich der aquatischen Ökotoxikologie angesiedelt (z. B. Franz 2013, Rotter 2013, Riedl 2014). Zu den sonstigen Arbeiten ( $n = 14$ , 4,5 %) wurden Untersuchungen aus anderen Fachgebieten, theoretische (z. B. ökologische Modellierung) oder Literaturarbeiten gezählt.

### 2.2.5 Auswertung nach Ökosystem- und Lebensraumtypen

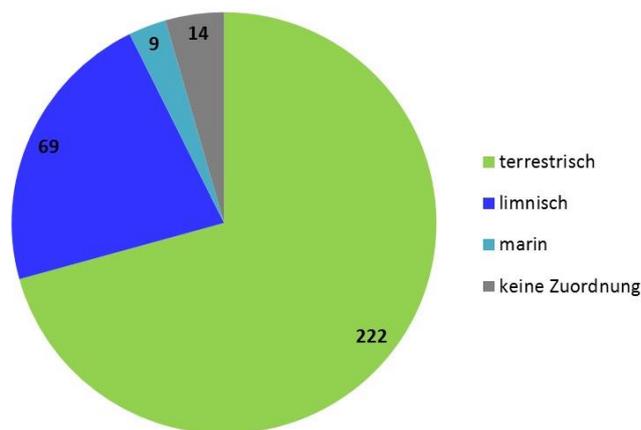
Wie in Abb. 9 dargestellt ist, bezogen sich etwa zwei Drittel der studentischen Arbeiten auf terrestrische **Ökosysteme** ( $n = 222$ , 70,6 %), gefolgt von limnischen Ökosystemen wie Fließ- und Stillgewässern ( $n = 69$ , 22,0 %) und marinen Ökosystemen ( $n = 9$ , 2,9 %). Die restlichen 14 Arbeiten (4,5 %) konnten keinem dieser drei Bereiche zugeordnet werden (reine Labor- oder theoretische Arbeiten).



**Abb. 8:** Verteilung der ökologischen Arbeiten auf Forschungsgebiete der AG Biologie / Ökologie ( $n = 314$ ).

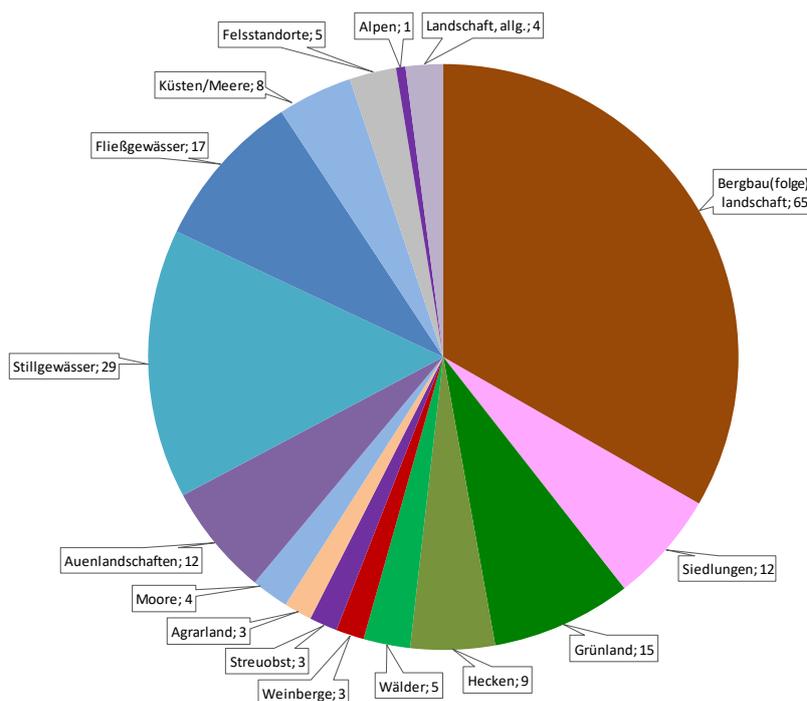
**Fig. 8:** Distribution of ecological theses on research fields of Biology / Ecology Unit ( $n = 314$ ).

Hinsichtlich der untersuchten **Biotop- und Landschaftstypen** (Abb. 10) dominierten unter den bestimmten Lebensraumtypen zuordenbaren studentischen Arbeiten ( $n = 191$ , 61,0 %) die Lebensraumtypen von Bergbaufolgelandschaften ( $n = 65$ , 34,2 %), gefolgt von Stillgewässern inkl. der Bergwerksteiche ( $n = 29$ , 15,1 %). Die Bergbaulandschaft mit ihren zahlreichen Sonderbiotopen wie Berge- und Spülhalden und oftmals gefährdeten Tier- und Pflanzenarten (z. B. Kästner et al. 2012) bietet herausragende Möglichkeiten für die Untersuchung von Anpassungsmechanismen von Organismen an extreme Lebensräume, von Grundlagen bis zum Phytomining und zur Phytoremediation belasteter Standorte sowie von verschiedenen ökologischen Prozessen wie Sukzession und Besiedelung (vgl. Heilmeyer et al. 2016c). Durch die zahlreichen studentischen Arbeiten und Lehrveranstaltungen in aktiven Bergbaugebieten und Bergbaufolgelandschaften (insbesondere Altbergbauhalden, Braunkohletagebaue und Bergbauteiche) trägt die Arbeitsgruppe auch zur Entwicklung einer nachhaltigen Ressourcengewinnung bei, welche ein erklärtes Ziel der TU Bergakademie Freiberg als Ressourcenuniversität darstellt. Neben den Lebensräumen der Bergbau(folge)landschaften und ausgewählten Stillgewässern wurden zum Teil im Rahmen von Forschungsprojekten weitere Lebensraum- und Landschaftstypen wie Fließgewässer ( $n = 17$ , 8,9 %), Auenlandschaften ( $n = 12$ , 6,3 %), Siedlungsbereiche ( $n = 12$ , 6,3 %) und verschiedene Grünlandbiotope ( $n = 15$ , 7,9 %) inkl. Bergwiesen (z. B. Richert et al. 2015) untersucht. Weitere studentische Arbeiten fanden in anderen terrestrischen Lebensraumtypen wie Hecken, Wäldern, Mooren, Felsstandorten, Streuobstwiesen, Weinbergen und im Agrarland, aber auch in marinen Lebensräumen statt (z. B. im Mittelmeer, Nordsee, Ostsee) (Abb. 10).



**Abb. 9:** Verteilung der Arbeiten auf terrestrische, limnische und marine Ökosystemtypen ( $n = 314$ ).

**Fig. 9:** Distribution of theses on terrestrial, aquatic and marine ecosystem types ( $n = 314$ ).



**Abb. 10:** Verteilung der studentischen Arbeiten im Freiland auf Biotop- und Landschaftstypen ( $n = 191$ ).

**Fig. 10:** Distribution theses in the field on habitat and landscape types ( $n = 191$ ).



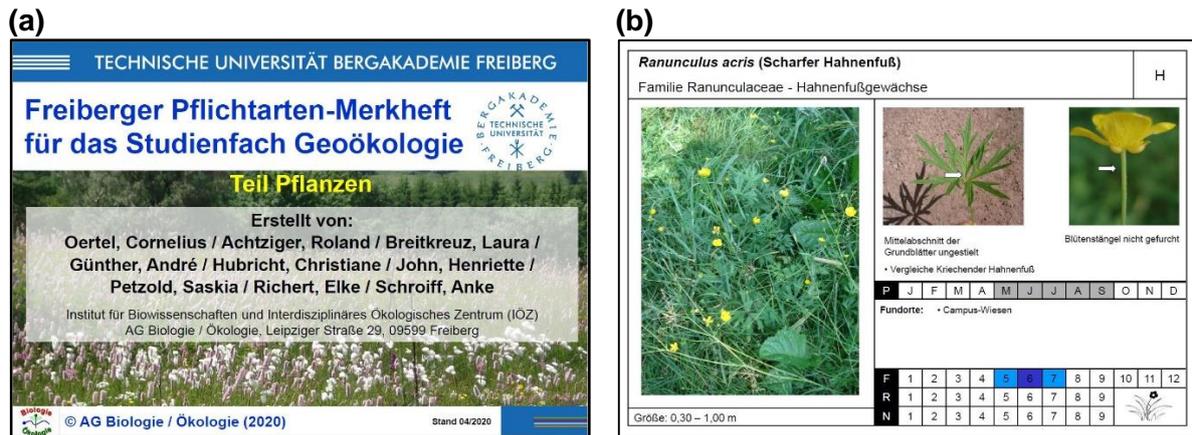


Abb. 12: Pflichtartenmerkheft für Pflanzen: (a) Titelblatt, (b) Beispiel für einen Artensteckbrief.

Fig. 12: Booklet for knowledge of mandatory plant species: (a) title page, (b) example of a species profile.

Das Pflichtartenmerkheft basiert im Wesentlichen auf einer Studienarbeit im Studiengang Geoökologie (Oertel 2007, unpubl.) und Arbeiten im Rahmen eines Praktikums (Laura Breitzkreuz) und von studentischen Hilfskräften (Christiane Hubricht, Saskia Petzold). Es liegt als pdf-Datei vor und kann entsprechend auf Smartphones oder Tablets über die AG-Webseite oder in entsprechenden Kursen auf der sächsischen Lehr- und Lernplattform OPAL heruntergeladen werden (<https://tu-freiberg.de/fakultaet2/bio/biology-ecology/lehrestudium>).

### 2.3.2 OPAL-Kurs „AG Bio/Öko Materialien und Informationen zum Thema Freilandökologie“

Für die akademische Lehre steht den sächsischen Hochschulen die Online-Plattform OPAL zur Verfügung. Auch die AG Biologie / Ökologie hat für ihre Lehrveranstaltungen zahlreiche OPAL-Kurse angelegt, um für die Studierenden u. a. Lehrmaterialien bereitzustellen und den Austausch von Daten und Dateien zu ermöglichen. Im Kurs „AG Bio/Öko Materialien und Informationen zum Thema Freilandökologie“ wurde für die Studierenden der Geoökologie semesterübergreifend und unabhängig von spezifischen Lehrveranstaltungen eine umfangreiche Sammlung an Informationen und Materialien zum Thema Freilandökologie (Abb. 13) zusammengestellt, etwa Selbsttests zur Bestimmung von Tier- und Pflanzenarten, Informationen zu Aufnahme- und Auswertemethoden, Literaturhinweise und Linklisten z. B. zu Verbänden und Naturschutzorganisationen der Region.

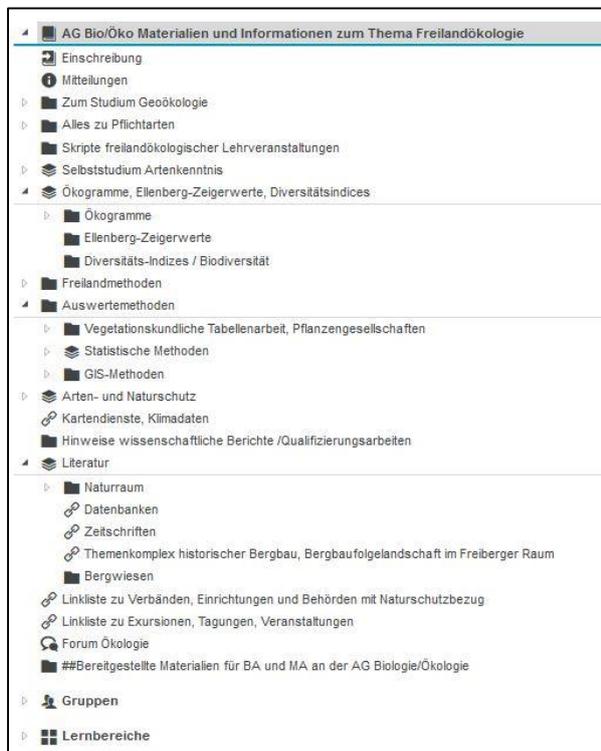


Abb. 13: Inhalte des OPAL-Kurses „AG Bio/Öko Materialien und Informationen zum Thema Freilandökologie“ (WS 2022).

Fig. 13: Contents of the OPAL course „AG Bio/Öko materials and information about field ecology“ (WS 2022).

### 2.3.3 OPAL-Kurs „BIODIVina - Lehrmaterialien zu Biodiversität in Weinbergen“

Im Rahmen des Projekts „BIODIVina“ (Bildungsmodule zur Rolle der Biodiversität bei Anpassungen des Weinbaus an den Klimawandel) wurden verschiedene Lehrmaterialien zu den Themen Biodiversität und Ökosystemleistungen, Klimawandel und Klimawandelanpassungen in Weinbergen mit Schwerpunkt auf dem Anbaubereich Sachsen entwickelt. Die Materialien wurden zum einen für die Weinbaupraxis (Weinbaubetriebe, Weinhandel, Weinschulen) und zum anderen für die akademische Lehre und die studentische Ausbildung an der TU Bergakademie Freiberg entwickelt (s. Achtziger et al. 2021a, unpubl.). Die verschiedenen Bildungsmaterialien für Vorlesungen (Präsentationen mit Vorlesungsfolien) und für Freilandpraktika (Anweisungen und Erfassungsbögen zur Erfassung der Biodiversität in Weinbergen und Weinbergslandschaften) wurden in einer Vorlesungsfoliensammlung „Biodiversität in Weinbergslandschaften“ und einem Methodenhandbuch „Erfassung der Biodiversität“ und zugehörigen Präsentationen zusammengestellt. Beide Zusammenstellungen werden neben weiteren Präsentationen, Übersichten und Steckbriefen zu Pflanzen- und Tierarten der Weinberge in dem Kurs „BIODIVina – Lehrmaterialien zu Biodiversität in Weinbergen“ auf der sächsischen Lehr- und Lernplattform OPAL sachsenweit ohne Einschränkungen zur Verfügung gestellt (Achtziger et al. 2021b).

## 3. Forschung in der AG Biologie / Ökologie seit 1996

### 3.1 Schwerpunkte der Forschung im Laufe der Zeit

Schwerpunkte waren anfangs **Forschungsprojekte** im Bereich der Naturschutzbiologie auf bundesweiter bzw. landesweiter Ebene: Entwicklung eines bundesweiten Tierartenmonitoringkonzepts (Stickroth et al. 2003), Entwicklung eines Nachhaltigkeitsindikators für den Naturschutzbereich (Achtziger et al. 2004), Gefährdungsursachenanalyse planungsrelevanter Tiergruppen in Deutschland (Günther et al. 2005) sowie die Entwicklung eines Artenschutzkonzepts für Sachsen (Richert et al. 2012). Nach dieser konzeptionellen Phase in den Zeiten der Etablierung der Lehre in der AG Biologie / Ökologie konnten mit der Möglichkeit, Themen für Diplomarbeiten anzubieten, Projekte zur Entwicklung und Umsetzung konkreter naturschutzfachlicher Maßnahmen in Sachsen (Lebensraum Campus: Richert et al. 2009; HochNatur: Richert et al. 2007, unpubl., 2011a,b; GehVege: John et al. 2014, Richert et al. 2014, 2016) umgesetzt werden. Auf europäischer Ebene wurde mit dem Projekt ChangeHabitats2 die Anwendung von Fernerkundungsmethoden für ein effizientes Habitatmonitoring im Rahmen der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie erprobt (Zlinszky et al. 2015). Aktuell stehen Fragen der Biodiversität und deren Bedeutung für Ökosystemdienstleistungen angesichts der Bekämpfung der Folgen von Klimawandel, beispielsweise in Weinbergslandschaften (BIODIVina: Achtziger et al. 2021a,b) im Vordergrund der Forschung zur angewandten Ökologie und Naturschutzbiologie (vgl. Abb. 1). Die Forschung auf dem Gebiet der funktionellen Ökologie (Ökophysiologie, Ökosystemforschung, s. Abb. 1) war anfangs auf die Ökologie und Biodiversität von Bergbaufolgelandschaften sowie die für deren Renaturierung relevanten populationsökologischen, biozönotischen und ökosystemaren Prozesse gerichtet. (z. B. Heilmeyer et al. 2016c). Gemäß des Ressourcenprofils der TU Bergakademie Freiberg liegt der Schwerpunkt seit einem Jahrzehnt auf der nachhaltigen Gewinnung von strategischen Wertelementen wie Germanium und Seltenen Erden mittels (Energie-)Pflanzen (Phytomining; z. B. Wiche et al. 2018; Heilmeyer & Wiche 2020). Neben rein praktischen Fragen wie der Identifizierung geeigneter Akkumulatorpflanzen und Bodenbearbeitungsmaßnahmen, welche die Aufnahme der Wertelemente fördern, sind die wissenschaftlichen Grundlagen zur Bioverfügbarkeit von Nähr- und Spurenelementen und Rhizosphärenprozessen sowie die chemisch-analytischen Methoden zur Bio- und Spurenelementanalytik von besonderem Interesse (Projekte PhytoGerm, PhalarisII, PhaNoMix, Hyphorhizo sowie Einzelpromotionen). Auf internationaler Ebene werden die Erkenntnisse aus diesen Projekten in die Entwicklung von Lehrinhalten und die Ausbildung interdisziplinär ausgebildeter Experten auf dem Gebiet verantwortungsvollen Bergbaus an ukrainischen Universitäten eingebracht (Projekt BioMining, EcoMining).

### 3.2 Forschungsprojekte

#### 3.2.1 Überblick über die Forschungsprojekte

In Tabelle A2 (Anhang 1) sind die laufenden und abgeschlossenen Forschungsprojekte der Arbeitsgruppe seit 1996 zusammengestellt. Die meisten Projekte wurden mit Mitteln von Ministerien oder Institutionen des Bundes (BMBF, BMEL / FNR, BMU, BfN, DBU, DAAD, EU) und des Freistaats Sachsen (LfULG, ESF) finanziert, ein kleinerer Teil durch Unternehmen (z. B. Vattenfall, BIONIG) (s. Tabelle A2).

#### 3.2.2 Vorstellung ausgewählter Forschungsprojekte

##### (a) Modell für eine Gesamtkonzeption zum Tierartenbestandsmonitoring des Bundes am Beispiel der Vogelfauna (TAM)

**Auftraggeber:** Bundesamt für Naturschutz

**Laufzeit:** 01.09.1997 - 31.03.1998 und 01.09.1999 - 31.10.2001

**Projektpartner:** Büro Dr. Hermann Stickroth, Augsburg

**Ziel** des F+E-Projekts war die Gesamtkonzeption eines wissenschaftlich fundierten, anwendungsbezogenen Konzeptes für die Einrichtung eines naturschutzorientierten Tierartenbestandsmonitorings in Deutschland als Teil der ökologischen Umweltbeobachtung am Beispiel der Vogelfauna (Schmitt et al. 2001, Stickroth et al. 2003). Das erarbeitete Gesamtkonzept sah zwei Monitoring-Teilbereiche vor: (1) Ein indikatorisches Tierartenmonitoring, bei dem Tiere, Tiergemeinschaften und davon abgeleitete Parameter als Indikatoren für den Naturzustand eingesetzt werden und (2) ein artenbezogenes Monitoring, bei dem gefährdete oder geschützte Tierarten als Schutzobjekte per se im Mittelpunkt stehen. Für die Implementierung der einzelnen Ziele in das Monitoringgesamtkonzept und als Grundlage für die praktische Umsetzung wurden für beide Teilbereiche spezielle „Monitoringmodule“ erarbeitet, die den jeweiligen Datenbedarf und die dafür nötigen Methoden und auszuwertenden Parameter und Indikatoren enthalten. So zielte das Modul „Problemfelder des Naturschutzes“ darauf ab, die Auswirkungen von Landschaftsveränderung auf den Zustand des Naturhaushalts anhand tierischer Indikatoren (hier: Vögel) zu bewerten und Handlungsbedarf für die Bundespolitik oder für die Naturschutzpraxis abzuleiten. Dabei stützte sich die Indikation auf problemfeldspezifische „Indikatorgilden“ (Arten mit ähnlichen ökologischen Ansprüchen und Indikatorfunktionen), deren zeitliche und räumliche Dynamik die Veränderungen des Naturhaushalts indizieren. Als Grundlage für die Abschätzung des Erfassungsaufwands sowie für Kostenszenarien für ein solches bundesweites Tierartenmonitoring wurden Analysen von Datensätzen und Simulationen verschiedener Probevarianten durchgeführt. Aus dem erarbeiteten Konzept ging das vom Dachverband Deutscher Avifaunisten (DDA) seit vielen Jahren betriebene „Monitoring häufiger Brutvögel“ hervor, das u. a. Daten für den bundesweiten Naturschutzindikator für Artenvielfalt und Landschaftsqualität (s. Punkt b) liefert (Wahl et al. 2020).

#### **(b) Nachhaltigkeitsindikator für Artenvielfalt und Landschaftsqualität in Deutschland (NHI)**

**Auftraggeber:** Bundesamt für Naturschutz

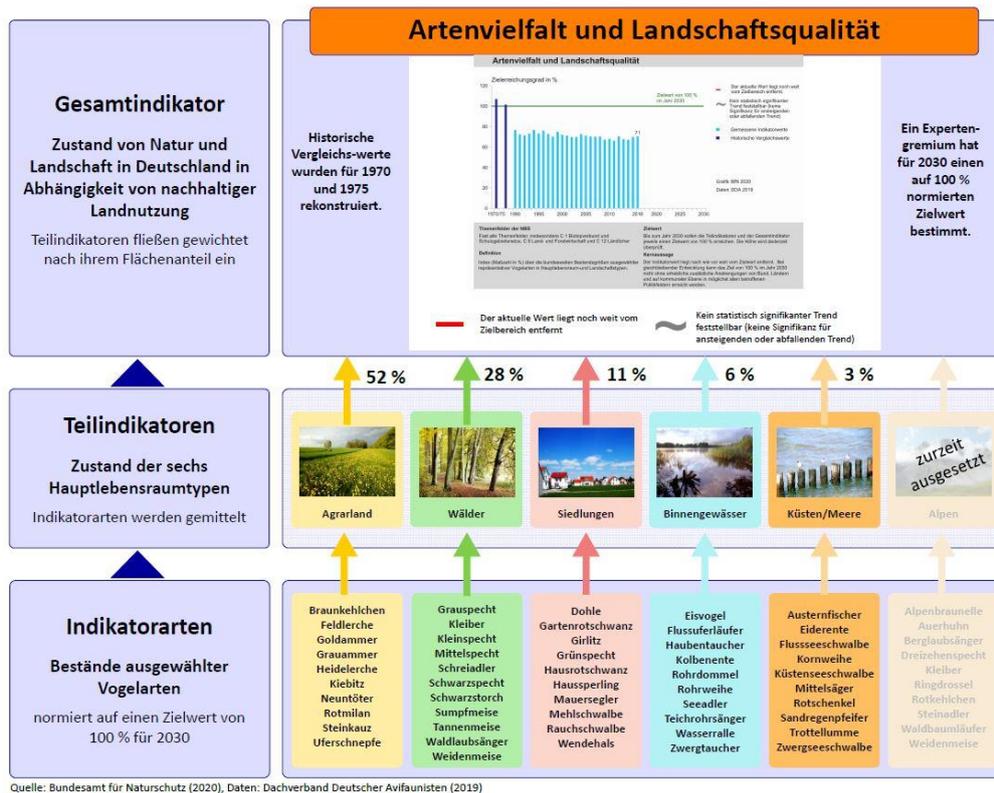
**Laufzeit:** 01.03.2002 - 31.01.2004 und 01.09.2004 - 31.10.2006

**Projektpartner:** Büro Dr. Hermann Stickroth, Augsburg; Büro für Ökologische Studien GdbR, Bayreuth; Forschungsstelle für Umweltpolitik FFU (FU Berlin)

**Ziel** des F+E-Projekts war die Erarbeitung eines Indikators für Nachhaltigkeit im Bereich Naturschutz / Biologische Vielfalt als einer von 21 Indikatoren der im Jahr 2001 verabschiedeten Nachhaltigkeitsstrategie der damaligen Bundesregierung (Bundesregierung 2002), mit denen die Bundesregierung die Erreichung der Ziele der bundesdeutschen Nachhaltigkeitsstrategie überprüfen wollte. Bereits vor fast 300 Jahren mahnte der Freiburger Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz einen „nachhaltenden“ Umgang mit den natürlichen Ressourcen an (von Carlowitz 1713) und prägte damit den Begriff der Nachhaltigkeit. Nicht zuletzt deshalb bildet die nachhaltige Ressourcennutzung einen Forschungsschwerpunkt der TU Bergakademie Freiberg. Der im Projekt unter Federführung der AG Biologie / Ökologie entwickelte „Nachhaltigkeitsindikator für Artenvielfalt und Landschaftsqualität“ bildet den Zustand von Natur und Landschaft in Deutschland ab und macht damit Erfolge, aber auch Defizite bei der nachhaltigen Entwicklung in diesem Bereich sichtbar (z. B. Sukopp 2007). Der Indikator wird seitdem in den regelmäßigen Indikatorberichten zur Nachhaltigkeitsstrategie des Statistischen Bundesamtes veröffentlicht (z. B. Statistisches Bundesamt 2021) und in die überarbeitete Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung übernommen (Bundesregierung 2021a,b). Der Indikator beruht auf der Bestandentwicklung von insgesamt 51 repräsentativen Vogelarten aus den wichtigsten Landschafts- und Lebensraumtypen Deutschlands. Die bundesweiten Bestandentwicklungen dieser Vogelarten dienen als Indikatoren für die Qualität ihrer Lebensräume und den nachhaltigen Umgang mit Natur und Landschaft. Verbessert sich die Lebensraumqualität in Folge der Einführung bzw. Förderung nachhaltiger Nutzungsformen, dann drückt sich dies in zunehmenden Bestandszahlen der in den Indikator einfließenden Arten und letztlich in einem positiven Trend des Gesamtindikators aus (Abb. 14).

Im Rahmen des Projekts erfolgte u. a. die Auswahl geeigneter Vogelarten für die sechs Hauptlebensräume (Agrarland, Wälder, Siedlungen, Binnengewässer, Küsten/Meere, Alpen) sowie eine Konzeption für die Berechnung des Indikators aufgrund der jährlich erhobenen Bestandsdaten zu den ausgewählten Indikatorarten (vgl. Achtziger 2012). Dabei werden die jährlichen Zielerreichungsgrade der Arten eines Hauptlebensraumtyps für die Berechnung des entsprechenden Teilindikators gemittelt. Aus den – entsprechend des Flächenanteils der Hauptlebensraumtypen gewichteten – Mittelwerten der Teilindikatoren ergibt sich der Gesamtindikatorwert (Achtziger et al. 2004). Für die Berechnung von Zielerreichungsgraden in den einzelnen Jahren wurden für alle Indikatorarten Zielwerte im Rahmen eines Delphi-Verfahrens mit 30 Expertinnen und Experten aus dem gesamten Bundesgebiet ermittelt (Stickroth et al. 2004).

Wie man am zeitlichen Verlauf des für 1990 bis letztmals 2016 jährlich durch das Statistische Bundesamt berechneten Indikators erkennen kann (Statistisches Bundesamt 2021), hat sich der Gesamtzustand von Natur und Landschaft in den letzten Jahren kaum verändert: Der Gesamtindikatorwert schwankte etwa um 70 % Zielerreichung. Dies zeigt, dass die bestehenden Leitlinien einer nachhaltigen Entwicklung konsequent und vollständig umgesetzt werden müssen, um das gesteckte Ziel zu erreichen. Insofern versteht sich der Indikator als Orientierung nicht nur für die Politik, sondern auch für das Handeln gesellschaftlicher Akteure (Zieschank et al. 2004).



**Abb. 14:** Aufbau des Nachhaltigkeitsindikators „Artenvielfalt und Landschaftsqualität“ mit den ausgewählten Indikatorarten, den Teilindikatoren für die Hauptlebensraumtypen und dem Gesamtindikator für den Zustand von Natur und Landschaft in Deutschland (Quelle: Bundesamt für Naturschutz, <https://www.bfn.de/en/node/1431>).

**Fig. 14:** Concept of the sustainability indicator „Species diversity and landscape quality“ with selected indicator species, the partial indicator for the main habitat types and the total indicator for the state of nature and landscape in Germany (source: Federal Agency for Nature Conservation, <https://www.bfn.de/en/node/1431>).

**(c) Gefährdungsursachenanalyse planungsrelevanter Tiergruppen in Deutschland (GAT)**

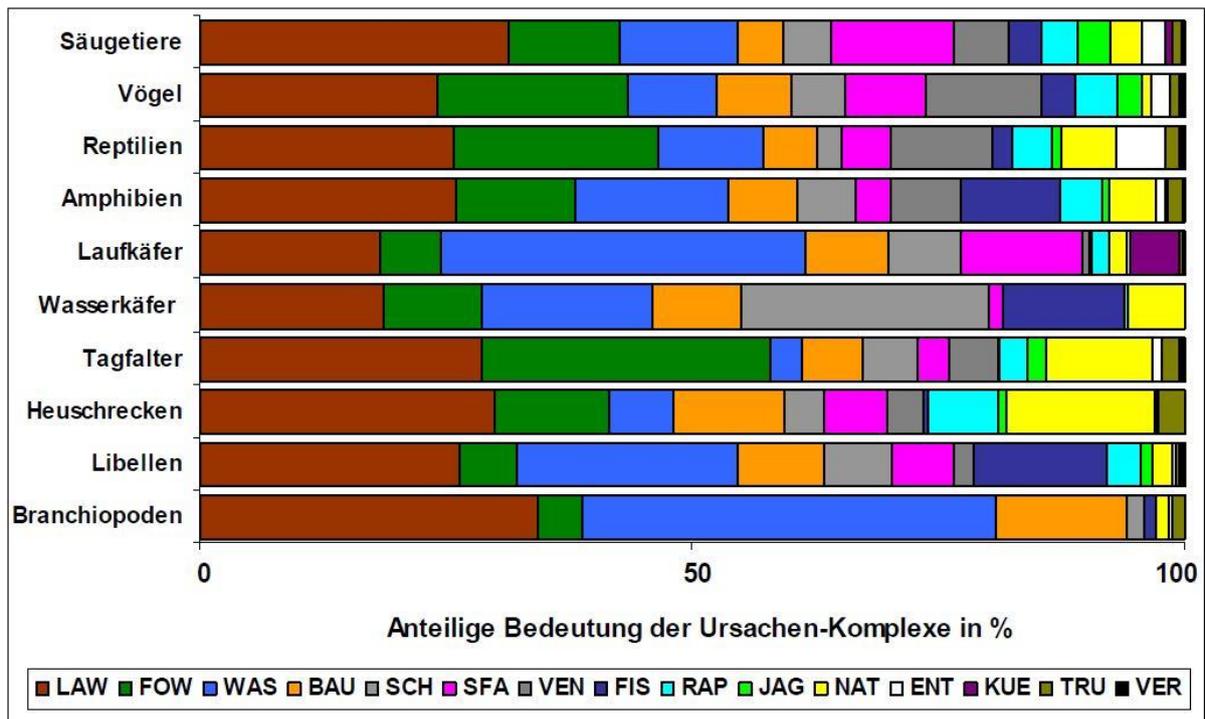
**Auftraggeber:** Bundesamt für Naturschutz

**Laufzeit:** 01.05.2002 - 31.12.2004

**Projektpartner:** Büro Dr. Hermann Stickroth, Augsburg; Naturschutzzentrum NSI, Freiberg; beak Consultants, Freiberg; Büro Maas, Saarlouis

**Ziel** des F+E-Projekts war die Gefährdungsursachenanalyse von planungsrelevanten Tiergruppen in Deutschland als Ergänzung zu den bundesweiten Roten Listen gefährdeter Tiere (Günther et al. 2005). Auf der Grundlage einer bundesweiten Expertenbefragung sowie anhand von Literaturrecherchen wurden unter Federführung der AG Biologie / Ökologie die Gefährdungsursachen(komplexe) für insgesamt 601 Arten der Roten Liste aus folgenden planungsrelevanten Tiergruppen recherchiert und analysiert: Säugetiere, Brutvögel, Reptilien, Amphibien, Laufkäfer, Wasserkäfer, Tagfalter und Dickkopffalter, Heuschrecken, Groß-Branchiopoden und Libellen. Als Grundlage für die Recherche wurde ein mit weiteren Verzeichnissen harmonisierter Katalog der Gefährdungsursachen der Tiere Deutschlands erarbeitet, der insgesamt 228 Einzelgefährdungsursachen, gegliedert nach 18 Gefährdungsursachen-Komplexen umfasst.

Aus der bundesweiten Umfrage unter 333 Expertinnen und Experten zu diesen Gefährdungsursachen sowie der Literaturrecherche zu Fallbeispielen gingen 3.178 Einzelbögen mit insgesamt 38.871 Gefährdungsursachen-Nennungen hervor (Nigmann et al. 2006). Zu insgesamt 80 % der bearbeiteten 601 Arten lagen ein oder mehrere konkrete Fallbeispiele vor. In der tiergruppenspezifischen Auswertung erfolgten eine Analyse der (Haupt-)Gefährdungsursachen-Komplexe und der Gefährdungsursachen sowie ein Vergleich zwischen Arten aus verschiedenen Lebensraumtypen und anhand artspezifischer Eigenschaften. Für jede Art wurden Gefährdungsprofile mit den wichtigsten Einzelursachen zusammengestellt. Über alle Tiergruppen betrachtet erwiesen sich Gefährdungsursachen aus dem Komplex Landwirtschaft sowohl hinsichtlich der Nennungshäufigkeiten als auch hinsichtlich der Anzahl an betroffenen Arten als am wichtigsten (Abb. 15). Danach folgten die Komplexe Wasserbau/ Gewässerunterhaltung, Forstwirtschaft, Sport- und Freizeitaktivitäten und Baumaßnahmen. Bei den Einzelursachen dominierten Sukzession in natürlichen, nicht genutzten Lebensräumen, diffuser Nährstoffeintrag, Bebauung, Trockenlegung, Fragmentierung, Regulierung von Fließgewässern und Düngung, Kalkung von Grünland (Abb. 15).



**Abb. 15:** Anteilige Bedeutung der Ursachenkomplexe an der Gefährdung der untersuchten Tiergruppen. LAW = Landwirtschaft, FOW = Forstwirtschaft, WAS = Wasserbau/Schifffahrt, BAU = Bauliche Maßnahmen/Rohstoffgewinnung, SCH = Emissionen, SFA = Sport/Freizeit, VEN = Verkehr/Energie, FIS = Fischerei, RAP = Infrastruktur/Raumplanung, JAG = Jagd, NAT = Naturschutzmaßnahmen, ENT = Entnahme von Individuen, KUE = Küstenschutz, TRU = Truppenübungsplätze, VER = Neobiota (aus Günther et al. 2005).

**Fig. 15:** Proportionate significance of cause complexes on the threat of the animal groups studied. LAW = agriculture, FOW = Forestry, WAS = water engineering/shipping, BAU = construction/raw materials production, SCH = emissions, SFA = sports/leisure, VEN = traffic/energy, FIS = fishery, RAP = infrastructure/spatial planning, JAG = hunting, NAT = nature conservation measures, ENT = removal of individuals, KUE = coast protection, TRU = military training grounds, VER = neobiota (from Günther et al. 2005).

Unter den 25 wichtigsten Gefährdungsursachen dominierten dabei Maßnahmen, die mit einer Intensivierung der Nutzung von Natur und Landschaft und damit einhergehenden (negativen) Veränderungen bzw. gar Zerstörung der Lebensräume verbunden sind. Nachrangig waren Ursachen vertreten, die die Extensivierung bzw. eine Nutzungsaufgabe oder eine fehlende Pflege widerspiegeln. Auf Grund einer fachlichen, artengruppenspezifischen Diskussion, die unter Mitwirkung namhafter Spezialistinnen und Spezialisten für die einzelnen Tiergruppen durchgeführt wurde, konnten arten- und naturschutzfachliche Handlungsempfehlungen aus Bundessicht abgeleitet werden. Diese betreffen neben dem allgemeinen Ziel, die identifizierten Hauptgefährdungsursachen zu reduzieren, insbesondere die fachliche und finanzielle Optimierung von Naturschutzmaßnahmen, eine verstärkte Integration des Naturschutzes in die Raumplanung und Landschaftsnutzung, verbesserte administrative und gesetzliche Regelungen sowie die Ausgestaltung von Förderprogrammen, die verstärkte Förderung naturverträglicher Formen der Sport- und Freizeitbetätigung sowie speziellen Forschungsbedarf und eine geförderte Umweltbildung als flankierende Maßnahmen (Günther et al. 2005).

#### (d) Hochwasser- und Naturschutz im Weißeritztal (HochNatur)

**Auftraggeber:** Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)

**Laufzeit:** 2003 - 2007

**Projektpartner:** AG Geoökologie, TU Bergakademie Freiberg; Lehrstuhl für Umwelt-Biotechnologie, Internationales Hochschulinstitut Zittau (IHI); Büro für Hydrologie und Bodenkunde Gert Hammer (Dresden)

**Ziel** des Projekts war die Erarbeitung und Bewertung von Maßnahmen, die gleichermaßen dem Naturschutz und dem Hochwasserschutz dienen. Am Beispiel des vom Augushochwasser 2002 besonders stark betroffenen Einzugsgebietes der Weißeritz (Osterzgebirge, Sachsen) und den beiden ausgewählten Teileinzugsgebieten (TEZG) Weißbach und Höckenbach mit unterschiedlicher Landnutzungs- und Biotoypenausstattung, wurden eine detaillierte Ist-Zustandsanalyse durchgeführt und verschiedene Landnutzungsszenarien aus Sicht des Naturschutzes und des Hochwasserschutzes aufgestellt, analysiert und bewertet (Richert et al. 2011a). In den Szenarien wurden Landnutzungsänderungen wie die Waldmehrung und der ökologische Waldbau, die Extensi-

vierung von Intensivgrünland, die Umwandlung von Äckern in Extensivgrünland, die konservierende Bodenbearbeitung, die Gewässerrenaturierung sowie die Etablierung von Kleinstrukturen (z. B. Hecken) berücksichtigt. Für die Bewertungen kamen landschaftsökologische und hydrologische Systemanalysen und Modelle zum Einsatz. Das Vorgehen wurde so konzipiert, dass es auch auf andere Gebiete übertragbar ist, vorausgesetzt es stehen entsprechende Eingangsdaten (Boden, Morphologie, Vegetation, Durchflüsse usw.) zur Verfügung.

Die Bewertungsergebnisse zeigten, dass die Wirkung der analysierten Landnutzungsänderungen in kleinen bis mittelgroßen Einzugsgebieten und bei Niederschlagsereignissen mit einer 5 bis 50jährigen Auftretenswahrscheinlichkeit am größten ist. In Abhängigkeit von der Ausgangssituation sind nach den Simulationsergebnissen dafür Landnutzungs- bzw. Bewirtschaftungsänderungen auf etwa 25 bis 50 % der Fläche erforderlich. Neben einem verbesserten Hochwasserschutz würden diese flächenhaft wirkenden Maßnahmen positive Synergieeffekte wie verbesserter Bodenschutz, ausgeglichener Gebietswasserhaushalt sowie Aufwertung des Landschaftsbildes mit sich bringen. Maßnahmen wie die Etablierung von Hecken und Grünstreifen wirken dagegen besonders auf lokaler Ebene, für die Situation des gesamten EZG spielen solche Einzelmaßnahmen eine eher untergeordnete Rolle. Die Modellierungen zeigten auch am Beispiel des Höckenbachs, dass durch eine Fließgewässerrenaturierung und die Nutzung von vorhandenen Teichen im Auenbereich als Wasserrückhaltebecken der Scheitelabfluss erheblich reduziert werden könnte.

Die Projektergebnisse zeigen, dass der vorbeugende Hochwasserschutz sehr gut mit den Anforderungen des Naturschutzes vereinbar ist. Die Analyse und Bewertung der Szenarien belegen, dass sogar Landnutzungsänderungen, die allein aus Sicht des Naturschutzes aufgestellt wurden, eine Verbesserung der Hochwasserschutzsituation bedingen können und umgekehrt eine Landnutzung, die optimal den Anforderungen des Hochwasserschutzes dient, auch positive Effekte für den Naturschutz haben kann (Richert et al. 2011b). Für die Praxis wurde eine anschauliche Broschüre zur Analyse des Handlungsbedarfes und potentiell geeigneter Maßnahmen erarbeitet (Richert & Achtziger 2007).

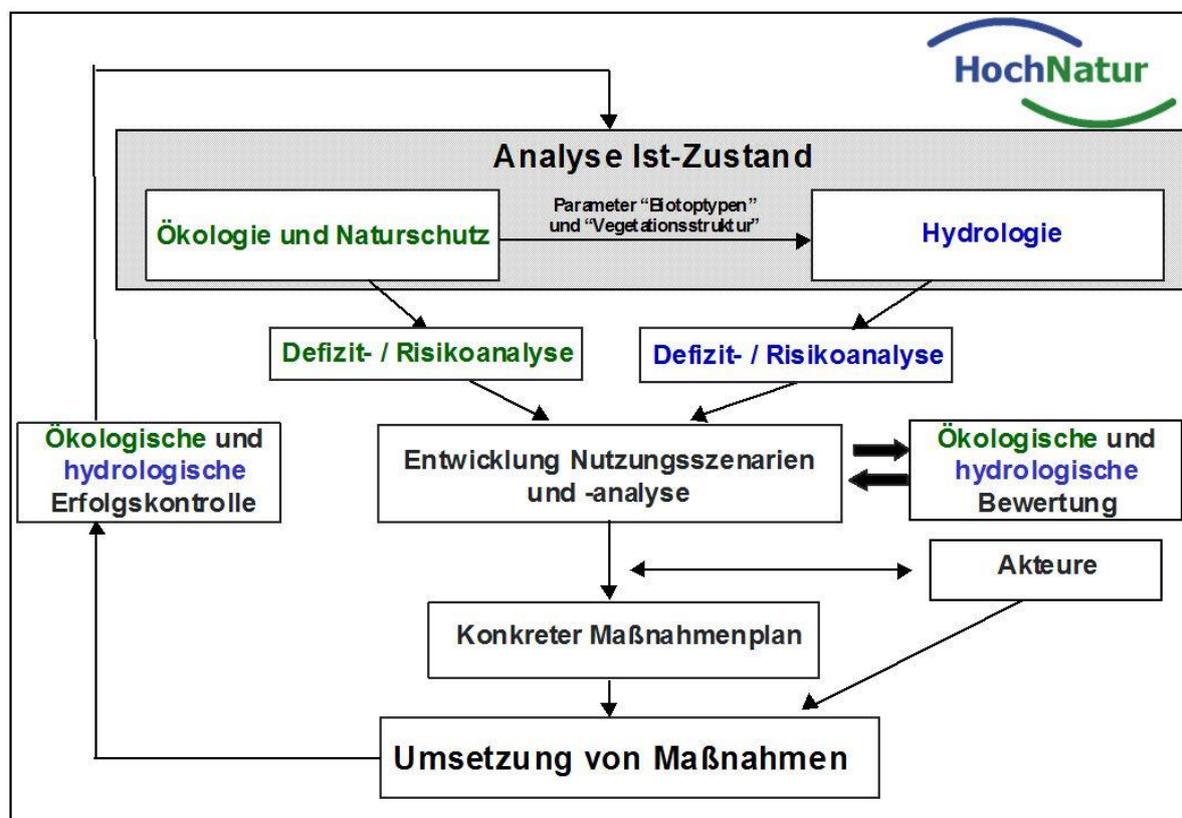


Abb. 16: Schema zur interdisziplinären Herangehensweise im Projekt „HochNatur“ (aus Richert et al. 2007, unpubl.).

Fig. 16: Scheme on the interdisciplinary approach in „HochNatur“ project (from Richert et al. 2007, unpubl.).

**(e) Die Bergwerksteiche der Revierwasserlaufanstalt Freiberg als Lebensraum einer einzigartigen Teichbodenvegetation – Gebietshistorie und Vegetationsökologie als Basis für nachhaltigen Naturschutz (GehVege)**

**Auftraggeber:** Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Osnabrück

**Laufzeit:** 01.01.2007 - 30.06.2010

**Projektpartner:** Naturschutzzentrum NSI, Freiberg; Institut für Wissenschafts- und Technikgeschichte (IWTG), TU Bergakademie Freiberg

**Ziel** des Projekts war es, Kenntnislücken zur Geschichte der Teichbodenvegetation im Kontext der Historie des Teichsystems der Revierwasserlaufanstalt (RWA) sowie zu den ökologischen Ansprüchen und zu Ausbreitungsmechanismen der Arten zu schließen. Darauf aufbauend sollten Konzepte für Maßnahmen zum Schutz und zur weiteren Entwicklung abgeleitet und erste Maßnahmen gemeinsam mit Projektpartnern aus der Region umgesetzt und erprobt werden. Zur Schließung der Kenntnislücken wurden Analysen zur Rekonstruktion der Gebiets-, Nutzungs- und Vegetationsgeschichte mittels Archivarbeit und Untersuchung von Sedimentkernen aus den Teichen vorgenommen sowie umfangreiche Untersuchungen zu ökologischen Ansprüchen und Ausbreitungsmechanismen der Arten der Teichbodenvegetation durchgeführt (John et al. 2014).

Das Erzgebirge ist eine seit 8 Jahrhunderten vom Erzbergbau stark geprägte Landschaft mit heute noch weithin sichtbaren Elementen vergangener Bergbauaktivitäten. Ein Beispiel dafür sind die ab dem 16. Jahrhundert zur Aufschlagwassergewinnung angelegten Bergwerksteiche und die diese verbindenden Kunstgräben südlich der Bergstadt Freiberg. Die spezifische Nutzungsgeschichte des nach wie vor voll funktionsfähigen und heute u. a. zur Trink- und Brauchwasserversorgung genutzten Kunstgraben- und Teichsystems brachte eine europaweit einzigartige Teichbodenvegetation hervor, die von Strandlings- und Zwergbinsengesellschaften (Littorelletalia und Isoëto-Nanojuncetea) mit dem Scheidenblütgras (*Coleanthus subtilis*) geprägt wird (Abb. 17). Diese Art ist europaweit gefährdet und durch die Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (Anhänge II und IV) geschützt (Richert et al. 2014, 2016). Für das Erzgebirge ist die enge Bindung der Vorkommen von *C. subtilis* an das Gewässersystem der RWA bemerkenswert. Als Hauptergebnisse können festgehalten werden (John et al. 2014):

- Die Arten der Teichbodenvegetation, insbesondere der Zwergbinsengesellschaften, haben sich bereits kurz nach der Anlage der Teiche (z. T. im 16. Jahrhundert) in diesen angesiedelt.
- Als Ursache für den Rückgang des Strandlings (*Littorella uniflora*) konnte die Gewässertrübung identifiziert werden (Sieland et al. 2008).
- Das Bespannungsregime (Zeitpunkt, Dauer und Häufigkeit von Wasserspiegelabsenkungen) ist entscheidend für die Ausprägung der Zwergbinsengesellschaften. Der ideale Zeitpunkt für den Beginn einer (Teil-)Entleerung ist Spätsommer bis Herbst, die Dauer sollte etwa 10 Wochen umfassen, da die Arten in dieser Zeit ihren gesamten Lebenszyklus sicher durchlaufen können. Mit einer zweimaligen Absenkung in 10 Jahren können gut ausgeprägte Bestände erhalten werden.
- Die Ausbreitung über den Wasserweg stellt einen wichtigen Ausbreitungsmechanismus im Untersuchungsgebiet dar, was u. a. durch Überstauungsversuche im Labor und durch Samennachweise im Wasserkörper sowie in Sedimenten der Kunstgräben und Röschen der RWA gezeigt wurde. Dabei können die Samen nachweislich Entfernungen von mehreren Kilometern zurücklegen und zumindest im Labor über 1 Jahr schwimmen, ohne dabei ihre Keimfähigkeit zu verlieren.



**Abb. 17:** Arten der Strandlings- und Zwergbinsengesellschaften (Littorelletalia und Isoëto-Nanojuncetea): (a) Scheidenblütgras (*Coleanthus subtilis*), (b) Nadelsimse (*Eleocharis acicularis*) (Fotos: Roland Achtziger).

**Fig. 17:** Species of the Littorelletalia and Isoëto-Nanojuncetea: (a) moss grass (*Coleanthus subtilis*), (b) dwarf hairgrass (*Eleocharis acicularis*) (photos: Roland Achtziger).

Aus diesen Ergebnissen wurden Maßnahmen zur Zustandsverbesserung und Förderung der Teichbodenvegetation abgeleitet und in ausgewählten Gewässern erprobt. So konnte durch gezielte Wasserstandsabsenkung von Teichen, in denen sich durch fehlende, zu kurze bzw. saisonal ungeeignete Trockenphasen bis dahin keine Teichbodenvegetation ausbilden konnte, deren Entwicklung erreicht werden. Die erarbeiteten naturschutzfachlichen Handlungsempfehlungen wurden in den Managementplan zum FFH-Gebiet „Freiberger Bergwerksteiche“ integriert und stehen den Nutzern des Systems als wichtige Leitlinien für die Bewirtschaftung zur Verfügung.

**(f) Erarbeitung einer Konzeption für den Artenschutz als Beitrag zur Biodiversität in Sachsen**

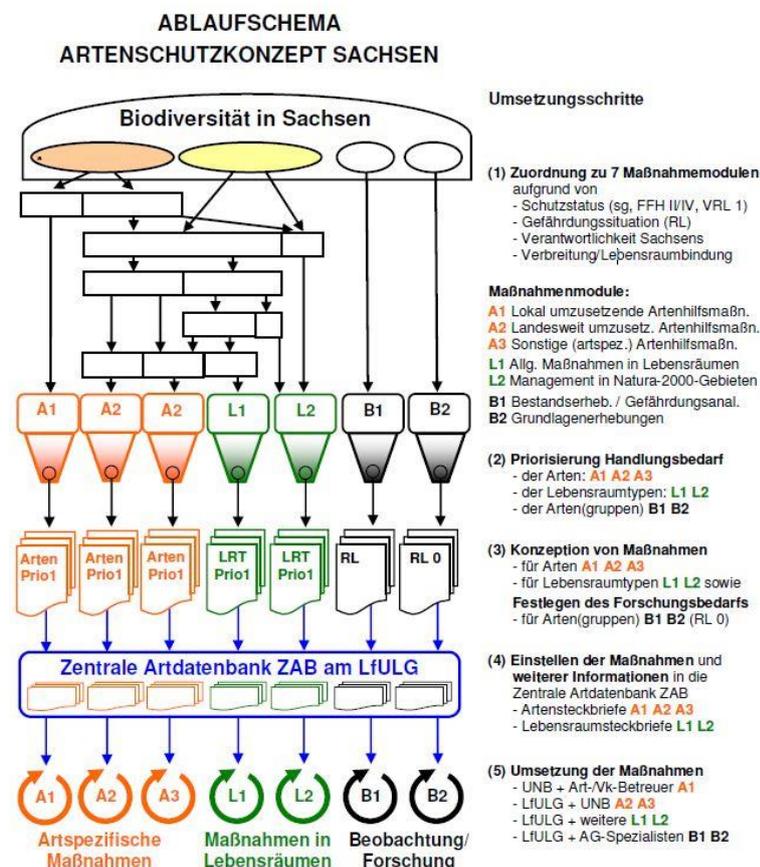
**Auftraggeber:** Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Referat 63 (Artenschutz)

**Laufzeit:** 10/2008 - 11/2010

**Projektpartner:** Naturschutzzinstitut NSI, Freiberg

**Ziel** des Projekts zur Artenschutzkonzeption Sachsen war es, die sich aufgrund gesetzlicher Verpflichtungen und fachlichen Erfordernisse ergebenden Anforderungen an den Artenschutz und die dafür zuständigen Behörden zu analysieren, geeignete Maßnahmen zu identifizieren und Zuständigkeiten für die Konzeption und Umsetzung der Maßnahmen zu definieren. Die vorgestellte Konzeption ermöglicht es, flexibel und effizient den Artenschutz in Sachsen zu gestalten und damit einen Beitrag zum Schutz der Biodiversität zu leisten (Richert et al. 2011c).

**Leitgedanke** bei der Ausarbeitung der Konzeption war es, jeder (gefährdeten) Art ihre Artenschutzmaßnahme(n) zuzuordnen. Das entwickelte Konzept ging daher von allen in Sachsen vorkommenden Arten aus. Im Zentrum der Konzeption standen Maßnahmenmodule und die ihnen zugeordneten Arten. Die sieben Module wurden sowohl nach gesetzlichen und fachlichen als auch nach pragmatischen Kriterien konzipiert und unterscheiden sich hinsichtlich der Zielebene für die Maßnahmen (Arten oder Lebensräume mit ihren Arten), der räumlichen Ebene (lokal, regional oder landesweit) und der Zuständigkeiten für die Umsetzung. Für die Maßnahmenumsetzung wurden fünf Arbeitsschritte identifiziert (Abb. 18): Nach der Modulzuordnung der Arten erfolgt eine Priorisierung mit anschließender Maßnahmenkonzeption. Für stark gefährdete Arten mit nur wenigen lokalen Vorkommen in Sachsen sind für die Maßnahmenumsetzung die Unteren Naturschutzbehörden federführend, für alle anderen Arten trägt das LfULG diesbezüglich die Verantwortung. Wichtiger Bestandteil der Artenschutzkonzeption ist die zentrale Artdatenbank. Diese stellt allen Akteuren neben den Artdaten weitere artenbezogene Fachinformationen zur Verfügung. Damit können von den Unteren Naturschutzbehörden erstmalig zeitnah für ihre Zwecke erforderliche artbezogene Informationen selbstständig abgerufen werden. Für die ersten sechs Artengruppen mit 1.465 Arten wurde bereits während der Projektlaufzeit die Modulzuordnung durchgeführt. Darüber hinaus wurden erste Artensteckbriefe erarbeitet und verfügbar gemacht (vgl. Richert et al. 2012).



**Abb. 18:** Schematische Darstellung der Artenschutzkonzeption für Sachsen mit den fünf Hauptumsetzungsschritten. sg = streng geschützt, FFH II/IV = Anhang II bzw. IV der EU-Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie, VRL 1 = Anhang I der EU-Vogelschutzrichtlinie, RL = Rote Liste, LRT = Lebensraumtyp, Prio1 = höchste Priorität bzgl. Handlungsbedarf, ZAB = Zentrale Artdatenbank, Vk = Vorkommen, UNB = Untere Naturschutzbehörde (aus Richert et al. 2011c).

**Fig. 18:** Schematic illustration of the species conservation concept for Saxony with the five main implementation steps. = sg = strictly protected, FFH II/IV = Appendices II and IV of the EU Habitat Directive, VRL 1 = Appendix I of EU Bird Protection Directive, RL = red list, LRT = habitat type, Prio1 = highest priority concerning need of action, ZAB = central species data base, Vk = occurrence, UNB = Lower nature conservation office (from Richert et al. 2011c).

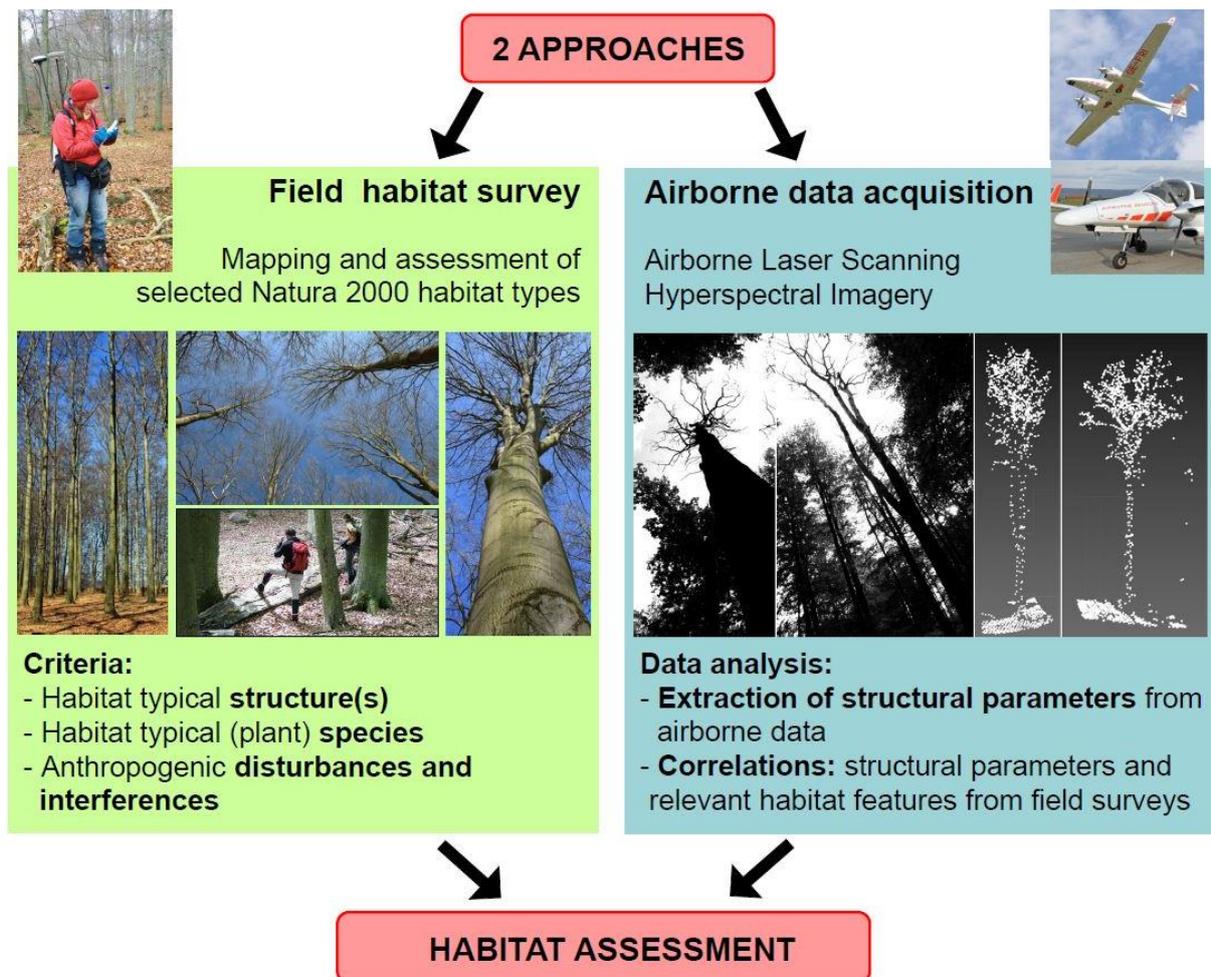
### (g) Habitat Monitoring by Airborne Laser Scanning and Hyperspectral Imaging Supported Field Work (ChangeHabitats 2)

**Auftraggeber:** EU-Programm Marie Curie Industry-Academia Partnerships and Pathways (IAPP)

**Laufzeit:** 01.01.2011 - 30.06.2015

**Projektpartner:** Technische Universität Wien (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung); Universität Debrecen (Department für Wasser- und Umweltmanagement), Ungarn; YGGDRASIL Dr. Rahner, Geologie – Projektmanagement – Trainings, Berlin; YGGDRASIL Diemer Ökologie – Naturschutz – Landschaftsplanung, Berlin; VITUKI Environmental & Water Management Research Inst. Non-profit Ltd., Budapest, Ungarn; Riegl Research Forschungsgesellschaft mbH, Horn, Österreich; Atmoterm SA., Opole, Polen.

**Ziel** des IAPP-Programms der EU ist der Wissenstransfer zwischen Wissenschaft (Universitäten) und Industrie bzw. privaten Unternehmen durch den Austausch von Mitarbeitern. Das von der AG Biologie / Ökologie koordinierte EU-Projekt ChangeHabitats 2, in dem insgesamt 8 Partner (3 Universitäten, 5 Unternehmen) aus Deutschland, Österreich, Polen und Ungarn involviert waren (s. o.), befasste sich neben dem Austausch von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern mit einem neuen Ansatz zur Unterstützung des durch die Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie) der EU vorgeschriebenen Habitatmonitorings durch hochauflösende 3D-Luftbilder (vgl. Abb. 19). So konnten im Rahmen des Projekts u. a. Möglichkeiten zur automatisierten Ableitung von Habitatparametern für definierte Lebensraumtypen ausgelotet werden (Deak et al, 2014; Alexander et al. 2015; Zlinszky et al. 2015). Derartige Habitatparameter wie Vegetationsschichtung, Totholzanteil und Strukturvielfalt sind häufig wertvolle Indikatoren für eine hohe Arten- und die zugrundeliegende Lebensraumvielfalt, welche europaweit im Rahmen des Fauna-Flora-Habitat-(FFH-)Monitorings der NATURA2000-Flächen alle sechs Jahre begutachtet werden müssen. Um den dabei pro Fläche anfallenden hohen Zeit- und Kostenaufwand zu reduzieren, wurden moderne Fernerkundungsmethoden wie Laser-Scanning eingesetzt, um eine Vorauswahl von Flächen für ein effizientes Monitoring treffen zu können. Das Projekt wurde mit 1,4 Millionen Euro aus dem 7. EU-Forschungsrahmenprogramm gefördert.



**Abb. 19:** Untersuchungsansatz im Projekt ChangeHabitats2.

**Fig. 19:** Study approach in the ChangeHabitats2 project.

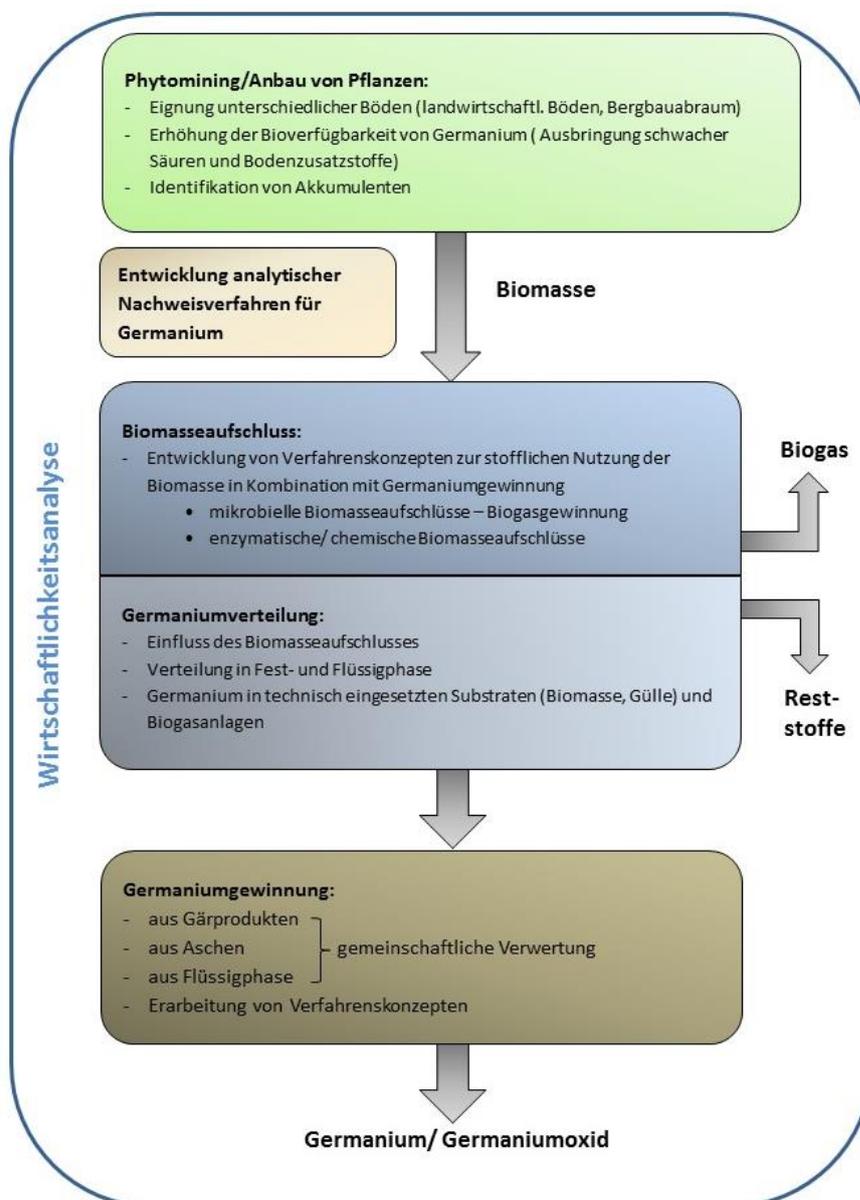
**(h) Germaniumgewinnung aus Biomasse (PhytoGerm)**

**Auftraggeber:** Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) - BMBF-Programm „r<sup>3</sup>-Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Strategische Metalle und Mineralien“

**Laufzeit:** 01.07.2012 – 31.12.2015

**Projektpartner:** Institut für Technische Chemie und Institut für Analytische Chemie, TU Bergakademie Freiberg; Bauer Umwelt GmbH, Roßwein; MT-Energie GmbH, Zeven

**Ziel** des Projekts war die Entwicklung eines Verfahrens zur Gewinnung von Germanium mittels Phytominings. Germanium (Ge) steht – vorsichtig geschätzt – an Platz 4 derjenigen Rohstoffe, die in den nächsten Jahrzehnten die größte Steigerung ihrer Nachfrage im Verhältnis zur heutigen Weltproduktion erfahren werden. Aufgrund fehlender bergmännisch abbaubarer Vorkommen sind angesichts der steigenden Nachfrage alternative Gewinnungsmethoden für Germanium in Zukunft nötig. Das Vorhaben umfasste den gesamten Prozess von der Auswahl und dem Anbau für das Phytomining geeigneter, Germanium akkumulierender Pflanzen, über die Vergärung der Biomasse bis hin zur Germaniumextraktion (Abb. 20; Heilmeyer et al. 2016d,e). Der von der AG Biologie bearbeitete Aufgabenkomplex hatte die Identifizierung der besten Akkumulanten und die Erforschung von Möglichkeiten der Intensivierung der pflanzlichen Akkumulation zum Ziel. Dazu wurden verschiedene Arten und Artenkombinationen sowohl im Gewächshaus als auch im Freiland erprobt (Wiche & Heilmeyer 2016).



**Abb. 20:** Ablaufschema im Projekt „PhytoGerm“ (aus Heilmeyer et al. 2016e, unpubl.).

**Fig. 20:** Flowchart “PhytoGerm” project (from Heilmeyer et al. 2016f, unpubl.)

Unter den untersuchten Pflanzenarten stellten sich Gräser als eindeutig bessere Akkumulanten von Germanium gegenüber den krautigen Arten heraus (Kaiser et al. 2019). Die höchsten Germaniumgehalte in der für ein Phytomining leicht zugänglichen oberirdischen Biomasse zeigten Hafer, Mais, Rohr-Glanzgras, Hirsearten und Schilf (maximal 4,0 mg Ge kg<sup>-1</sup> TM). Germanium liegt im Boden überwiegend in einer für Pflanzen wenig verfügbaren Form vor. Eine Verbesserung der Bioverfügbarkeit von Ge in Gräsern konnte durch gezielte Veränderung von Bodenparametern (pH, Anteil organische Bodensubstanz, Animpfen mit Rhizosphärenbakterien und Zugabe komplexbildender Substanzen; Wiche et al. 2017, Schwabe et al. 2021) sowie durch Anbau von Mischkulturen (Wiche et al. 2016a,b) erreicht werden.

Das Ziel der darauf aufbauenden Verfahrensentwicklung bestand darin, das im Erntegut akkumulierte Germanium zu extrahieren. Dafür wurden drei Varianten untersucht: (1) die Gärreste der Biogasproduktion aus Biomasse, (2) die Reste der Biogasproduktion aus Gülle und (3) die Aschen der thermisch verwerteten Biomasse (Heilmeier et al. 2019). Ziel war, Germanium aus der flüssigen Phase bzw. nach mikrobiellem Aufschluss der Festbestandteile abzutrennen (Heilmeier et al. 2016d). Die Aufkonzentrierung der flüssigen Phase sowie die chemische Technologie zur Freisetzung des Germaniums sind die technischen und wirtschaftlichen Kernpunkte des Prozesses, so dass die Entwicklung geeigneter Verfahren ein wichtiges Projektziel darstellte. Begleitend wurden analytische Nachweisverfahren für verschiedene Bindungsformen von Germanium in Pflanzenmaterialien entwickelt (Schreiter et al. 2021). Der gesamte Prozess der Germaniumgewinnung mittels Phytomining einschließlich der Verwertung der Biomasse wurde abschließend in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse bewertet (Abb. 20). Die Ergebnisse zeigten, dass eine Anreicherung von Germanium in der Biomasse und eine anschließende Extraktion möglich ist. Eine Wirtschaftlichkeit des PhytoGerm-Prozesses kann bei Erhöhung der Akkumulationsrate von Ge auf 10 mg/kg<sub>TS</sub> in der Biomasse und einem Preisanstieg von GeO<sub>2</sub> auf ca. 2.600 €/kg erreicht werden (Heilmeier et al. 2016e).

#### **(i) Rohrglanzgras als Bioenergiegras - Optimierung der Biomasseausnutzung und der Bioakkumulation von Wertstoffen (Phalaris II)**

**Auftraggeber:** Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Förderprogramm „Nachwachsende Rohstoffe“

**Laufzeit:** 1.11.2016 - 31.10.2019

**Projektpartner:** Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik / Professur Gas- und Wärmetechnische Anlagen, der TU Bergakademie Freiberg; Deutsche Saatveredelung AG Lippstadt

**Ziel** des Projektes war die Untersuchung von Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) hinsichtlich seines Nutzens für die Biogaserzeugung und Anreicherung von Wertelementen. Die mehrjährige, an die gemäßigten Breiten angepasste Grasart besitzt ein hohes Potential als Energiegras und zur Anreicherung von strategischen Wertelementen wie Germanium und auch Seltene Erden. Gegenwärtig lässt sich Saatgut dieser Art allerdings nur schwer produzieren, da eine Ausfallfestigkeit nicht gegeben ist. Somit wurden Ausfallfestigkeit, Biomassebildung und genetische Variabilität bei der Akkumulation von Wertelementen analysiert (Moschner et al. 2020). Im Zuge dieser Testverfahren wurde die Biomasse durch Fermentation und Verbrennung energetisch verwertet. Dabei wurden wichtige Prozessparameter wie die maximal mögliche Einsatzmenge von Rohrglanzgras oder entstehende Abgasemissionen ermittelt. Im Hinblick auf die stoffliche Bewertung wurden die Reststoffe aus der Fermentation und Verbrennung auf ihre Gehalte an den Wertelementen (Ge und Seltene Erden) analysiert (Zaffar et al. 2020). Die erhaltenen Ergebnisse können als Basis für eine wirtschaftliche Rentabilitätsabschätzung genutzt werden.

#### **(j) Biotechnology in Mining - Integration of new technologies into educational practice (BioMining)**

**Auftraggeber:** Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD), Programm „Fachbezogene Partnerschaften mit Hochschulen in Entwicklungsländern ab 2015“

**Laufzeit:** 01.01.2015 - 31.12.2018

**Projektpartner:** National Mining University (NMU), Ukraine

**Ziel** des Projekts war die Entwicklung neuartiger Bildungsmodule für den Aufbau der Lehre auf dem Gebiet „Biotechnologien im Bergbau“ an der NMU auf der Grundlage bereits existierender Module an der TU Bergakademie Freiberg, Institut für Biowissenschaften, zu mikrobieller Laugung und Behandlung saurer Grubenwässer sowie zu Phytoremediation und Phytomining (s. o.). Dabei wurden an der NMU Module zu Grundlagen der Mikrobiologie für den Bergbau sowie zu mikrobiellen und pflanzenbasierten Technologien im Bergbau entwickelt, erprobt und umgesetzt. Dies erfolgte in regelmäßigem Austausch von Lehrpersonal und Studierenden zwischen beiden Universitäten, unter anderem zu Vorlesungen für Bachelor- und Masterstudierende an der NMU (Abb. 21a). Der Schwerpunkt an der TU BAF lag auf intensiven Laborpraktika für Masterstudierende der NMU (Abb. 21b). An beiden Universitäten wurden Exkursionen in Bergbau(folge)landschaften zur Demonstration und Erörterung von möglichen Anwendungen von Biotechnologien im Bergbau durchgeführt (Abb. 21c). Nach Projektende wurden die neu entwickelten Module in die Studienpläne der Studiengänge Umweltwissenschaften, Bergbau und Geologie an der NMU integriert. Ein Höhepunkt war die Verteidigung von gemeinsam betreuten Masterarbeiten an der NMU (Abb. 21d).



**Abb. 21:** Vorlesung an der National Mining University (NMU) Dnipro (Ukraine) für Bachelor- und Masterstudierende (a) und Laborpraktikum für Masterstudierende der NMU an der TU BAF (b) zu Phytotechnologien im Bergbau, Fachexkursion zu Rekultivierungsfläche eines Bergbaubetriebes in der Ukraine (c), Video-Übertragung der Verteidigung einer gemeinsam von der NMU und der TU BAF betreuten Masterarbeit.

**Fig. 21:** Lectures at the National Mining University (NMU) Dnipro (Ukraine) for Bachelor and Master students (a) and lab internship for Master students of NMU at TU BAF (b) on the topic of phytotechnologies in mining, field trip visiting a reclamation area of a Ukrainian mining enterprise (c), video conference for defense of a jointly supervised master thesis at NMU.

### **(k) Development of integrated PhD program for sustainable mining & environmental activities (EcoMining)**

**Auftraggeber:** Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD), Programm „Fachbezogene Partnerschaften mit Hochschulen in Entwicklungsländern ab 2019“

**Laufzeit:** 01.01.2019 - 31.12.2022

**Projektpartner:** Dnipro University of Technology (DUT), Ukraine

**Ziel** des Projektes war, aufbauend auf dem Vorgängerprojekt BioMining, die Entwicklung und Implementierung interdisziplinärer Ansätze zur Ausbildung von Spezialisten in verantwortungsvollem Bergbau, um dem gegenwärtigen Mangel an breit ausgebildeten Fachleuten auf den Gebieten umweltgerechter Extraktion und Verarbeitung von Ressourcen sowie der Rehabilitation von Bergbaulandschaften in der Ukraine zu begegnen. Dazu wurde in enger Abstimmung zwischen der DUT (vormals NMU) und der TU BAF das Graduiertenprogramm „EcoMining“ aufbauend auf den umfangreichen einschlägigen Lehr- und Forschungserfahrungen der Institute für Biowissenschaften sowie Bergbau und Spezialtiefbau mittels gemeinsam entwickelter (Online-)Kurse und Workshops, Laborpraktika und Fachexkursionen umgesetzt (Abb. 22). Diese dienten der Qualifizierung ukrainischen Lehrpersonals und Promovenden sowohl aus ingenieurwissenschaftlich-technischen als auch aus Umwelt- und Ressourcen-Fachrichtungen, um so die fachlichen Lücken zwischen Bergbau, Verfahrenstechnik, Bio- und Geowissenschaften zu überbrücken. Eine geplante Sommerschule mit internationaler Beteiligung musste zunächst wegen der COVID19-Pandemie und dann wegen des russischen Überfalls auf die Ukraine im Februar 2022 ausfallen.



**Abb. 22:** Forschungsaufenthalt ukrainischer Promovenden in den Labors der AG Biologie / Ökologie der TU BAF.  
**Fig. 22:** Research internship of Ukrainian PhD students in the labs of Biology / Ecology Unit of TU BAF.

Neben der DUT waren auch andere einschlägige Universitäten sowie Unternehmen des Bergbau- und Energiesektors aus der gesamten Ukraine beteiligt. Ein aus der Sicht der beteiligten Universitäten nachhaltiges Projektziel ist dabei der Aufbau einer langfristigen Kooperation mit gemeinsam betreuten Promotionsarbeiten. Dazu forschten mehrere Promovenden im Rahmen ihrer Doktorarbeit in den Räumen der AG Biologie / Ökologie (Abb. 22).

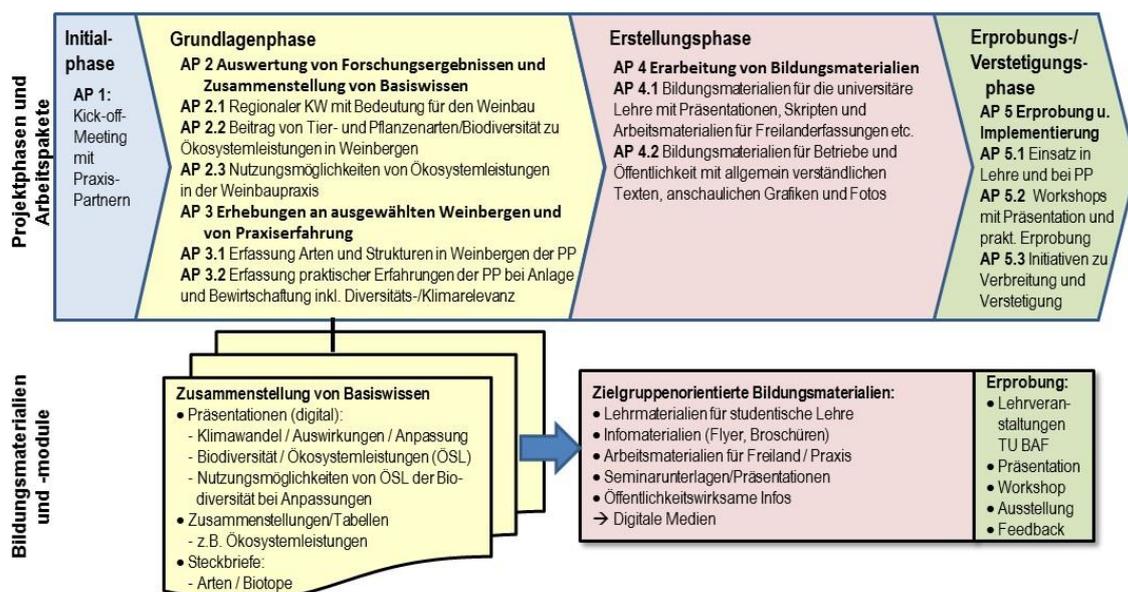
**(I) BIODIVina**

**Auftraggeber:** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

**Laufzeit:** 01.02.2019 - 30.04.2021

**Projektpartner:** LandCare gGmbH, Dresden (Dr. Barbara Köstner)

**Ziel** des Projekts war die Umsetzung von Wissen über die Rolle der Biodiversität und ihrer Ökosystemleistungen bei der Klimaanpassung des Weinbaus in Bildungsmodulen für die universitäre Lehre sowie Fort- und Weiterbildung in Weinbaubetrieben (Achtziger et al. 2021a,b, unpubl.; Abb. 23). Thema war die Nutzung von Ökosystemleistungen der Biodiversität in Weinbergen für die Anpassung des Weinbaus an den Klimawandel. Ein Teil der Materialien wie Steckbriefe zu Pflanzen- und Tierarten sowie Unterwuchstypen in Weinbergen wurde für die allgemeine Öffentlichkeit aufbereitet. Die Ergebnisse wurden auch im Rahmen von Lehrveranstaltungen (s. Kap. 2.1) anhand des sächsischen Weinanbaugebiets mit dem Schwerpunkt auf Steil- und Terrassenweinberge entwickelt und können auf Weinanbaugebiete anderer Bundesländer übertragen werden. Darüber hinaus sind die Ergebnisse über die Projekt-Webseiten (<https://tu-freiberg.de/biodivina> sowie langfristig <https://biodivina.de>) öffentlich zugänglich und stehen auch für andere Bildungsformate zur Verfügung.



**Abb. 23:** Projektablauf und Projektphasen im Projekt BIODIVina (aus Achtziger et al. 2021b, unpubl.).

**Fig. 23:** Flow chart and project phases in the BIODIVina project (from Achtziger et al. 2021b, unpubl.).

**(m) Development of hyphenated methods as a new analytical tool for profiling of root exudate metabolites and dissolved element species in the rhizosphere (Hyphorhizo)**

**Auftraggeber:** Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD), „Programm des Projektbezogenen Personenaustauschs Serbien 2022-2024“

**Laufzeit:** 01.01.2022 - 31.12.2023

**Projektpartner:** Institut für Analytische Chemie, TU Bergakademie Freiberg; Institute for Multidisciplinary Research, Department of Life Sciences, University of Belgrade

**Ziel** des Projektes ist die Entwicklung und Erprobung von Methoden zur Gewinnung von Wurzelexsudaten und gelöster Elementspezies in der Rhizosphäre der beiden Kulturpflanzenarten Mais (*Zea mays*) und Weiße Lupine (*Lupinus albus*), und von Methoden zur qualitativen and quantitativen Analyse der Rhizosphärenproben. Dabei werden die nicht-invasive Filterstreifenmethode sowie Mikroaugkerzen und die Extraktion des Rhizosphärenbodens mit hoch-sensitiven analytischen Methoden wie ICP-MS, LC-MS, LC-ICP-MS, HPLC-PAD kombiniert, um die organischen Komplexe von Spurenelementen in der Rhizosphäre (z. B. Seltene Erden; potentiell toxische Elemente wie Al, As, Cd, Pb) zu untersuchen. Aufgrund der unterschiedlichen Ernährungsstrategie von Mais und Weißer Lupine werden unterschiedliche Signaturen der Wurzelexsudate beispielsweise im Hinblick auf das Muster von Carboxylaten und Phenolen erwartet. Die Ergebnisse zu den Wurzel-Boden-Interaktionen unter verschiedenen Ernährungs- und Stressbedingungen sollen zum besseren Verständnis von Elementkreisläufen in Agro-Ökosystemen und zur Entwicklung eines nachhaltigen Bodenmanagements beitragen.

**(n) Innovativer Mischkulturanbau von *Phalaris arundinacea* zur Optimierung von Nährstoffeffizienz und einer nachhaltigen Biomasseproduktion (Phanomix)**

**Auftraggeber:** Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe

**Laufzeit:** 01.07.2022 - 30.06.2025

**Projektpartner:** Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, TU Bergakademie Freiberg; Deutsche Saatveredelung AG, 59557 Lippstadt

**Ziel** des Projekts im Teilvorhaben 2 „Bioenergetische Nutzung und P-Effizienz von *Phalaris*-Leguminosen-Anbausystemen – Evaluierung und Optimierung von Anbau, Fermentation, Verbrennung“ ist die Optimierung der Ressourcen-Faszilitation in der Rhizosphäre und die energetische Nutzung der Biomasse beim Anbau verschiedener *Phalaris*- und Leguminosen-Komponenten und der daraus hervorgehenden Mischanbausysteme. Dabei stehen in der AG Biologie / Ökologie die Untersuchung und Bewertung der Nährstofferschließungseffizienz in der Rhizosphäre (Wurzelexsudation, P-Erschließung) von potentiellen Komponenten für den Mischanbau (*Phalaris*-Populationen, Rot- und Steinkleegeotypen), die Konkurrenz und gemeinsame Ressourcennutzung in Mischbeständen sowie die bodenchemische Charakterisierung und das Bodenmonitoring in einem Demonstrationsschlag zur Untersuchung des Einflusses der Mischkulturen auf die Bodenbiologie (Aktivität von Bodenenzymen) und die Bioverfügbarkeit von Nährstoffen in der Rhizosphäre (P, K, Mikronährstoffe) im Vergleich zur Monokultur im Vordergrund. Mit der Nutzung der Gärreste als Dünger sollen Nährstoffkreisläufe geschlossen werden, was insbesondere für den landwirtschaftlichen Phosphorkreislauf ökologische Vorteile bietet.

**(o) Einzelpromotion “Energy balance and cost-benefit analysis of perennial crops with high competently managed Germanium and Rare Earth Elements by Anaerobic Digestion“**

**Förderprogramm:** Landesstipendium des Freistaates Sachsen

**Laufzeit:** 01.04.2018-31.03.2022

**Stipendiatin:** Nazia Zaffar

**Ziel** des Promotionsprojektes war die Optimierung der Extraktion der durch Akkumulation in (Energie-)Pflanzen aus Böden aufgenommenen Wertelemente (z. B. Germanium, Seltene Erden) aus den pflanzlichen Gärresten. Dazu war neben der energetischen Verwertung der pflanzlichen Biomasse deren optimale mikrobielle Aufbereitung der entscheidende Schritt. Dies sollte insbesondere für bisher wenig untersuchte Energiepflanzen der zweiten Generation entwickelt werden, deren Biomasse im Vergleich zu den Energiepflanzen der ersten Generation (z. B. Mais, Raps) schwer vergärbar ist. Als Versuchsobjekt wurde das Rohrglanzgras gewählt (*Phalaris arundinacea*, eine perennierende Energiepflanze mit hoher Akkumulationsfähigkeit für Germanium und Seltene Erden). Im Anschluss an die Optimierung der anaeroben Vergärung des Pflanzenmaterials durch Variation unterschiedlicher Parameter, insbesondere der Temperatur (Abb. 24), wurden verschiedene Verfahren zur Anreicherung der Wertelemente in den Gärresten erprobt (Zaffar et al. 2020). Dies diente als Grundlage für die Entwicklung effektiver Extraktionsmethoden und die Analyse der sie bestimmenden physiko-chemischen Bedingungen (Zaffar et al., eingereicht). Damit soll der Prozess der Biogasproduktion aus *Phalaris arundinacea* mit einem Fokus auf der Anreicherung und Extraktion von Wertelementen aus Gärresten, welche nach der Wertstoffgewinnung zur Erzielung geschlossener Stoffkreisläufe wieder auf das Feld gebracht werden, im Kontext einer Kreislaufwirtschaft („circular economy“) bewertet werden.



**Abb. 24:** Durchführung von Biogasversuchen zur anaeroben Fermentation von oberirdischem Aufwuchs von Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) im Labor des Instituts für Wärmetechnik und Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg.

**Fig. 24:** Biogas experiments to investigate anaerobic fermentation of aboveground plant material of reed canary grass (*Phalaris arundinacea*) in the lab of the Institute of Thermal Engineering, TU Bergakademie Freiberg.

**(p) Einzelpromotion “Geochemical Soil Mapping, Phytoextraction and Energy Crop Production in the Post Mining Area of Freiberg”**

**Förderprogramm:** „Promotionen“ des Europäischen Sozialfonds (ESF), Förderperiode 2014 – 2020

**Laufzeit:** 01.08.2018-31.07.2021

**Stipendiat:** Precious Uchenna Okoroafor

**Ziel** des Promotionsprojektes war die Identifizierung von Energiepflanzen, welche aufgrund ihrer Fähigkeit zur Akkumulation von Spurenelementen sowohl zur Phytoremediation belasteter Flächen als auch für das Phytomining von kritischen Wertelementen wie Germanium oder Seltenen Erden im Erzgebirgsraum verwendet werden können (Abb. 25). Damit sollte in den von jahrhundertlangem Bergbau geprägten Gebieten mit ihren den Pflanzenanbau limitierenden Bodenkontaminationen eine nachhaltige und langfristige Nutzung sowie eine Bodenverbesserung ermöglicht werden.



**Abb. 25:** Saatbettbereitung, Ansaat und Bodenbearbeitung der Versuchsfläche des Fachschulzentrums Freiberg-Zug zum Anbau verschiedener Energie- und Akkumulatorpflanzenarten (hier: Buchweizen und Sonnenblume).

**Fig. 25:** Seedbed preparation, sowing and soil management on the experimental site of Fachschulzentrum Freiberg-Zug for cultivation of energy and accumulator crop species (here: buckwheat and sunflower).

Aufbauend auf einem Screening nach für das Erzgebirge geeigneten Arten in Gewächshaus- und Laborversuchen (Okoroafor et al. 2022a) sowie Untersuchungen zur Wirkung von Bodenverbesserungsmethoden wie Düngung oder Kalkung (Okoroafor et al. 2022b) bzw. Kulturen von das Pflanzenwachstum fördernden Rhizobakterien (Okoroafor et al. 2022c) auf die Bodenverfügbarkeit von Spurenelementen und deren Akkumulation in den Versuchspflanzen wurden auf einer Versuchsfläche des Fachschulzentrums Freiberg-Zug ausgewählte Arten unter verschiedenen Anbaubedingungen (Applikation von Bodenzusatzstoffen) angebaut (Okoroafor et al. 2022d), um Aussagen über den Wirkungsgrad der Phytoextraktion bzw. Phytostabilisierung unter Freilandbedingungen zu erhalten (Abb. 25). Somit können für kontaminierte, gleichzeitig Wertelemente aufweisende Böden des Erzgebirges und analoger (Bergbaufolge-)Regionen Sachsens Anbaukonzepte für eine wirtschaftliche Inwertsetzung und langfristige nachhaltige Nutzung entwickelt werden.

### (q) Lebensraum Campus - Die Biologische Campusinventur (BIOCAMPUS)

**Auftraggeber:** Eigeninitiative

**Laufzeit:** 1999 – heute

**Ziel** des vor über 20 Jahren begonnenen Projekts ist es, die Biodiversität des TU-Campus Nord (Schwerpunkt Leipziger Straße) und der angrenzenden Umgebung zu erfassen und zu dokumentieren und eine fachliche Grundlage für eine ökologische Gestaltung des Campus zu bieten. Dazu wurden bei gezielten Erhebungen (z. B. im Rahmen des Tages der Artenvielfalt zur 1. Nacht der Wissenschaft am 07.07.2007) sowie bei verschiedenen ökologischen Lehrveranstaltungen im Studiengang Geoökologie (z. B. Modul Freilandökologie, Modul Projekt Angewandte Ökologie u. a.) und diversen studentischen Arbeiten (z. B. Brauer 2002, Tautenhahn 2002, Kästner 2005, Schipek 2005, Süß 2005, Fritsch 2006, Lamert 2007) alle auf dem Campus und den unmittelbar angrenzenden Lebensräumen vorkommenden Tier-, Pflanzen- und Pilzarten erfasst, dokumentiert und ggf. kartiert (s. auch Broschüre zum TU-Campus als artenreichem Lebensraum, Richert et al. 2009). Bedingt durch diverse Baumaßnahmen sowie Baumfällungen sind im Verlauf der Jahre leider einige Flächen und Lebensräume verloren gegangen bzw. nachhaltig gestört worden. Die auf dem TU-Campus und unmittelbar angrenzender Bereiche bis Juli 2022 insgesamt festgestellten Pflanzen-, Pilz- und Tierarten summieren sich auf insgesamt 1.082 Arten (Tabelle 1), davon 573 Pilz-, Flechten- und Pflanzenarten und 509 Tierarten. In Anhang 3 sind die bisher nachgewiesenen Taxa (Arten, Artengruppen etc.) zusammengestellt.

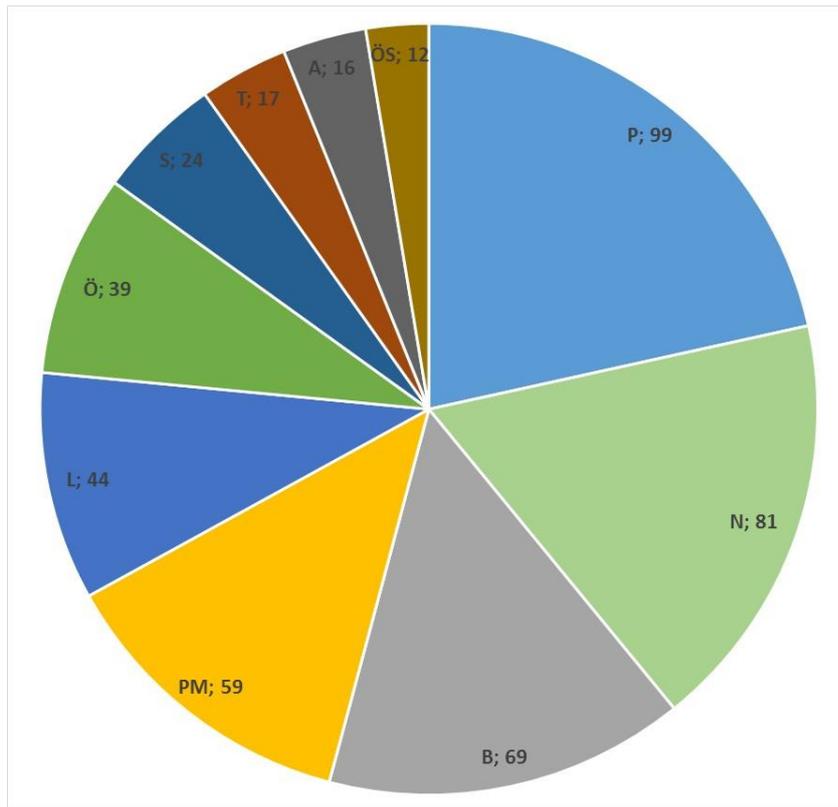
### 3.3 Publikationen

In Anhang 4 sind die in der AG Biologie / Ökologie im Zeitraum 1996 bis Juli 2022 entstandenen Publikationen zusammengestellt. Die insgesamt 460 Veröffentlichungen verteilen sich wie folgt auf die Hauptforschungsfelder (vgl. Abb. 26): Etwas mehr als die Hälfte der Publikationen ( $n = 249$ , 54 %) können den Gebieten Populationsökologie (P), Naturschutz (N) und Biozönologie (B) zugeordnet werden, der Rest entfällt insbesondere auf die in den letzten Jahren etablierten bzw. ausgebauten Bereiche Phytomining/Phytoremediation (PM), Ökophysiologie der Pflanzen (Ö), Ökotoxikologie (T), Spurenelement- und Bioanalytik (A), Ökosystemanalyse (ÖS) sowie auf Landschaftsökologie (L) und Sonstiges (S) (Abb. 26).

**Tabelle 1:** Übersicht der auf dem Campus der TU Bergakademie Freiberg nachgewiesenen Artengruppen und deren Artenzahlen (Stand Juli 2022).

**Table 1:** Overview on species groups and their species numbers recorded on the campus of TU Bergakademie Freiberg as of July 2022.

Artengruppe	Arten	Tiere	
<b>Pilze, Flechten, Pflanzen</b>		Spinnen (Araneae)	35
Phytoplankton (Algen etc.)	53	Libellen (Odonata)	26
Pilze	118	Springschrecken (Orthoptera)	14
Flechten	41	Zikaden (Auchenorrhyncha)	50
Moose	39	Wanzen (Heteroptera)	59
Farne und Schachtelhalme	9	Käfer (Coleoptera)	30
Samenpflanzen	313	Zweiflügler (Diptera)	21
<b>Summe Arten</b>	<b>573</b>	Schmetterlinge (Lepidoptera):	63
		Fische (Pisces)	7
		Amphibien, Reptilien (Amphibia, Reptilia)	8
		Vögel (Aves)	105
		Säugetiere (Mammalia)	22
		Sonstige Tiergruppen	68
		<b>Summe Tierarten</b>	<b>509</b>



**Abb. 26:** Anzahl an Publikationen der Arbeitsgruppe pro Forschungsgebiet von 1996 bis Juli 2022 (n = 460).

**Fig. 26:** Number of publications of the working group per research field from 1996 until July 2022 (n = 460).

**Forschungsfelder/research fields:** P = Populationsbiologie/population biology, B = Biozönologie/community ecology, N = Naturschutz/nature conservation, L = Landschaftsökologie/landscape ecology, Ö = Ökophysiologie der Pflanzen/ecophysiology of plants, PM = Phytomining/phytomining, S = Sonstiges/other, T = Ökotoxikologie/ecotoxicology, A = Spurenelement- und Bioanalytik/trace element and bio-analytics, Ö = Ökosystemanalyse/ecosystem analyses.

#### 4. Online-Zeitschrift „Freiberg Ecology online“ (FECO)

Die 2016 gegründete Online-Zeitschrift **Freiberg Ecology online (FECO)** (open access, ISSN 2366-9551) dient der Veröffentlichung von Forschungsergebnissen aus Forschungsprojekten, studentischen Arbeiten, Lehrveranstaltungen und Tagungen der AG Biologie / Ökologie (s. Heilmeyer et al. 2016a). Dabei handelt es sich um eine elektronische Zeitschrift, deren Artikel unter folgender URL online verfügbar sind: <https://tu-freiberg.de/feco>. Als Editor-in-Chief fungiert der Leiter der Arbeitsgruppe Prof. Dr. Hermann Heilmeyer, während die wissenschaftlichen Mitarbeiter(innen) als Subject-Editoren für bestimmte Fachgebiete zuständig sind. Das Editorial Board setzt sich aus ehemaligen Mitarbeiter(inne)n und Doktorand(inn)en zusammen. Die Veröffentlichungen in „Freiberg Ecology online“ beschränken sich somit auf Artikel von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der AG Biologie / Ökologie, Mitgliedern des Editorial Boards, Studentinnen und Studenten der Arbeitsgruppe sowie auf Vertreter(innen) von Kooperations- und Forschungspartnern (Institute, Institutionen, Verbände, Behörden, Firmen).

In den bisher erschienenen sechs Jahrgangsbänden und drei Special Issues wurden 36 **Publikationen** veröffentlicht, die insgesamt 565 Seiten umfassen (s. Tabelle A3, Anhang 1). Die Veröffentlichungen entstanden im Rahmen von studentischen Arbeiten (n = 15 Publikationen, 42 %) und/oder Lehrveranstaltungen (n = 14, 39 %) und/oder Forschungsprojekten (n = 11, 31 %) sowie im Rahmen von Tagungen (n = 7, 19 %).

Die Publikationstätigkeit in der AG-eigenen Online-Zeitschrift zeitigte verschiedene **positive Effekte für Lehre und Forschung**: Für die Studierenden ergab sich durch eine Publikation in „Freiberg Ecology online“ die Möglichkeit, zum einen das wissenschaftliche Publizieren zu erlernen, einzuüben und erste Referenzen zu erhalten, und zum anderen, die eigenen Forschungsergebnisse der Fachwelt sowie einer breiten Öffentlichkeit zu präsentieren und mit Fachkolleg(inn)en zu diskutieren. Neben der Eröffnung eines Einblicks in die Forschungstätigkeit der AG Biologie / Ökologie am Institut für Biowissenschaften und am IÖZ der TU Bergakademie Freiberg werden dabei die wichtigsten gewonnenen Erkenntnisse und Untersuchungsergebnisse der regionalen und überregionalen Fachwelt für eigene, ggf. weiterführende Forschungen zugänglich gemacht (vgl. Heilmeyer et al. 2016a).

## 5. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der AG Biologie / Ökologie

In Tabelle A4 in Anhang 1 sind die derzeitigen und ehemaligen **Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter** der AG Biologie / Ökologie seit 1996 zusammengestellt. Bei den meisten der insgesamt 24 Personen handelte es sich um rein über Forschungs- bzw. Drittmittelprojekte angestellte Mitarbeitende (n = 14, 58 %), der Rest waren bzw. sind reine Haushaltsangestellte oder Haushaltsangestellte, die auch über Drittmittelprojekte angestellt waren (jeweils n = 5, 21 %). Ergänzt wurde die Lehre, insbesondere zu Themengebieten, die durch die angestellten Lehrenden fachlich oder zeitlich nicht abgedeckt werden konnten, durch die Vergabe von externen **Lehraufträgen** (Zusammenstellung s. Tabelle A5, Anhang 1). Seit 1996 wurden für bestimmte Lehrveranstaltungen insgesamt acht Lehrbeauftragte betraut, die zum einen aus anderen Forschungseinrichtungen (z. B. Helmholtzzentrum für Umwelt UFZ Leipzig-Halle) oder aus der Praxis (z. B. Naturschutzzentrum Freiberg, Umweltbüro Annett Weiß) stammen. Acht Forschende kamen zudem im Rahmen von Stipendien (z. B. Humboldt-Stiftung, DAAD) als **Gastwissenschaftlerinnen und Gastwissenschaftler** in die Arbeitsgruppe Biologie / Ökologie (Anhang 1, Tabelle A6).

## 6. Summary

This contribution provides an overview on teaching and research activities of the Biology / Ecology Unit (Arbeitsgruppe Biologie / Ökologie) at the Institute for Biosciences of TU Bergakademie Freiberg since it was established in 1996. From winter term 1996 until summer term 2022 in total 56 courses had been developed and provided, mainly for the study programs geocology and applied natural science. Furthermore, 314 students' theses have been supervised (160 undergraduate and bachelor theses, 136 diploma and master theses, 17 PhD theses). Most of the theses were conducted in geocology and in the research fields community ecology, population biology, landscape ecology and ecophysiology/soil ecology/phytomining. The most frequently studied habitat and landscape types in the field studies was post-mining landscape (34 % of the theses), followed by standing and streaming water bodies, grasslands, and residential areas. As examples of education materials developed, the booklet on mandatory plant and animal species, the booklet for knowledge of mandatory plant species, and specific OPAL courses are presented. For the 16 research projects conducted by the Biology / Ecology Unit, the focus of research shifted from more conceptual research and development projects on national, state and regional level at the beginning (e. g., sustainability indicator for species richness and landscape quality of Germany, concept for species conservation in Saxony) to more applied projects in the fields of nature conservation / habitat and landscape management (e. g., EU project on Natura 2000 habitat monitoring by using remote sensing techniques) and phytomining (e. g., BMBF project on extraction of Germanium by plants). Since 1996 in total 460 publications have been published by the scientific staff of the working unit, mainly in the research fields of population biology and community ecology, nature conservation and landscape ecology, and phytomining and ecosystem analysis. In the online journal „Freiberg Ecology online“ (FECO) which was founded in 2016 and is edited by the working group, 10 volumes with in total 36 papers with results from courses, students' theses, research projects and meetings have been published.

## Danksagung

Wir danken unserer Sekretärin Monique Leibelt für ihr großes Engagement, die hervorragende Sekretariatsarbeit und kompetente Unterstützung bei allen Verwaltungs- und Finanzaufgaben, durch die sie wesentlich zum Gelingen der dargestellten Lehraufgaben und Forschungsprojekte beigetragen hat. Darüber hinaus möchten wir ihr für die zahlreichen Zuarbeiten zu dieser Veröffentlichung danken. Wir bedanken uns auch bei allen ehemaligen und derzeitigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Biologie / Ökologie für ihr hohes Engagement und ihre erfolgreiche Arbeit in Lehre, Forschung und Verwaltung. Den Kolleginnen und Kollegen aus der Fakultät 2 (Chemie und Physik) und der Fakultät 3 (Geowissenschaften/Bergbau) danken wir für die gute und inspirierende Zusammenarbeit in Forschung und Lehre, für spannende gemeinsame Exkursionen und für die vielfältige Unterstützung. Alle Absolventinnen und Absolventen sowie Doktorandinnen und Doktoranden unserer Arbeitsgruppe lieferten mit ihrer Arbeit und ihrem Engagement wichtige wissenschaftliche Beiträge zu den Forschungsprojekten und Publikationen.

## 7. Literatur

- Achtziger, R. (2012): Wie kann man Nachhaltigkeit messen? Der bundesdeutsche Nachhaltigkeitsindikator für Artenvielfalt und Landschaftsqualität als Beispiel. *ACAMONTA 19 – Zeitschrift der Freunde und Förderer der Technischen Universität Bergakademie Freiberg*: 86-89.
- Achtziger, R., Stickroth, H. & Zieschank, R. (2004): Nachhaltigkeitsindikator für die Artenvielfalt – ein Indikator für den Zustand von Natur und Landschaft in Deutschland. *Angewandte Landschaftsökologie* 63: 137 S.
- Achtziger, R., Frieß, T. & Rabitsch, W. (2007): Die Eignung der Wanzen (Heteroptera) als Indikatoren im Naturschutz. *Insecta* 10: 5-39.
- Achtziger, R., Fleischer, J. & Preißer, T. (2013): Besiedelung von Renaturierungsflächen im Braunkohletagebau Welzow-Süd (Brandenburg) durch Zikaden (Auchenorrhyncha). *DGaaE-Nachrichten* 28(1): 27-28.
- Achtziger, R., Holzinger, W.E., Nickel, H. & Niedringhaus, R. (2014): Zikaden (Insecta: Auchenorrhyncha) als Indikatoren für die Biodiversität und zur naturschutzfachlichen Bewertung. *Insecta* 14: 37-62.
- Achtziger, R., Richert, E. & Köstner, B. (2021a): DAS: Bildungsmodule zur Rolle der Biodiversität bei Anpassungen des Weinbaus an den Klimawandel (BIODIVina) – Schlussbericht. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Biowissenschaften, AG Biologie / Ökologie, 25 S.
- Achtziger, R., Köstner, B. & Richert, E. (2021b): DAS-Projekt „Bildungsmodule zur Rolle der Biodiversität bei Anpassungen des Weinbaus an den Klimawandel“ (BIODIVina) – Überblick über die Bildungsmaterialien. *Freiberg Ecology online* 8: 33-56 [ISSN 2366-9551].
- Alexander, C., Deák, B., Kania, A., Mücke, W. & Heilmeier, H. (2015): Classification of vegetation data in an open landscape using full-waveform airborne laser scanner data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 41: 76-87 (URL: <http://authors.elsevier.com/a/1R1oV14ynS21Tg>).
- Bianchin, S., Richert, E., Heilmeier, H., Merta, M. & Seidler, C. (2011): Landscape metrics as a tool for conservation - Assessment of scenarios for flood and nature protection. *Landscape Online*. DOI:10.3097/LO.201125.
- Brauer, A. (2002): Auswirkungen der Bewirtschaftung von Grünflächen auf die Vegetation als Grundlage für die Optimierung der Grünflächenpflege auf dem TU-Campus aus naturschutzfachlicher und ökonomischer Sicht. *Studienarbeit Studiengang Geoökologie*.
- Bundesregierung (2002): Perspektiven für Deutschland – Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Berlin, 343 S.
- Bundesregierung (Hrsg.) (2021a): Aktiv für die biologische Vielfalt. Rechenschaftsbericht 2021 der Bundesregierung zur Umsetzung der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt. 142 S.
- Bundesregierung (Hrsg.) (2021b): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021. 391S.
- Deak, D., Valko, O., Alexander, C., Mücke, W., Kania, A., Tamas, J. & Heilmeier, H. (2014): Fine-scale vertical position as an indicator of vegetation in alkali grasslands – Case study based on remotely sensed data. *Flora* 209: 693-697.
- Franz, S. (2013): Phytotoxicity of triclosan in systems of different biological complexity: Causal analysis of sensitivity differences of microalgae. *Dissertation Studiengang Geoökologie*, in Kooperation mit Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig.
- Fritzsche, D. (2006): Erfassung von Nistplätzen besonders geschützter Vogelarten an Gebäuden des Campus der TU BAF. *Studienarbeit Studiengang Geoökologie*.
- Groß, U. & Stoyan D. (2015): Das Interdisziplinäre Ökologische Zentrum der Bergakademie. In: Stoyan, D. (Hrsg.) (2015): *Bergakademische Geschichten. Aus der Historie der Bergakademie Freiberg erzählt* anlässlich des 250. Jahrestages ihrer Gründung. Mitteldeutscher Verlag, Halle/S., Leipzig: 417-430.
- Günther, A., Nigmann, U. & Achtziger, R. (2005): Analyse der Gefährdungsursachen von planungsrelevanten Tiergruppen in Deutschland zur Ergänzung der bestehenden Roten Listen gefährdeter Tiere. In: Günther, A., Nigmann, U., Achtziger, R. & Gruttko, H. (Bearb.) (2005): *Analyse der Gefährdungsursachen von planungsrelevanten Tiergruppen in Deutschland*. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 21: 19-613.
- Häuser, L. (2021): Biototypenausstattung und landschaftsökologische Analyse der Altbergbauhalden in der Freiburger Bergbaufolgelandschaft. *Freiberg Ecology online* 9: 1-41 + 3 Anhänge.
- Heilmeier, H. & Wiche, O. (2020): The PCA of phytomining: principles, challenges and achievements. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 15(1): 37-42 (DOI: 10.26471/cjees/2020/015/106).
- Heilmeier, H., Achtziger, R., Günther, A., Richert, E. & Wiche, O. (2016a): 20 Jahre ökologische Forschung und Lehre an der TU Bergakademie Freiberg – eine Analyse der studentischen Arbeiten (1996 – 2016). *Freiberg Ecology online* 1: 4-20 [ISSN 2366-9551].
- Heilmeier, H., Achtziger, R., Günther, A., Richert, E. & Wiche, O. (2016b): Editorial zur ersten Ausgabe von „Freiberg Ecology online“ (FECO). *Freiberg Ecology online* 1: 1-3 [ISSN 2366-9551].
- Heilmeier, H., Achtziger, R., Günther, A., Richert, E. & Wiche, O. (2016c): Bergbaufolgelandschaften – ideale Standorte zur Anwendung von Prinzipien der Ökologie. In: Groß, U. (Hrsg.): *Glanzlichter der Forschung an der TU Bergakademie Freiberg – 250 Jahre nach ihrer Gründung*. Chemnitzer Verlag, S. 451-459 [ISBN 978-3-944509-26-6].
- Heilmeier, H., Wiche, O., Tesch, S., Schreiter, N., Aabel, I. & Bertau, M. (2016d): PhytoGerm – Germaniumgewinnung aus Biomasse. In: Dürkoop, A., Brandstetter, C.P., Gräbe, G. & Rentsch, L. (Hrsg.): *Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien. Ergebnisse der r<sup>3</sup>-Fördermaßnahme*, S. 221-235. Fraunhofer Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-8396-1102-9.
- Heilmeier, H., Wiche, O., Tesch, S., Aabel, I., Schreiter, N. & Bertau, M. (2016e): Germaniumgewinnung aus Biomasse – PhytoGerm. In: Thomé-Kozmiensky, K. & Goldmann, D. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe* 9: 177-192 TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin.
- Heilmeier, H., Wiche, O., Moschner, C., Richert, E., Heineemann, U., Aabel, I., Schreiter, N., Tröbs, R., Bertau, M., Tesch, S., Fuhrland, M., Schlenker, U., Rudolf, A. & Neumann, L. (2016f, unpubl.): Germaniumgewinnung aus Biomasse (PhytoGerm). *Schlussbericht an das BMBF*, 62 S.

- Heilmeier, H., Achtziger, R., Richert, E. & Wiche, O. (2017): Editorial zum FECO-Sonderband „Ökologische und geochemische Untersuchungen auf der Spülhalde David-schacht in Freiberg“. Freiberg Ecology online 2: 1-3 [ISSN 2366-9551].
- Heilmeier, H., Wiche, O., Aubel, I., Bertau, M. & Ferchau, E. (2019): Bergbau mit Pflanzen – Bioakkumulation von Wertstoffen für eine umweltfreundliche Ressourcengewinnung. ACAMONTA 26: 40-43.
- John, H., Achtziger, R., Göhler, N., Günther, A., Olias, M. & Richert, E. (2014): Das Scheidenblütgras (*Coleanthus subtilis*) in Sachsen – Vorkommen, Gefährdung und Gewässermanagement. Naturschutzarbeit in Sachsen 56: 44-61.
- Kaiser, S., Moschner, C. & Wiche, O. (2019): Accumulation of germanium in grasses. Freiberg Ecology online 6: 9-15.
- Kästner, A. (2005): Erfassung von Fledermäusen auf dem Campus der TU Bergakademie Freiberg. Studienarbeit Studiengang Geoökologie.
- Kästner, A., Achtziger, R., Günther, A. & Heilmeier, H. (2012): Naturschutzfachliche Bewertung des Renaturierungserfolgs in der Bergbaufolgelandschaft am Beispiel des Tagebaus Nochten (Lausitz). mining+geo 02/2012, 318-323.
- Lamert, H. (2007): Versuche zur Etablierung artenreicher Grünlandgesellschaften auf ausgewählten Flächen des Campus der TU Bergakademie Freiberg. Studienarbeit Studiengang Geoökologie.
- Moschner, C., Feuerstein, U., Heilmeier, H., Zaffar, N. & Wiche, O. (2020): Effect of substrate properties on the mobility of selected trace elements in soil and concentrations in shoots of *Phalaris arundinacea*. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences 15: 49-56.
- Nigmann, U., Günther, A., Achtziger, R. & Gruttke, H. (2006): Major threats to animal species in Germany – results of a nation wide expert and literature survey. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie 36: 414.
- Oertel, C. (2007, unpubl.): Aufbau eines Pflichtartenmerkhafes (Teil Pflanzen) für Studierende der Geoökologie. Studienarbeit Studiengang Geoökologie.
- Okoroafor, P.U., Ogunkunle, C.O., Heilmeier, H. & Wiche, O. (2022a): Phytoaccumulation potential of nine plant species for selected nutrients, rare earth elements (REEs), germanium (Ge), and potentially toxic elements (PTEs) in soil. International Journal of Phytoremediation (in press).
- Okoroafor, P.U., Kunisch, N., Epede, M.N., Ogunkunle, C.O., Heilmeier, H. & Wiche, O. (2022b): Phytoextraction of germanium, rare earth elements and potentially toxic elements as affected by fertilization and liming. Environmental Technology and Innovation 28, 102607.
- Okoroafor, P.U., Mann, L., Ngu, K.A., Zaffar, N., Monei, N., Boldt, C., Reitz, T., Heilmeier, H. & Wiche, O. (2022c): Phytoaccumulation of nutrients, germanium, rare earth elements, potentially toxic elements and bacterial community structure in the rhizosphere as affected by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42. Plants 022, 11: 341.
- Okoroafor, P.U., Ikwuka, G., Zaffar, N., Epede, M.N., Mensah, M.K., Johann, H., Golde, A., Heilmeier, H. & Wiche, O. (2022d): Field studies on the effect of bioaugmentation with *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 on plant accumulation of rare earth elements and selected trace elements. Minerals 1: 409 S.
- Richert, E., Bianchin, S., Heilmeier, H., Matschullat, J., Seidler, C., Merta, M., Hammer, G. & Lenz, U. unter Mitarbeit von Achtziger, R., Höhlig, S., Pöhler, H., Schrioff, A. & Weiß, A. (2007, unpubl.): Hochwasser- und Naturschutz im Weißeritzkreis (HochNatur). Endbericht an die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), 142 S.
- Richert, E. & Achtziger, R. (Koordination/Bearbeitung) unter Mitarbeit von Seidler, C., Mertha, M., Matschullat, J., Rüter, S., Wilhelm, E.-G., Schmidt, P. A., Zocher, J. & Roch, T. (2007): DBU-Broschüre „Wasser + Landschaft – Arbeitsgrundlage zur Optimierung einer nachhaltigen Landnutzung aus Sicht des Hochwasserschutzes und des Natur- und Landschaftsschutzes“. Deutsche Bundesstiftung Umwelt und Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum (IÖZ) der TU Bergakademie Freiberg (Hrsg.), 16 S.
- Richert, E., Achtziger, R. & Günther, A. (2009): Vielfalt statt Einfalt: Der Campus der TU Bergakademie Freiberg als artenreicher Lebensraum. Broschüre der TU Bergakademie Freiberg, 16 S.
- Richert, E., Bianchin, S., Heilmeier, H., Merta, M. & Seidler, C. (2011a): A method for linking results from an evaluation of land use scenarios from the viewpoint of flood prevention and nature conservation. Landscape and urban planning 103:118–128. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2011.07.001
- Richert, E., Rüter, S., Seidler, C. & Wilhelm, E.-G. (2011b): Naturschutz und Hochwasservorsorge – unvereinbare Gegensätze? Ableitung und Bewertung von Maßnahmen aus interdisziplinärer Sicht. Hercynia N.F. 44(1): 39–52.
- Richert, E., Günther, A. & Achtziger, R. (2011c): Konzeption für den Artenschutz in Sachsen - fachliche Grundlagen und Priorisierung. Naturschutzarbeit in Sachsen 53: 4–19.
- Richert, E., Achtziger, R. & Günther, A., Olias, M. (2012): Konzeption für den Artenschutz in Sachsen. In: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.). Schriftenreihe des LfULG, Heft 35/2012: 1-52. [ISSN 1867-2868]
- Richert, E., Achtziger, R., Günther, A., Hübner, A., Olias, M. & John, H. (2014): Das Scheidenblütgras (*Coleanthus subtilis*) – Vorkommen, Ökologie und Gewässermanagement. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.), Broschüre, 52 S.
- Richert, E., Achtziger, R., Pollakis, J. & Richter, F. (2015): Vergleichende Analyse der Bergwiesen des deutschen und tschechischen Osterzgebirges – Bewirtschaftung, Vegetationszusammensetzung und -struktur. Hercynia 48 (2): 137-158.
- Richert, E., Achtziger, R., Dajdok, Z., Günther, A., Heilmeier, H., Hübner, A., John, H. & Šumberová, K. (2016): Rare wetland grass *Coleanthus subtilis* in Central and Western Europe – habitat types, current distribution and threats. Acta Societatis Botanicorum Poloniae 86 (3) (3511):1-16. (DOI 10.5586/asbp.3511).
- Riedl, J. (2014): Diagnosis of chemical-induced effects in *Myriophyllum spicatum* using metabolomics. Dissertation extern, in Kooperation mit Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig.
- Rotter, S. (2013): Pollution-Induced Community Tolerance of Periphyton as a Tool for Environmental Effect Assessment. Dissertation extern, in Kooperation mit Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig.
- Schipek, M. (2005): Gestaltungsvorschläge zur Entwicklung von ausgewählten Biotopen auf dem Campus der TU Bergakademie Freiberg. Studienarbeit Studiengang Geoökologie.

- Schmitt, G., Achtziger, R., Heilmeier, H., Nigmann, U., Richert, E. & Stickroth, H. (2001): F&E-Vorhaben „Modell für eine Gesamtkonzeption zum Tierartenbestandsmonitoring des Bundes am Beispiel der Vogelfauna“. Artenschutzreport, Heft11/2001: 18-20.
- Schreiter, N., Wiche, O., Aubel, I., Roode-Gutzmer, Q. & Bertau, M. (2021): Determination of germanium in plant and soil samples using high-resolution continuum-source graphite furnace atomic absorption spectrometry (HR-CS GFAAS) with solid sampling. *Journal of Geochemical Exploration* 220, 106674.
- Schwabe, R., Dittrich, C., Kadner, J., Senges, C.H.R., Bandow, J.E., Tischler, D., Schlömann, M., Levicán, G. & Wiche, O. (2021): Secondary metabolites released by the rhizosphere bacteria *Arthrobacter oxydans* and *Kocuria rosea* enhance plant availability and soil-plant transfer of germanium (Ge) and rare earth elements (REEs). *Chemosphere* 285: 131466.
- Sieland, R., Tautenhahn, K., John, H., Meißner, K. & Achtziger, R. (2008): Zeitliche Entwicklung des Strandlings (*Littorella uniflora*) und der Gewässertrübung in vier Freiburger Bergwerksteichen im Jahr 2006. Mitteilungen des Naturschutzzentrums Freiberg, Heft 4 / 2008: 46-61.
- Statistisches Bundesamt (2021): Nachhaltige Entwicklung in Deutschland. Indikatorenbericht 2021. Broschüre, 168 S. URL: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Nachhaltigkeitsindikatoren/Publikationen/Downloads-Nachhaltigkeit/indikatoren-0230001219004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Nachhaltigkeitsindikatoren/Publikationen/Downloads-Nachhaltigkeit/indikatoren-0230001219004.pdf?__blob=publicationFile)
- Stickroth, H., Schmitt, G., Achtziger, R., Nigmann, U., Richert, E. & Heilmeier, H. (2003): Konzept für ein naturschutzorientiertes Tierartenmonitoring - am Beispiel der Vogelfauna. *Angewandte Landschaftsökologie* 50: 1-398.
- Stickroth, H., Schlumprecht, H. & Achtziger, R. (2004): Zielwerte für den „Nachhaltigkeitsindikator für die Artenvielfalt“ – Messlatte für eine nachhaltige Entwicklung in Deutschland aus Sicht des Natur- und Vogelschutzes. *Berichte zum Vogelschutz* 41: 78-98.
- Süß, E. (2005): Planung eines Gehölzlehrpfades auf dem Campus der TU Bergakademie Freiberg. Studienarbeit Studiengang Geoökologie.
- Sukopp U. (2007): Der Nachhaltigkeitsindikator für die Artenvielfalt. Ein Indikator für den Zustand von Natur und Landschaft. In: Gedeon, K., Mitschke, A. & Sudfeldt, C. (Hrsg.): Brutvögel in Deutschland. Zweiter Bericht. Eigenverlag des Dachverbandes Deutscher Avifaunisten, Hohenstein-Ernstthal: 34-35.
- Tautenhahn, S. (2002): Auswirkungen der Bewirtschaftung von Grünflächen auf Insektengemeinschaften (Zikaden, Wanzen) als Grundlage für die Optimierung der Grünflächenpflege auf dem TU-Campus aus naturschutzfachlicher und ökonomischer Sicht. Studienarbeit Studiengang Geoökologie.
- von Carlowitz, H.C. (1713): *Sylvicultura oeconomica* oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht. Leipzig.
- Wahl, J., M. Busch, R. Dröschmeister, C. König, K. Koffijberg, T. Langgemach, C. Sudfeldt & S. Trautmann (2020): Vögel in Deutschland – Erfassung von Brutvögeln. DDA, BfN, LAG VSW, Münster.
- Wiche, O. & Heilmeier, H. (2016): Germanium (Ge) and rare earth element (REE) accumulation in selected energy crops cultivated on two different soils. *Minerals Engineering* 92: 208-215.
- Wiche, O. & Heilmeier, H. (2019): Editorial zum FECO-Sonderband „Ökophysiologie des Wurzelraumes“. *Freiberg Ecology online* 6: 1-2.
- Wiche, O., Kummer, N.-A. & Heilmeier, H. (2016a): Interspecific root interactions between white lupin and barley enhance the uptake of rare earth elements (REEs) and nutrients in shoots of barley. *Plant and Soil* 402: 235-245.
- Wiche, O., Szekely, B., Kummer, N.-A., Moschner, C. & Heilmeier, H. (2016b): Effects of intercropping of oat (*Avena sativa* L.) with white lupin (*Lupinus albus* L.) on the mobility of target elements for phytoremediation and phytomining in soil solution. *International Journal of Phytoremediation*, 2016. DOI: 10.1080/15226514.2016.1156635.
- Wiche, O., Tischler, D., Fauser, C., Lodemann, J. & Heilmeier, H. (2017): Effects of citric acid and the siderophore desferrioxamine B (DFO-B) on the mobility of germanium and rare earth elements in soil and uptake in *Phalaris arundinacea*. *International Journal of Phytoremediation* 19: 746-754
- Wiche, O., Szekely, B., Moschner, C. & Heilmeier, H. (2018): Germanium in the soil-plant system – a review. *Environmental Science and Pollution Research* (2018) 25: 31938–31956 (DOI: 10.1007/s11356-018-3172-y).
- Zaffar, N., Ferchau, E., Feuerstein, U., Heilmeier, H., Moschner, C. & Wiche, O. (2020): Concentration of selected plant nutrients and target elements for phytoremediation and phytomining in biogas digestate. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 15: 43-48.
- Zaffar, N., Ferchau, E., Heilmeier, H., Boldt, C., Salcedo, L.D.P. & Reitz, T. (eingereicht): Reactors temperature affect enrichment and chemical fractionation of plant nutrients, potentially toxic trace elements and economically valuable elements in digestate from anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*.
- Zieschank, R., Stickroth, H. & Achtziger, R. (2004): Der Indikator für die Artenvielfalt. *Seismograph für den Zustand von Natur und Landschaft. - politische ökologie* 91-92: 58-59.
- Zlinszky, A., Heilmeier, H., Balzter, H., Czucz, B. & Pfeifer, N. (2015): Remote sensing and GIS for habitat quality monitoring: New approaches and future research. *Remote Sensing* 7: 7987-7994.

### Anschriften der Autor(inn)en:

**Heilmeier, Hermann\***; **Achtziger, Roland**; **Richert, Elke**; **Wiche, Oliver**: TU Bergakademie Freiberg, Institut für Biowissenschaften / Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum (IÖZ), AG Biologie / Ökologie, Leipziger Straße 29, 09599 Freiberg, E-Mail: [hermann.heilmeier@ioez.tu-freiberg.de](mailto:hermann.heilmeier@ioez.tu-freiberg.de); [roland.achtziger@ioez.tu-freiberg.de](mailto:roland.achtziger@ioez.tu-freiberg.de); [elke.richert@ioez.tu-freiberg.de](mailto:elke.richert@ioez.tu-freiberg.de); [oliver.wiche@ioez.tu-freiberg.de](mailto:oliver.wiche@ioez.tu-freiberg.de).

**Günther, André**: Naturschutzzentrum Freiberg, Bernhard-Kellermann-Straße 20, 09599 Freiberg, E-Mail: [andre.guenther@extern.tu-freiberg.de](mailto:andre.guenther@extern.tu-freiberg.de)

\*Korrespondierender Autor

**Anhänge 1 bis 4** siehe gesonderte Dateien / Appendices 1 to 4 see separate files