



universität
wien

DIPLOMARBEIT / DIPLOMA THESIS

Titel der Diplomarbeit / Title of the Diploma Thesis

„Die Serpentinegruppe im Botanischen Garten der Universität
Wien - Geobotanische und pflanzenökologische Aspekte
von Lebensräumen über Serpentin“

verfasst von / submitted by

Peter Pumpler

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Magister der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat.)

Wien, 2016 / Vienna, 2016

Studienkennzahl lt. Studienblatt / degree
programme code as it appears on the student
record sheet:

A 190 445 333

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree program as it appears on
the student record sheet:

Lehramtsstudium
UF Biologie und Umweltkunde, UF Deutsch

Betreut von / Supervisor:

Ao. Univ.-Prof. Dr. Michael Kiehn

Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.

Danksagung

Nachdem die Thematik dieser Diplomarbeit botanische, fachwissenschaftliche, evolutionsbiologische, ökologische, naturschutzkundliche und auch fachdidaktische Aspekte vereint, möchte ich an dieser Stelle zunächst meinen Dank darüber ausdrücken, mich im Rahmen meiner Abschlussarbeit in diesem persönlich bereichernden und hochinteressanten Spannungsfeld bewegt zu haben. Trotz der Höhen und Tiefen, die mit der Erstellung dieser Arbeit einhergingen, waren das Interesse an und die Begeisterung für das Thema beständiger Begleiter und wesentlicher Motivator.

Mein Dank gebührt in erster Linie meinem Diplomarbeitsbetreuer und Leiter der Core Facility Botanischer Garten Dr. Michael Kiehn, der das Thema angeboten und sich für die Betreuung der Arbeit zur Verfügung gestellt hat, der bei Fragen und Anliegen binnen kürzester Zeit konstruktive Antworten gab und mir stets das beruhigende Gefühl vermittelte, am richtigen Weg zu sein.

Zu höchstem Dank verpflichtet bin ich vor allem auch meiner Schreibgruppe, insbesondere Sabine, Maria und Barbara, die mir in wechselnder Konstellation während des gesamten Entstehungsprozesses wesentliche Stütze und bedeutender Motivationsfaktor waren, die Monate an den verschiedensten Bibliotheken erheiterten und in höchstem Maße dazu beigetragen haben, dass diese Arbeit ihre Fertigstellung und Vollendung gefunden hat.

Meinem Freundeskreis und meiner Familie möchte ich für die mentale Unterstützung und für das Verständnis danken, dass ich während der Erstellung dieser Arbeit kaum greifbar war, meinem Arbeitgeber für die Zurverfügungstellung der für die Erstellung dieser Arbeit notwendigen Zeitressourcen.

Auf meine Studienzeit zurückblickend werde ich diesen Lebensabschnitt Dank der Menschen, die mir im Laufe dieser Zeit begegnet sind, Dank der Freundschaften, die sich entwickelt haben, und Dank der bereichernden, horizontenerweiternden Inhalte, die geboten wurden, stets wohlgesonnen und positiv in Erinnerung behalten.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Inhaltsverzeichnis	III
1. Einleitung.....	1
1.1. Die Diplomarbeit als Beitrag für den Botanischen Garten	1
1.2. Die Diplomarbeit als Beitrag zur Umsetzung der GSPC.....	4
1.3. Wissenschaftliche Fragestellung und methodische Vorgangsweise.....	7
2. Geobotanische Grundlagen.....	9
2.1. Petrologische Aspekte	11
2.1.1. Geologische Annäherung	11
2.1.2. Klassifizierung der Protolithen	14
2.1.3. Die Minerale der Serpentin-Gruppe	17
2.1.4. Prozesse der Serpentinisierung und dessen Subprozesse	20
2.2. Pedologische Aspekte.....	25
2.2.1. Die Rolle des Bodens für die Vegetation.....	27
2.2.2. Schwermetallböden und ihr Einfluss auf die Vegetation.....	31
2.2.3. Serpentinböden und ihre biotischen und abiotischen Eigenschaften	37
2.3. Pflanzenphysiologische und –morphologische Besonderheiten	44
2.3.1. Morphologische Modifikationen: Serpentinomorphosen	45
2.3.2. <i>Anpassungen an den niedrigen Ca:Mg-Quotienten</i>	48
2.3.3. Anpassungen an den Nährstoffmangel.....	50
2.3.4. <i>Anpassungen an Wassermangel, erhöhte Temperaturen und Trockenheit</i>	51
2.3.5. <i>Anpassungen an erhöhte Schwermetallgehalte</i>	55
2.3.6. Anpassungen zur Abwehr von Herbivoren	59
2.4. Evolutive Aspekte des Sonderstandorts Serpentininit.....	60

2.4.1.	Der Prozess der Speziation an Serpentinstandorten	61
2.4.2.	Endemismus am Sonderstandort.....	65
2.4.3.	Taxonomische Herausforderungen.....	70
3.	Serpentinophyten und ihr Lebensraum	77
3.1.	Die Physiognomie des Biotoptypus Serpentinstandort	78
3.1.1.	Serpentin-Rot-Föhrenwälder	81
3.1.2.	Serpentin-Trockenrasen.....	83
3.1.3.	Serpentin-Felsspaltenfluren.....	85
3.2.	Schutz der Lebensräume	88
3.2.1.	Serpentinstandorte im Bernsteiner und Günser Bergland.....	88
3.2.2.	Serpentinstandorte im Gurhofgraben bei Melk in Niederösterreich	90
3.2.3.	Serpentinstandorte bei Kraubath in der Steiermark.....	93
3.3.	Serpentinophyten der Serpentin-Schaugruppe im Porträt.....	95
3.3.1.	<i>Alyssum montanum</i> var. <i>preissmannii</i>	97
3.3.2.	<i>Arabidopsis arenosa</i>	98
3.3.3.	<i>Asplenium cuneifolium</i>	99
3.3.4.	<i>Campanula persicifolia</i>	100
3.3.5.	<i>Cyclamen purpurascens</i>	101
3.3.6.	<i>Dianthus carthusianorum</i> subsp. <i>capillifrons</i>	102
3.3.7.	<i>Digitalis grandiflora</i>	103
3.3.8.	<i>Dorycnium germanicum</i>	104
3.3.9.	<i>Galium austriacum</i>	105
3.3.10.	<i>Genista pilosa</i>	106
3.3.11.	<i>Jovibarba globifera</i> subsp. <i>hirta</i>	107
3.3.12.	<i>Noccaea goesingensis</i>	108
3.3.13.	<i>Notholaena marantae</i>	109

3.3.14.	<i>Potentilla crantzii</i> var. <i>serpentini</i>	110
3.3.15.	<i>Sedum acre</i>	111
3.3.16.	<i>Sempervivum pittonii</i>	112
3.3.17.	<i>Silene vulgaris</i>	113
3.3.18.	<i>Tephroseris integrifolia</i> subsp. <i>serpentini</i>	114
3.3.19.	<i>Veronica austriaca</i>	115
3.3.20.	<i>Veronica officinalis</i>	116
4.	Diskussion, Conclusio und Ausblick.....	117
	Quellenverzeichnis	127
	Abbildungsverzeichnis.....	139
	Anhang A: Gartenplan und Legende	143
	Anhang B: Objectives & Targets der GSPC	145
	Anhang C: Liste Serpentinstandorte im Ostalpenraum	146
	Anhang D: Karten Schwermetallstandorte in Österreich.....	147
	Anhang E: Wichtige taxonomische Rangstufen	148
	Anhang F: Zusammenfassung.....	149

1. Einleitung

Bei Serpentinstandorten handelt es sich um sehr kleinräumig ausgeprägte edaphische Inseln, die biogeographisch weltweit nur äußerst selten an der Erdoberfläche und somit an der Biosphäre Anteil nehmend vorkommen. Serpentinegebiete werden durch außergewöhnliche abiotischen Bedingungen charakterisiert, welche auf den spezifischen petrologischen Eigenschaften der bodenbildenden Ausgangsgesteine fundieren. Die Summe der abiotischen und biotischen Faktoren, welche auch als Serpentinphänomen oder Serpentin Syndrom bezeichnet wird, generiert das kennzeichnende Erscheinungsbild der serpentin Flora sowie der serpentin Lebensräume. In Anpassung an diese Sonderstandorte weisen Pflanzen auf Serpentinböden eine Vielzahl an evolutiv bedingten und durchaus erstaunlichen Mechanismen auf, die es ihnen ermöglicht, mit den widrigen bzw. extremen Parametern über Serpentin umgehen zu können.

Diese Diplomarbeit mit dem Titel „Die Serpentinegruppe im Botanischen Garten der Universität Wien - Geobotanische und pflanzenökologische Aspekte von Lebensräumen über Serpentin“ widmet sich den Serpentinstandorten und ihren geobotanischen und pflanzenökologischen Charakteristika. Die Arbeit steht einerseits im Dienste des Botanischen Gartens der Universität Wien, in welchem im Jahr 2015 eine neue Schaugruppe zum Thema „Serpentinophyten“ eröffnet wurde, andererseits kann sie auch als Beitrag zur Umsetzung der GSPC (global strategy for plant conservation) in Österreich gewertet werden. Im Folgenden werden diese beiden der Arbeit zugrundeliegenden Intentionen näher erläutert.

1.1. Die Diplomarbeit als Beitrag für den Botanischen Garten

Der Botanische Garten der Universität Wien wurde im Jahr 1754 unter Maria Theresia gegründet, um den Studierenden der medizinischen und chemischen Fakultät der Universität bestmögliche Bedingungen für das Studium der Pflanzen zu bieten. Er befindet sich im Zentrum Wiens in unmittelbarer Nachbarschaft zum Belvedere und nahe des Wiener Hauptbahnhofs. Als Core Facility der Fakultät für Lebenswissenschaften dient er der Beforschung, Sammlung, Erhaltung und dem Schutz von Pflanzen (wie auch von Tieren und

Ökosystemen¹) in ihrer ganzen Vielfalt (vgl. Kiehn & Knickmann, 2015, S. 3–4). Auf ca. acht Hektar Freilandfläche wachsen in etwa 5 000 Pflanzenarten, welche in Form von verschiedenen thematischen Schaugruppen zusammengestellt sind (vgl. Anhang A: Gartenplan und Legende). Weiters befinden sich ca. 6 500 Arten in den 1350m² umfassenden Gewächshäusern (vgl. Kiehn & Knickmann, 2015, S. 9). Informationsträger wie Schaukästen, Infoblätter, Etiketten bis hin zu den Nutzer oder die Nutzerin weiterführenden QR-Codes bieten den jährlich rund 150 000 Besucherinnen und Besuchern des Botanischen Gartens Orientierungshilfen und Informationsquellen zu den Arten, welche im Botanischen Garten präsentiert werden (vgl. Kiehn & Knickmann, 2015, S. 3–6).

Die Serpentinegruppe im Botanischen Garten der Universität Wien wurde am 14. Oktober 2015 im Rahmen einer Gartenführung offiziell eröffnet. Österreich weist mehrere sehr kleine Serpentinorkommen auf. Die größten Vorkommen befinden sich bei Bernstein im Burgenland, im Gurhofgraben in Niederösterreich und in der Umgebung von Kraubath in der Steiermark. Um die hochspezialisierte Flora über Serpentin auch im Botanischen Garten der Universität Wien zu repräsentieren, wurde den Serpentinophyten im Jahr 2015 eine neu angelegte Schaugruppe gewidmet. Diese befindet sich im jüngsten Teil des Gartens, welcher, benannt nach dem Arzt und Botaniker Nicolaus Thomas Host als „Host'scher Garten“, erst seit den 1970er Jahren öffentlich zugänglich gemacht ist. Die Serpentin-Schaugruppe, bezeichnet als Gruppe 47 (vgl. Gartenplan und Legende), ist Teil der in diesem Gartenbereich seit den 1990er Jahren entstehenden „Flora von Österreich“ mit dem Schwerpunkt „Pannonische Gruppe“, welche etwa 160 Arten aus verschiedenen Trockenvegetationstypen des Ostens Österreichs beherbergt. Als „Arche Noah“ für gefährdete Arten beherbergt die Pannonische Gruppe somit bedrohte Arten, deren Genpool ex-situ im Botanischen Garten erhalten wird und welche in der Gruppe auch wissenschaftlich studiert werden können. Auf diese Weise können Artenschutzaktivitäten sowohl ex-situ (z.B. Erforschung der Keim- und Wachstumsbedingungen in Kultur) als auch in-situ (z.B. durch Unterstützungsmaßnahmen im Management der natürlichen Lebensräume) zielgerichtet miteinander verknüpft werden (vgl. Kiehn & Knickmann, 2015, S. 37–42). Die Serpentinegruppe zeigt eine Auswahl an Taxa, welche fakultativ oder obligat an Serpentinstandorte gebunden sind.

¹ **Ökosystem:** Die Gesamtheit an interagierenden abiotischen und biotischen Komponenten in einem abgegrenzten Gebiet (Bresinsky, Körner, Kadereit, Neuhaus & Sonnewald, 2008, S. 746).

Artenliste zur Serpentinegruppe im Botanischen Garten der Universität Wien (Stand September 2015):

1. *Alyssum montanum* var. *preissmannii* (Preissmann-Berg-Steinkraut)
2. *Arabidopsis* (= *Cardaminopsis*) *arenosa* (Sand-Schaumkresse)
3. *Asplenium cuneifolium* (Serpentin-Streifenfarn)
4. *Avenula adsurgens* subsp. *adsurgens* (Eigentlicher Aufsteigender Wiesenhafer)
5. *Campanula persicifolia* (Wald-Glockenblume oder Pfirsichblatt-Glockenblume)
6. *Cyclamen purpurascens* (Alpen-Zyklame)
7. *Dianthus carthusianorum* subsp. *capillifrons* (Serpentin-Karthäuser-Nelke)
8. *Digitalis grandiflora* (Groß-Fingerhut oder Großblütiger Fingerhut)
9. *Dorycnium germanicum* (Seidenhaar-Backenklee)
10. *Festuca* sp. (Schafschwingel)
11. *Festuca guestfalica* (Wald-Schafschwingel)
12. *Galium austriacum* (Österreich-Labkraut)
13. *Genista pilosa* (Heide-Ginster oder Sand-Ginster oder Haar-Ginster)
14. *Hieracium floribundum* subsp. *floribundum* (Reichblüten-Mausohrhabichtskraut)
15. *Hylotelephium maximum* (Quirl-Waldfetthenne)
16. *Jovibarba globifera* subsp. *hirta* (Kurzhaar-Donarsbart oder Kurzhaarige-Kugel-Fransenhauswurz)
17. *Knautia norica* (Norische Witwenblume)
18. *Koeleria pyramidata* subsp. *pubiculmis* (Serpentin-Kammschmiele)
19. *Nocca goesingensis* (Gösing-Täschelkraut)
20. *Notholaena marantae* (Europa-Pelfarn)
21. *Potentilla alba* (Weißes Fingerkraut)
22. *Potentilla crantzii* var. *serpentina* (Serpentin-Crantz-Fingerkraut)
23. *Sedum acre* (Scharf-Mauerpfeffer)
24. *Sempervivum pittonii* (Serpentin-Hauswurz)
25. *Silene nutans* (Nickendes Leimkraut)
26. *Silene vulgaris* (Aufgeblasenes Leimkraut)
27. *Stellaria holostea* (Große Sternmiere)
28. *Thymus pulegioides* (Arznei-Quendel)
29. *Veronica austriaca* (Österreich-Ehrenpreis)
30. *Veronica officinalis* (Arznei-Ehrenpreis)

Die Eröffnung der Serpentinegruppe im Botanischen Garten in Verbindung mit einem nur fragmentarisch vorhandenen, unzureichenden Bestand an übersichtlichen deutschsprachigen oder aus dem deutschsprachigen Raum stammenden Informationsquellen zum Thema Serpentinpflanzen war aus Perspektive des Botanischen Gartens auch Anlass und Grund dafür, dieses Diplomarbeitsthema zu vergeben. Mit dem Ziel, einen kausalanalytischen Zusammenhang zwischen Ausgangsgestein, Bodenkonstitution, evolutiven Prozessen, Anpassungsmechanismen der Pflanzen sowie den bestehenden taxonomischen Herausforderungen herzustellen, sollen im Rahmen dieser Diplomarbeit sowohl die

geobotanischen Grundlagen als auch die ökologischen, evolutiven und naturschutzkundlichen Facetten zu Lebensräumen über Serpentin zusammengetragen, analysiert und aus diesen Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Weiters werden für 20 Serpentin-taxa aus der Serpentinegruppe Pflanzenporträts entwickelt, die den Besucherinnen und Besuchern im Botanischen Garten als Informationsquelle zur Verfügung gestellt werden können. Intention dieser Diplomarbeit ist es auch, als Grundlage für die weitere Didaktisierung und Projektierung der Serpentinegruppe im Botanischen Garten der Universität Wien dienen zu können. Sie kann als Ausgangspunkt und Basis für die Entwicklung und Durchführung von neuen Projekten im Botanischen Garten zum Thema Serpentinophyten und ihrem Lebensraum, um welche das Themenrepertoire der Grünen Schule erweitert und bereichert werden soll, betrachtet werden. Vielfach wird angeführt und vermutet, dass Serpentinstandorte das Potential hätten, als Modell für evolutive Prozesse, Artbildungsprozesse, Diversitätsentwicklung und für pflanzenmorphologische Manifestationen, die sich im Zusammenspiel aus abiotischen Bedingungen und biotischen Abhängigkeiten begründen, dienen zu können. „Serpentine environments are not just a fascinating and unique phenomenon in themselves but offer premier opportunities to study the origins, development, diversity, and function of life on a heterogeneous planet.“ (Harrison & Rajakaruna, 2011a, S. XIV). Auf Basis der in dieser Diplomarbeit durchgeführten Analysen zur Geobotanik des Biotoptypus Serpentinstandort werden daher im Kapitel 4. Diskussion, Conclusio und Ausblick auch Vorschläge und Überlegungen präsentiert, die das didaktische Potential der Serpentinegruppe betreffen und deren Eignung als Modell für biologische Prozesse überprüfen.

1.2. Die Diplomarbeit als Beitrag zur Umsetzung der GSPC

Diese Diplomarbeit steht nicht nur im Dienste des Botanischen Gartens, sondern soll auch einen österreichischen Beitrag zur Umsetzung der „Globalen Strategie zur Erhaltung der Pflanzen“ (GSPC) darstellen. Bei der GSPC (Global Strategy for Plant Conservation) handelt es sich um ein im Rahmen des Übereinkommens über die Biologische Vielfalt (Convention on Biological Diversity, CBD) entwickeltes internationales Konzept zum Erhalt der Biodiversität und insbesondere zum Schutz der wildlebenden Pflanzenarten und ihrer Lebensräume. Die GSPC wurde im Jahr 2002 im Zuge der 6. Vertragsstaatenkonferenz des Übereinkommens über

die Biologische Vielfalt in Den Haag (Niederlande) einstimmig verabschiedet und beinhaltet ein Maßnahmenpaket zum Erhalt der Biodiversität bestehend aus 16 Zielen („targets“), die fünf Themenschwerpunkten („objectives“) zugeordnet sind (vgl. Anhang B: Objectives & Targets der GSPC). Während die Strategie vordergründig den Schutz der Pflanzenvielfalt propagiert und forciert, werden auch Maßnahmen wie Erfassung und Dokumentation der Pflanzenvielfalt, nachhaltige Nutzung der Pflanzenvielfalt, die Förderung von Bildung und Bewusstsein über die Pflanzenvielfalt und der Aufbau fachlicher Kapazitäten zur Erhaltung der Pflanzenvielfalt berücksichtigt. Die Ziele wurden ergebnisorientiert und daher auch mess- und überprüfbar formuliert und sollten in einer ersten Phase bis 2010 erreicht werden. Mit Ende dieser ersten Umsetzungsperiode (GSPC 2010) erfuhren die Zielformulierungen, deren Anzahl quantitativ betrachtet gleich blieb, eine Aktualisierung. Die anvisierten Zielvorgaben sollen nun von allen teilnehmenden Ländern der Erde bis zum Jahr 2020 (GSPC 2020) erfüllt werden (vgl. Botanic Gardens Conservation International, o. J.; vgl. Kiehn, 2011; vgl. Sharrock & Botanic Gardens Conservation International, 2012; vgl. Umweltbundesamt GmbH, o. J.-a).

In Bezug auf die Zielsetzungen der GSPC, welche wie von jedem anderem Vertragsstaat der Biodiversitätskonvention auch in Österreich bis 2020 erreicht werden sollen, betrifft die Serpentinegruppe im Botanischen Garten der Universität Wien insbesondere Ziel 8, welches dem Themenschwerpunkt II „Plant diversity is urgently and effectively conserved“ angehört:

GSPC 2020 “Target 8: At least 75 per cent of threatened plant species in ex situ collections, preferably in the country of origin, and at least 20 per cent available for recovery and restoration programmes.” (Sharrock & Botanic Gardens Conservation International, 2012, S. 18)

Anhand von Ex-situ-Sammlungen wird die Pflanzendiversität außerhalb ihres natürlichen Lebensraums erhalten. Ex-situ-Erhaltung stellt eine essenzielle Sicherheitsvorkehrung dar, um im Falle des Verlustes der wildlebenden Populationen reproduzierbare bzw. genomsichernde Fortpflanzungseinheiten zu erhalten. Formen der Ex-situ-Erhaltung sind zum Beispiel die Samenkonservierung, In-vitro-Konservierung wie Pflanzengewebskulturen oder Kältekonservierung, der Erhalt in Genbanken oder die lebenden Sammlungen in den Botanischen Gärten. Mit der GSPC 2020 wurde im Vergleich mit GSPC 2010 das Ziel, gefährdete Pflanzenarten in zugänglichen Ex-situ-Sammlungen zu erhalten, von 60 Prozent auf 75 Prozent erhöht und die Prozentanzahl, welche in Wiederansiedlungs- und Wiederherstellungsprogrammen eingesetzt werden soll, von 10 auf 20 Prozent verdoppelt

(vgl. Sekretariat des Übereinkommens über die Biologische Vielfalt & Botanic Gardens Conservation International, 2007, S. 9; vgl. Sharrock & Botanic Gardens Conservation International, 2012, S. 18–19).

Die Serpentinegruppe im Botanischen Garten der Universität Wien stellt wie auch die darin vorkommenden Taxa eine Rarität unter den Schaugruppen von Botanischen Gärten dar. Laut Information von Seiten der Leitung des Core Facility Botanischer Garten der Universität Wien scheint weder österreich- noch europaweit ein Botanischer Garten eine vergleichbare Schaugruppe mit lebenden Serpentinophyten zu zeigen. Nachdem die Schaugruppe zahlreiche fakultative und obligate Serpentinophyten präsentiert, welche auch entsprechend Roter Listen gefährdet oder sogar stark gefährdet sind, stellt die Installierung der Gruppe einen wesentlichen Beitrag zum Erhalt der Biodiversität dar, weil diese sowohl zur langfristigen Sicherung und dem Erhalt von seltenen und gefährdeten Taxa dient, als auch als den Zielen der GSPC entsprechende Maßnahme zur Umsetzung der GSPC betrachtet werden kann.

Zusätzlich zum Ziel 8 betrifft die Installierung der Serpentinegruppe sowie die in diesem Rahmen erstellte Diplomarbeit auch die Ziele 14 bis 16, zugehörig zu den „objectives“ IV „Education and awareness about plant diversity, its role in sustainable livelihoods and importance to all life on earth is promoted“ und V „The capacities and public engagement necessary to implement the Strategy have been developed“. Mit den in Kapitel „3.3 Serpentinophyten der Serpentin-Schaugruppe im Porträt“ präsentierten Pflanzenporträts, deren Intention es ist, den Besucherinnen und Besuchern des Botanischen Gartens zugänglich gemacht zu werden, besteht das Potential, die Aufmerksamkeit der Gartenbesucherinnen und -besucher gezielt auf einzelne Taxa der Serpentinegruppe zu lenken und Hintergrundinformationen zum jeweiligen Taxon zu vermitteln. Als öffentlich zugängliche, im universitären Kontext entstandene Abschlussarbeit fungiert diese Diplomarbeit außerdem als Medium und Kanal, um Wissenstransfer zu geobotanischen, ökologischen, evolutiven und naturschutzkundlichen Facetten des Lebensraums über Serpentin anzubieten. Eine Auseinandersetzung mit den Arten der Serpentinegruppe, mit ihrer ökologischen Bedeutung und mit ihrem Gefährdungsgrad fördert die Bewusstseinsbildung und Sensibilisierung gegenüber diesem Biotoptypus und der mit dieser assoziierten Pflanzenvielfalt. Auf diese Weise wird Wissen über die in diesem Biotoptypus vorkommenden hochangepassten,

seltenen und gefährdeten Taxa generiert und dem Phänomen der „plant blindness“² entgegengewirkt. Maßnahmen wie die Installierung und Eröffnung der Serpentinegruppe, die Gestaltung und der Einsatz von Schau- bzw. Informationstafeln, eine mit dieser Diplomarbeit im universitären Kontext erstellte Abschlussarbeit, welche weiters auch mit einer umfassenden Sensibilisierung einer zukünftigen Lehrkraft einhergeht, die in die Lage versetzt wird, die erworbenen Kenntnisse weiterzuvermitteln, und auf dieser Diplomarbeit fußend zukünftige anvisierte Projekte zur Serpentinegruppe, die zum Beispiel im Rahmen der Grünen Schule Umsetzung finden könnten, entsprechen den Zielen 14-16 der GSPC (Sharrock & Botanic Gardens Conservation International, 2012):

GSPC 2020 „Target 14: The importance of plant diversity and the need for its conservation incorporated into communication, education and public awareness programmes“

GSPC 2020 “Target 15: The number of trained people working with appropriate facilities sufficient according to national needs, to achieve the targets of this Strategy”

GSPC 2020 “Target 16: Institutions, networks and partnerships for plant conservation established or strengthened at national, regional and international levels to achieve the targets of this Strategy”

Aus den vorangegangenen Ausführungen schlussfolgernd kann somit festgestellt werden, dass die Serpentinegruppe im Botanischen Garten der Universität Wien und die mit dieser in Verbindung stehende Diplomarbeit in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Bestreben, die Ziele der GSPC in Österreich umzusetzen, steht. Somit scheint es möglich, die mit dieser Serpentinegruppe durchgeführten Maßnahmen als österreichische Beiträge zur Umsetzung der mit der GSPC verbundenen Ziele zu werten.

1.3. Wissenschaftliche Fragestellung und methodische Vorgangsweise

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die abiotischen und biotischen Faktoren des Lebensraums über dem Gestein Serpentin zu erarbeiten, um Kausalitäten zwischen Ausgangsgestein, Bodenökologie und Charakteristika der serpentin Flora herstellen und ableiten zu können.

² **Plant blindness:** „Pflanzenblindheit“ bezeichnet das Phänomen, dass Pflanzen in der Natur, wenn überhaupt, nur als Hintergrund wahrgenommen werden (vgl. Kiehn & Knickmann, 2015, S. V)

Weiters sollen pflanzenmorphologische und –physiologische Merkmale hinsichtlich der evolutiven Prozesse, welche die Physiognomie und Physiologie von Serpentinpflanzen formten, untersucht werden. Im Kontext der edaphischen, evolutiven und floristischen zu ergründenden Zusammenhänge soll eine ganzheitliche Betrachtung und Darstellung der Ökologie der Serpentinflora anvisiert werden. Diese Intention spiegelt sich in folgender dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsfrage wider:

Forschungsfrage: Welche abiotischen Faktoren charakterisieren Serpentinstandorte und welche evolutiv bedingten pflanzenphysiologischen Anpassungen resultieren aus diesen petrologischen und pedologischen Gegebenheiten?

Um die Forschungsfrage im Lichte aktueller biologischer Erkenntnisse erarbeiten zu können, wird versucht, primär auf wissenschaftliche Publikationen, die aus Untersuchungen zur Geologie und Ökologie von Serpentinstandorten aus den letzten Jahren resultieren, zurückzugreifen. Die Erarbeitung der wissenschaftlich fundierten Deskriptoren von Serpentinstandorten basiert daher mehrheitlich auf Forschungsarbeiten, die weltweit an Serpentinstandorten durchgeführt und deren Ergebnisse, wie in den Naturwissenschaften üblich, in der Fachsprache Englisch publiziert wurden. Als methodische Herangehensweise, auf welcher die Ergebnisse dieser Arbeit beruhen, kann daher die Analyse aktueller fachwissenschaftlicher Quellen wie Papers und Sammelreihen, genannt werden. Diese Ergebnisse wurden im Zuge der Erarbeitung der allgemeinen Deskriptoren von Serpentinstandorten miteinander und auch mit Inhalten chemischer, biologischer bzw. botanischer Standardwerke in Beziehung gesetzt und neu strukturiert. Diese Vorgangsweise soll es ermöglichen, petrologische, pedologische, pflanzenphysiologische und -morphologische sowie evolutive Kennzeichen serpentiner Lebensräume zu identifizieren und abschließende Rückschlüsse fachlicher als auch fachdidaktischer Natur zu ziehen.

In Bezug auf die Nomenklatur der in dieser Arbeit präsentierten Serpentin taxa soll festgehalten sein, dass primär und sofern nicht auf eine andere Quelle verwiesen auf das nomenklatorische Konzept zurückgegriffen wird, welches in der dritten Auflage der Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol nach Manfred A. Fischer, Karl Oswald und Wolfgang Adler aus dem Jahr 2008 präsentiert wird.

2. Geobotanische Grundlagen

Die Wissenschaft der Geobotanik beschäftigt sich mit dem Vorkommen und der Verbreitung von Pflanzen im geographischen Raum und mit der Dynamik der Verbreitungsareale im Lauf der Zeit (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 1). Sie beschreibt die Vegetationslandschaften der Erde und widmet sich u.a. den ökologischen Disziplinen der Vegetationskunde, der Floren- und Vegetationsgeschichte, der Standortkunde und den Interaktionen von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen mit Boden und Klima. Sie behandelt Fragen, die von der reinen Botanik zur Geographie überleiten und die Komplexität von ökologischen Systemen erfassen, wie die Verbreitung von Pflanzenarten und deren Gesetzmäßigkeiten, die Ursachen dieser Verbreitung in raum-zeitlicher Sicht, die Zusammensetzung, der Aufbau, die Funktion und das Zusammenwirken von Vegetationstypen und Ökosystemen, das Verständnis evolutiver Entwicklung von Geo- und Biodiversität sowie Schutz und Erhalt natürlicher Artenvielfalt in den Lebensräumen der Erde (vgl. Pott, 2005, S. 1 ff).

Im Fokus dieses Kapitels steht die Erarbeitung der geobotanischen Grundlagen, welche Standorte über Serpentinitt charakterisieren. Serpentinstandorte treten weltweit als kleine edaphische Inseln an die Erdoberfläche und werden primär aufgrund ihrer spezifischen abiotischen Bedingungen als Sonderstandorte ausgewiesen. „From the arctic tundra to the tropical rainforest, ultramafic rocks support a highly unusual flora distinguishable from its surroundings both in physiognomy and in species composition.“ (Brooks, 1987, S. 5). Sonderstandorte sind Areale, deren morphologische Erscheinung und deren Pflanzengesellschaften in erster Linie nicht durch das Klima geprägt werden, sondern aus außergewöhnlichen bis hin zu extremen edaphischen bzw. bodenbedingten Faktoren resultieren. Nichtklimatische Faktoren wie Wasser-, Nährstoff-, Schwermetallgehalte oder Bodentyp dominieren über den Einfluss der klimatischen Wirkungen. Edaphisch bedingte Sonderstandorte werden durch eine azonale Vegetation charakterisiert, deren Weiterentwicklung zu einer den angrenzenden Gebieten entsprechenden Klimax-Gesellschaft³ aufgrund bestimmter edaphischer Ökofaktoren nicht möglich ist. Als weitere

³ **Klimax:** Das Endstadium der natürlichen Vegetationsentwicklung im Gleichgewicht mit dem (Groß-) Klima (vgl. Fischer, Oswald & Adler, 2008, S. 1281); zeigt in Folge der natürlichen Sukzessionsphasen ein nun entstehendes relativ stabiles Gleichgewicht in der Artenzusammensetzung (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 1070).

Beispiele für Sonderstandorte können neben den Serpentinböden vergleichend auch Felsspalten, Schutthalden, Salzsteppen oder Auwälder, Quellfluren, Hochmoore, etc. genannt werden (vgl. Fischer, Oswald & Adler, 2008, S. 133).

Da zwischen den Eigenheiten einzelner Lebensräume und dem spezifischen Vorkommen der einzelnen Pflanzensippen korrelative Beziehungen bestehen (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 1), soll nun in kausalanalytischer Herangehensweise versucht werden, die Beziehungen zwischen Ausgangsgestein, Bodenökologie und deren Effekt auf die Vegetation an den Sonderstandorten über Serpentin aufzuzeigen. „Although these rocks and soils comprise less than 1% of earth's terrestrial surface, they have received significant attention for their atypical chemical characteristics and the unusual plants that grow on them [...]“ (Oze, Skinner, Schroth & Coleman, 2008, S. 3392).

Im Sinne einer kausalanalytischen und geobotanischen Annäherung werden daher zunächst die petrologischen Charakteristika der Serpentine erarbeitet, indem deren Ausgangsgesteine, deren Mineralogie und der Prozess der Serpentinisierung behandelt werden. Anschließend wird versucht, die Zusammenhänge zwischen der Chemie der Protolithen und den sehr spezifischen abiotischen und biotischen Bedingungen von Serpentinböden herzustellen. Kapitel 2.2. Pedologische Aspekte mündet in einer Beschreibung der wichtigsten chemischen, physikalischen und auch biologischen Parameter, mit welcher Fauna und Flora auf Serpentinböden konfrontiert sind. Auf Basis der petrologischen und pedologischen Aspekte werden im Anschluss an diese Ausführungen die evolutiv bedingten pflanzenphysiologischen und pflanzenmorphologischen Mechanismen analysiert, welche Pflanzen auf Serpentinböden aufweisen. Abschließend und mit Bezug auf die Erkenntnisse der vorangegangenen Inhalte bietet Kapitel 2.4. Evolutive Aspekte des Sonderstandorts Serpentin einen Blick auf die evolutiven Aspekte zur Flora auf Serpentinstandorten. Behandelt werden Artbildungsprozesse, das Endemiten-Phänomen und die mit diesen evolutiv bedingten Entwicklungen einhergehenden Herausforderungen für die Taxonomie bzw. die Eingliederung der Taxa in die bestehenden hierarchisch aufgebauten Rangstufen des Systems der Pflanzen.

2.1. Petrologische Aspekte

Im Zuge der Auseinandersetzung mit Serpentinpflanzen soll zunächst den geologischen und pedologischen Faktoren besondere Beachtung geschenkt werden. Denn die abiotischen Faktoren bedingen und erklären sowohl die chemischen, physikalischen und biologischen Deskriptoren als auch pflanzenphysiologische Besonderheiten der Arten an Serpentinstandorten. Als Namensgeber für die Gruppe der Serpentinophyten wirkt das Gestein Serpentin, welches im Prozess der Bodenbildung das Ausgangsgestein für die Entstehung von Serpentinböden darstellt. Die spezifische chemische Zusammensetzung des Serpentinits hat somit Einfluss auf den Boden, welcher sich an den jeweiligen Standorten im Zuge der Verwitterung bildet (vgl. Campbell, Reece, Held & Markl, 2008, S. 923). Das Gestein Serpentin und dessen Geochemie stellt an den Serpentinstandorten die Basis für die vorherrschenden abiotischen Faktoren dar, mit welchen Flora und Fauna zurechtkommen müssen.

2.1.1. Geologische Annäherung

Serpentinböden kommen weltweit vor und treten als kleine, geographisch isolierte, edaphische Inseln⁴ auf. „Serpentine soils are ubiquitous, but patchily distributed“ (Brady, Kruckeberg & Bradshaw Jr., 2005, S. 245). Knapp 1% der gesamten Erdoberfläche kann als Serpentinegebiet definiert werden (vgl. Kazakou, Dimitrakopoulos, Baker, Reeves & Troumbis, 2008, S. 496). In Österreich fehlen zwar ausgedehnte, riesige Serpentinittkomplexe, jedoch existiert eine Vielzahl kleiner bis mittelgroßer Vorkommen konzentriert auf die Gebiete der Böhmisches Masse sowie entlang der Zentralalpen (vgl. Justin, 1993, S. 1034). Die drei bedeutendsten Vorkommen von Serpentinvegetation und -flora in Österreich finden sich bei Kraubath in der Steiermark, in der niederösterreichischen Gemeinde Dunkelsteinerwald (Gurhofgraben) und im Umland von Bernstein im Burgenland. Die Serpentinstandorte in Österreich können als verarmte nördliche Ausläufer reichhaltiger Serpentinittvorkommen in

⁴ **Edaphische Inseln:** Serpentinstandorte können als edaphische Inseln bezeichnet werden, da die Standorte aufgrund ihrer spezifischen abiotischen Bodenverhältnisse in Analogie zu Inseln in einem Ozean eine isolierte Stellung einnehmen.

süd-osteuropäischen Ländern wie Bosnien und Serbien betrachtet werden (vgl. Michalek, Dillinger, Höttinger & Staufer, 2015, S. 14).

In Annäherung an ein Themenfeld, das eng mit petrologischen Phänomenen assoziiert ist, gilt es, zunächst den Begriff „Gestein“ zu definieren: „Gesteine sind feste oder lockere, natürliche Mineralgemenge der festen Erdkruste.“ (Scheffer, Schachtschabel, Blume & Thiele, 2010, S. 28). Gesteine sind demnach natürliche, nicht künstlich hergestellte Materialien, deren Grad an Festigkeit variiert. Gesteine bestehen aus Mineralien, Bruchstücken von Mineralen oder Gesteinen, Organismenresten oder in einigen Fällen auch aus nicht mineralischer Substanz (wie zum Beispiel die aus Pflanzenrückständen entstandene Kohle) (vgl. Press, Siever, Grotzinger & Jordan, 2011, S. 73).

Als Minerale werden die Baustoffe der Gesteine bezeichnet. Minerale sind chemisch und physikalisch homogene, natürliche Bestandteile der festen Erdkruste. Diese werden aus einem Element oder aus einer Verbindung mehrerer Elemente gebildet und sind kristallisiert, sie besitzen daher eine regelhafte, innere Struktur (vgl. Stahr, Kandeler, Herrmann & Streck, 2012, S. 29). In diesem Sinne definieren auch Press et al.: „Ein Mineral ist ein homogener, natürlich vorkommender, kristalliner, im Allgemeinen anorganischer Festkörper bestimmter chemischer Zusammensetzung.“ (Press u. a., 2011, S. 54).

Obwohl mehrere tausend Minerale existieren, bilden lediglich etwa dreißig davon den Großteil der Krustengesteine. Diese werden auch als gesteinsbildende Minerale bezeichnet. Die gängigsten gesteinsbildenden Minerale sind (vgl. Press u. a., 2011, S. 62):

- **Silikate:** bestehen aus den beiden häufigsten Elementen der Erdkruste Sauerstoff (O) und Silicium (Si), sind die verbreitetsten unter den gesteinsbildenden Mineralien
- **Carbonate:** bestehen meist aus den Kationen von Calcium und Magnesium in Verbindung mit Kohlenstoff und Sauerstoff in Form des Carbonat-Anions (CO_3^{2-}), z.B. das Mineral Calcit (CaCO_3) als Hauptbestandteil der Kalksteine
- **Oxide:** Verbindungen von Sauerstoff und gewöhnlich einem Metall als Kation, z.B. das Mineral Hämatit (Fe_2O_3)
- **Sulfide:** Verbindungen des Sulfid-Ions (S^{2-}) mit Metallen als Kation, z.B. das Mineral Pyrit (FeS_2)

- **Sulfate:** Verbindungen des Sulfat-Ions (SO_4^{2-}) mit Metallen als Kation, z.B. das Mineral Anhydrit (CaSO_4)

Etwa 90 Prozent der häufigen Minerale der Erdkruste sind Silikate (vgl. Pott & Hüppe, 2007, S. 92). Die Minerale des Gesteins Serpentin werden wie die meisten gesteinsbildenden Mineralien den Silikaten zugeordnet (vgl. Okrusch & Matthes, 2014, S. 172).

In Bezug auf die Vorgangsweise zur Bezeichnung der verschiedenen Gesteine ist festzuhalten, dass unterschiedliche Möglichkeiten bzw. Herangehensweisen zur Klassifizierung und Benennung existieren: Benennungen von Gesteinen können nach dem Mineralbestand (z.B. Glimmerschiefer), nach dem Chemismus (z.B. saure, intermediäre, basische Magmatite), nach der Textur und Struktur (z.B. grobkörniger/feinkörniger Granit), nach dem Bildungsort (z.B. Plutonite, Vulkanite), nach dem Fossilgehalt (z.B. Bryozoenkalk⁵) oder nach der Typlokalität⁶ (z.B. Adamellit, Tonalit) erfolgen (vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 28).

Bezüglich des Erscheinungsbildes eines Serpentinits variieren Farbe und Textur umfassend. Während Serpentine in den meisten Fällen grau-grüne Farbtöne aufweisen, können sie auch beinahe schwarz bis hin zu grau-weiß erscheinen (vgl. Kruckeberg, 2002, S. 161–162). In der Regel sind es massig-schiefrige, vorwiegend dunkelgrüne Gesteine, die aus Serpentinmineralien wie Lizardit, Antigorit und Chrysotil bestehen. Nicht selten finden sich in den Gesteinen auch Mineralrelikte der Protolithstadien (vgl. Okrusch & Matthes, 2014, S. 443).

Die Herkunft der Bezeichnung für das Gestein Serpentin wurzelt im lateinischen Wort *serpens*, übersetzt Schlange, bzw. *serpentinus*, übersetzt schlangenartig (vgl. Stowasser, Petschenig & Skutsch, 2006, S. 465), und beruht auf den für Serpentine oftmals typischen gesprenkelten Mustern und Flecken, die jenen von Schlangenhäuten ähneln können. Dies veranlasste bereits in der römischen Antike Ärzte und Gelehrte wie Pedanios Dioskurides (50 AD) dazu, das Gestein Serpentin als Abwehrmittel gegen Schlangenbisse zu empfehlen. Im

⁵ **Bryozoa:** Moostierchen. Sessile, stockbildende Lophophorata (besitzen mit Tentakel besetzte Struktur, in die hinein sich die Erweiterung des Coeloms erstreckt) mit kleinen Einzelindividuen und pelagischen Larven (Campbell u. a., 2011, S. 1798, 1816).

⁶ Die **Typlokalität** ist in der Geologie und der Mineralogie der Ort (Lokalität), von dem ein Gestein oder Mineral für dessen erstmalige wissenschaftliche Beschreibung stammt. (vgl. Mineralienatlas - Fossilienatlas, o. J.)

alltäglichen Sprachgebrauch wird der Serpentin auch als Schlangenstein bezeichnet. Es gilt als belegt, dass Bildhauer und Künstler das Gestein seit der Antike zur Herstellung von Skulpturen und künstlerischen Artefakten nutzen (vgl. Roberts & Proctor, 1992, S. 1). Diese Zeitspuren verdeutlichen, dass das Gestein seit mehr als 2000 Jahren bekannt und in anthropogener Nutzung ist. Heutzutage findet der Serpentin Verwendung zur Errichtung von Steinmauern, in der Kunststeinindustrie und wegen seiner Vegetationsfeindlichkeit als Straßen- und Eisenbahnschotter. Weiters werden Schmuck-, Zier- und Gebrauchsgegenstände hergestellt und insbesondere dem Edelserpentin werden Energie- und Heilkräfte mit beruhigender, harmonisierender und glücksbringender Wirkung zugesprochen (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 9).

2.1.2. Klassifizierung der Protolith

Bei Serpentin handelt es sich um ein metamorphes Gestein, das entsprechend der Bildungsvoraussetzung zur Klassifizierung von Metamorphiten auf Basis von Umwandlungsprozessen aus einem anderen Gestein hervorgegangen ist.

Als Protolith (Ausgangsgestein) zur Bildung von Serpentin dienen ultrabasische Plutonite und Vulkanite (vgl. Maresch, Medenbach, Trochim & Steinbach, 1987, S. 216). Mit der Kategorisierung der Protolith als Plutonite und Vulkanite berufen sich Maresch et. al. (1987) auf eine Klassifizierung, die auf die Bildungsorte bzw. den Ort der Kristallisation verweist. Während Plutonite, auch Intrusivgesteine oder Tiefengesteine genannt, durch die Erstarrung von tief in der Erdkruste geschmolzenem Gestein entstehen, bilden sich Vulkanite, auch als Effusivgesteine oder Ergussgesteine bezeichnet, aus an der Erdoberfläche rasch abgekühlten Schmelzen (vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 29). Da sowohl Plutonite als auch Vulkanite stets aus der Erstarrung bzw. Kristallisation einer Gesteinsschmelze stammen, ist das Ausgangsgestein, aus welchem der Serpentin hervorgeht, als magmatisches Gestein bzw. Magmatit zu klassifizieren. Die Schmelzen der magmatischen Gesteine entstehen in großen Tiefen der Erdkruste oder im Oberen Mantel. Magmatite zählen systematisch betrachtet neben dem Sedimentgestein und dem Metamorphit zu den drei großen Gesteinsgruppen der Erde (vgl. Press u. a., 2011, S. 74–75). Klassifiziert werden diese drei großen Gesteinsgruppen anhand ihrer Genese, deren Arten zum Einteilungskriterium avancierten. Als die drei

Hauptentstehungsarten gelten die Erstarrung einer Gesteinsschmelze (Magmatismus), die Ablagerung im Meer oder auf dem Festland (Sedimentation) und die Umwandlung unter Druck- und Hitzeeinwirkung (Metamorphose) (vgl. Scheffer, Schachtschabel, Blume & Thiele, 2010, S. 28). Magmatite bauen zu 95% die Erdkruste auf und sind zu 34% an der Erdoberfläche vertreten (vgl. Stahr u. a., 2012, S. 26).

Sowohl Plutonite als auch Vulkanite werden in saure, intermediäre, basische und ultrabasische Magmatite unterteilt. Diese Einteilung fundiert am jeweiligen SiO_2 -Gehalt des Magmatits (vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 29). Magmatische Gesteine mit einem Kieselsäureanteil von ca. 50% werden als basisch bezeichnet, 70% SiO_2 -Gehalte indizieren saure Magmatite, bei der Gruppe der intermediären liegt der Kieselsäuregehalt zwischen jenen von basischen und sauren Magmatiten. Ist ein Kieselsäuregehalt von deutlich weniger als 50% vorhanden, werden diese der Gruppe der ultrabasischen magmatischen Gesteine zugeordnet (vgl. Maresch u. a., 1987, S. 13). Der Siliciumgehalt eines Gesteins determiniert den Mineralbestand, auf Basis dessen die verschiedenen Magmatite systematisiert werden. Siliciumreiche und somit als „sauer“ bezeichnete Gesteine beinhalten vor allem die Minerale Quarz, Alkalifeldspäte, Na-reiche Plagioklase und Glimmer. Siliciumarme Gesteine, welche der Kategorie der „basischen“ Gesteine zuzuordnen sind, werden vor allem von calciumreichen Plagioklasen und dunklen, eisenhaltigen Pyroxenen, Amphibolen und Olivinen charakterisiert. Saure Magmatite erscheinen folglich in der Regel hell und basische magmatische Gesteine dunkel (vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 29–30).

Nachdem zur Bildung von Serpentiniten ultrabasische Plutonite und Vulkanite dienen, muss es sich bei den Protolithen folglich um magmatische, kieselsäurearme und daher basische, dunkel erscheinende Ausgangsgesteine handeln, deren Mineralzusammensetzung entsprechende Charakteristika aufweist. Die Minerale der Serpentin-Protolithen sind als dunkle Minerale zu klassifizieren. Dunkle Minerale zeigen schwarze bis dunkelgrüne und dunkelbraune Farben und sind in der Regel Magnesium-Eisen-Silikate. Diese werden aufgrund der Magnesium-Eisen-Verbindung auch als Mafite⁷ bezeichnet (vgl. Maresch u. a., 1987, S. 27). Die Bezeichnung „mafisch“ weist stets auf chemische Verbindungen hin, welche Eisen und

⁷ **Mafite:** Das Wort Mafit, welches Magnesium-Eisen-Silikate bezeichnet, enthält als wortbildende Elemente die Anfangsbuchstaben der mineralkonstituierenden Elemente: Ma steht für Magnesium, F (Ferrum) steht für Eisen.

Magnesium enthalten. So definieren auch Press u.a. (2011), dass als ultrabasisches Gestein Magmatite bezeichnet werden, die im Wesentlichen aus mafischen Mineralen bestehen und weniger als zehn Prozent Feldspat und weniger als 45 Prozent SiO_2 enthalten, wie beispielsweise die Gesteine Peridotit, Dunit und Pyroxenit (vgl. Press u. a., 2011, S. 697).

Serpentinite entstehen vor allem aus Peridotiten (vgl. Press u. a., 2011, S. 161). Diese beinhalten dunkle Gemengeteile, die 90% übersteigen und setzen sich überwiegend aus Olivin, Orthopyroxen und Klinopyroxen zusammen. Der olivgrün erscheinende Olivin fungiert als Hauptmineral und verleiht den Peridotiten ihre meist grünliche Farbe (vgl. Maresch u. a., 1987, S. 66).

Entsprechend der Klassifikation der International Union of Geological Sciences (IUGS), welche die Einteilung der Magmatite nach ihrem modalen Mineralbestand (sprich nach dem prozentualen Anteil der in einem Gestein vorhandenen Minerale in Volums-Prozenten) verbindlich regelte, werden mafische (dunkle) Gesteine (Mafite) mit einem Gemengeanteil von >90 Vol.-% an mafischen Mineralen als holomelanokrate bzw. ultramafische Magmatite bezeichnet. Zur Beschreibung der Mineralzusammensetzung wird ein Dreieck entsprechend der von Streckeisen entwickelten „Streckeisen-Diagramme“ verwendet, welches die Anteile Ol – Olivin, Opx – Orthopyroxen und Cpx – Klinopyroxen grafisch darstellt (vgl. Abbildung 1). Dieses Dreieck zeigt, dass ultramafische Gesteine mit einem Olivinegehalt >40-Vol.% als Peridotite bezeichnet werden, während Ultramafite mit einem Olivinegehalt <40-Vol.% als Pyroxenite benannt werden. Die Gesteine Dunit, Harzburgit, Lherzolit und Wehrlit sind demnach den Peridotiten zuzurechnen (vgl. Okrusch & Matthes, 2014, S. 217–219).

Neben Eklogit ist Peridotit Hauptbestandteil des Oberen Erdmantels (Okrusch & Matthes, 2014, S. 522 ff) und Ausgangsgestein der basaltischen Schmelzen (vgl. Press u. a., 2011, S. 686).

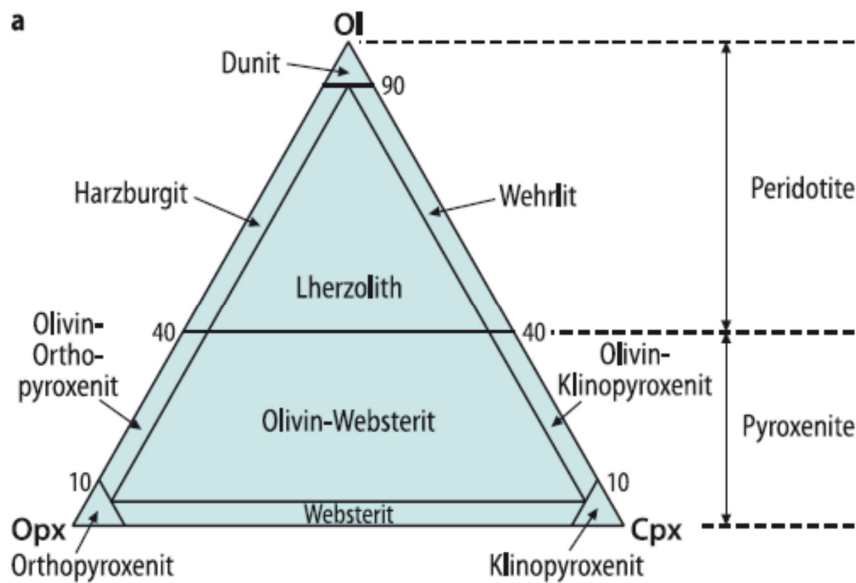


Abbildung 1: Zur Klassifizierung ultramafischer Magmatite wird das Dreieck Ol-Opx-Cpx verwendet (Okrusch & Matthes, 2014, S. 219).

Zusammenfassend sind die Protolithen zur Bildung von Serpentiniten daher magmatischen bzw. plutonischen oder vulkanischen Ursprungs, ultrabasisch, weil zu weniger als 50% aus SiO_2 bestehend, ultramafisch und daher reich an Eisen und Magnesium, zu mehr als 40 Volumsprozent an Olivin enthaltend und daher dem dunkel gefärbten Gestein Peridotit zuzurechnen, welcher Hauptbestandteil des Oberen Erdmantels ist.

2.1.3. Die Minerale der Serpentin-Gruppe

Das Gestein Serpentin wird aus Mineralien der Serpentin-Gruppe gebildet, welcher mehrere Strukturvarietäten angehören. Die drei verbreitetsten Minerale der Serpentin-Gruppe werden als Lizardit, Antigorit (Blätterserpentin) und Chrysotil (Faserserpentin) bezeichnet (vgl. Okrusch & Matthes, 2014, S. 175). In Bezug auf die Verwendung des Wortes „Serpentin“ gilt es zu beachten, dass der Begriff „Serpentin“ nicht nur ein bestimmtes Mineral definiert, sondern dass „Serpentin“ als Hyperonym (Oberbegriff) zu betrachten ist, welches verschiedenste Mineralien subsummiert, die der Serpentin-Gruppe zugeordnet werden. Während im alltäglichen Sprachgebrauch der Begriff „Serpentin“ oftmals sowohl für das Gestein als auch für die Minerale verwendet wird, muss im wissenschaftlichen Kontext eine

Differenzierung vorgenommen werden: „Serpentinit“ bezeichnet das Gestein, „Serpentin“ verweist auf die Mineral-Gruppe, deren Minerale das Gestein Serpentinit bilden⁸.

Das Gestein Serpentinit setzt sich zu 85 bis zu 95% aus MgO (Magnesiumoxid), SiO₂ (Siliziumdioxid) und H₂O (Wasser) zusammen (vgl. O’Hanley, 1996, S. V). Zur Darstellung der chemischen Zusammensetzung der Minerale der Serpentin-Gruppe, werden folgende chemische Grundformeln verwendet: Mg₆[(OH)₈/Si₄O₁₀] (Okrusch & Matthes, 2014, S. 175) bzw. Mg₃Si₂O₅(OH)₄ (Coleman & Jove, 1992, S. 4). Die Formel zeigt, dass Magnesium eine wesentliche Rolle spielt und dass das Gestein Serpentinit reich an Magnesium ist. Um die Variabilität der chemischen Zusammensetzung zu veranschaulichen, wird auch folgende Grundformel verwendet: (Mg, Fe, Ni)₆ Si₄O₁₀(OH)₈. Die Atome, welche sich in den Klammern befinden, können in beliebiger Mischung vertreten sein, stehen aber immer im selben Verhältnis zu den anderen Atomgruppen (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 9).

Die Minerale des Gesteins Serpentinit werden wie die meisten gesteinsbildenden Mineralien den Silikaten zugeordnet (vgl. Okrusch & Matthes, 2014, S. 172). Als Grundbaustein aller Silikate fungiert das Silikat-Ion, das die Struktur eines Tetraeders⁹ hat, bei welchem das kleine im Zentrum stehende Silicium-Ion (Si⁴⁺) von vier Sauerstoff-Ionen (O²⁻) umgeben wird. Daraus ergibt sich die Formel SiO₄⁴⁻. Das Anion, als welches der Silicium-Sauerstoff-Tetraeder geladen ist, muss demnach von vier positiven Ladungen ausgeglichen werden, um ein elektrisch neutrales Mineral zu bilden. Silikat-Ionen gehen folglich mit Kationen wie Natrium (Na⁺), Kalium (K⁺), Calcium (Ca²⁺), Magnesium (Mg²⁺) oder Eisen (Fe²⁺) eine Bindung ein, oder es bildet zum Ladungsausgleich Bindungen mit anderen Tetraedern, wodurch verschiedene Silikatstrukturen wie Doppeltetraeder, Ringe (Cyclosilikate), Ketten oder Doppelketten (Inosilikate), Schichten (Phyllosilikate) oder Gerüste (Tektosilikate) entstehen (vgl. Press u. a., 2011, S. 62–63). Bei Gerüstsilikaten sind die Tetraeder nach allen drei Richtungen des Raumes und somit vollständig vernetzt. Als unvollständig vernetzt gelten Schicht- bzw. Phyllosilikate mit ihrer flächenhaften Vernetzung sowie die Kettensilikate mit ihrer eindimensionalen Vernetzung. Jene Strukturen, bei welchen die Vernetzung vollständig fehlt, bezeichnet man

⁸ „Serpentine, strictly speaking, is a mineral. Rocks formed mostly of serpentine are called serpentinites.“ (Moores, 2011, S. 3)

⁹ **Tetraeder**: von vier gleichseitigen Dreiecken begrenzter Körper; dreiseitige Pyramide (Duden online, 6.11.2015)

als Inselsilikate bzw. Nesosilikate (vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 9). Als typisches Beispiel für ein Inselsilikat gilt das Mineral Olivin (vgl. Okrusch & Matthes, 2014, S. 145).

Serpentine gehören zu den Schichtsilikaten und weisen eine Zweischichtstruktur auf, die sich aus einer Tetraederschicht und einer Oktaederschicht¹⁰ zusammensetzt. Aufgrund der vorhandenen elektrostatischen Sättigung bestehen zwischen den Struktureinheiten nur schwache Bindungen nach Art der Van-der-Waals-Restkräfte¹¹. Während Lizardit eine ebene 1:1-Schichtstruktur aufweist, zeigt Antigorit eine wellenartige Struktur der blättchenförmigen Kristalle. Bei Chrysotil (Faserserpentin) findet sich eine Krümmung und Einrollung der beiden Schichten. Zurückzuführen sind diese Strukturen auf die Größe des Magnesiums, welches die Oktaederschicht der Serpentin-Minerale aufweitet, wodurch die Gitterstäbe zwischen Oktaeder- und Tetraeder-Schicht nicht mehr genau aufeinander passen und eine metrische Unstimmigkeit („misfit“) entstehen lassen (vgl. Okrusch & Matthes, 2014, S. 175).

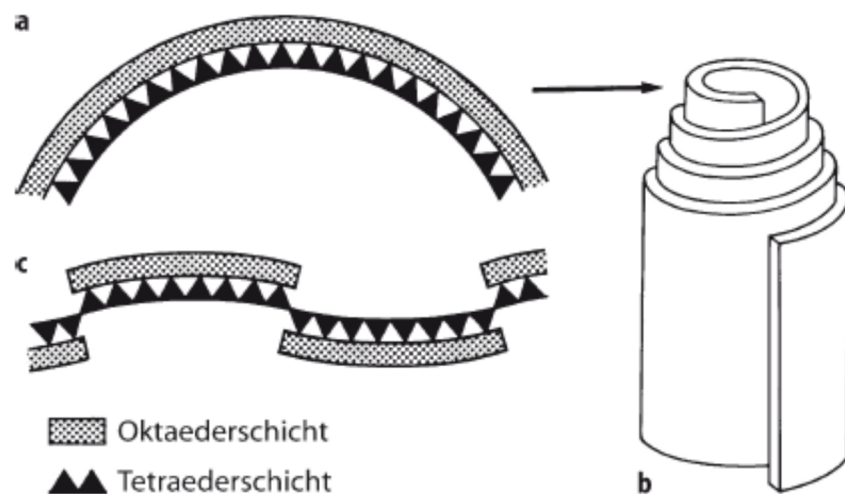


Abbildung 2: Schematische Darstellung der (a) Krümmung der Chrysotil-Struktur, der (b) Einrollung der Chrysotil-Struktur, der (c) Antigorit-Struktur (Okrusch & Matthes, 2014, S. 175)

¹⁰ **Oktaeder:** von acht [gleichseitigen] Dreiecken begrenzter Vielflächner; Achtfächner (Duden online, o. J.)

¹¹ **Van-der-Waals-Kräfte:** Nach dem niederländischen Physiker van der Waals benannte zwischenatomare oder -molekulare Bindungskräfte durch induzierte, transiente Dipolmomente. Die van der Waals-Kräfte gehören zu den schwachen intermolekularen Wechselwirkungen (Campbell, Reece & Kratochwil, 2011, S. 1848).

2.1.4. Prozesse der Serpentinisierung und dessen Subprozesse

Ultramafische und damit olivinreiche Peridotite fungieren als Protolith der Serpentinite. Ihren Ursprung haben diese ultramafischen Gesteine im Oberen Erdmantel. Das Vorkommen von Serpentiniten an der Erdoberfläche ist auf tektonische Bewegungen zurückzuführen, welche die Gesteine aus 10-15 km Tiefe zu Bestandteilen der ozeanischen Erdkruste werden ließen (vgl. Moores, 2011, S. 3). Die ozeanischen Krusten, die an ozeanischen Spreizungszonen, die sich an der Naht zwischen zwei Platten über einer Magmakammer befindet, neu gebildet und an Subduktionszonen wieder aufgelöst werden, sind die jüngsten und dynamischsten Teile der Erdkruste (vgl. Harrison & Rajakaruna, 2011b, S. 417). Aufgrund plattentektonischer Bewegungen, welche durch die Mantelkonvektionen und deren Effekt des Seafloor-Spreadings angetrieben die Bewegung der einzelnen Platten der Lithosphäre (Drift bzw. Kontinentaldrift) über die Erdoberfläche beschreibt (vgl. Press u. a., 2011, S. 24 ff), wurden große Mengen dieser Peridotite bis zur Erdkruste transportiert und an den Kontinentalrändern¹² abgelagert. Bis auf wenige Ausnahmen wurden die meisten Serpentinite an den Subduktionszonen der Kontinentalränder aus Peridotiten gebildet, die aufgrund plattentektonischer Bewegungen aus dem Oberen Mantel an die Erdkruste befördert wurden (vgl. Coleman & Jove, 1992, S. 1 ff). „Nearly all the serpentinite masses are derived mainly from serpentinitized peridotites that have been tectonically emplaced along continental margins“ (Coleman & Jove, 1992, S. 2). Abgelagert bzw. integriert werden die protolithischen Peridotite auf und in ozeanischen Platten. An ozeanischen Spreizungszonen zwischen zwei ozeanischen Platten bzw. im Einfluss von Mantelkonvektion und plattentektonischer Bewegungen werden die Peridotite Druck und Temperatur ausgesetzt. An diesen Spreizungs- und auch an Subduktionszonen¹³ setzt der Prozess der Serpentinisierung und somit die Bildung von Serpentiniten ein (vgl. Abbildung 3).

¹² **Kontinentalrand** (continental margin): Teil des Meeresbodens, der sich von der Küstenlinie bis zum landseitigen Rand der Tiefsee-Ebene erstreckt. Er umfasst somit den Kontinentalschelf, den Kontinentalhang und den Kontinentalfuß (vgl. Press, Siever, Grotzinger & Jordan, 2011, S. 679).

¹³ **Subduktionszonen**: Als Subduktion wird der Vorgang bezeichnet, wenn zwei ozeanische Platten miteinander kollidieren und folglich eine Platte unter die andere abtaucht. Die ozeanische Lithosphäre der subduzierten Platte wird dabei in die Asthenosphäre hinabgezogen und durch die Konvektionsströme des Erdmantels aufgeschmolzen (vgl. Press u. a., 2011, S. 34).

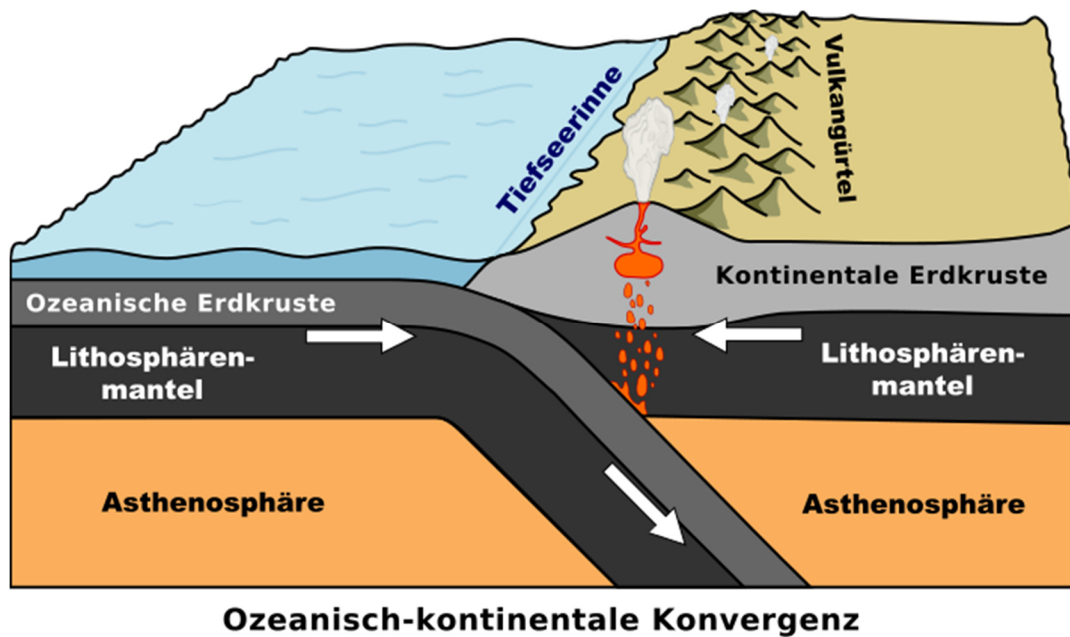


Abbildung 3: Schema einer Subduktionszone an einem aktiven Kontinentalrand, dem Bildungsort der Serpentine (MagentaGreen, 2014)

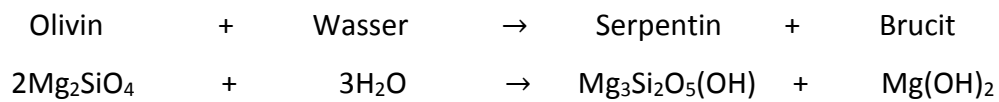
Während der Großteil der ozeanischen Krusten entlang von aktiven Kontinentalrändern wieder in den Bereich des Oberen Erdmantels rückgeführt und aufgeschmolzen wird, werden auch Anteile ozeanischer Krusten zum Beispiel im Zuge gebirgsbildender Prozesse auf kontinentale Krusten geschoben bzw. obduziert (Prozess der Obduktion). Bezeichnet werden diese auf kontinentalen Platten auftretenden Gesteinsassoziationen, welche einer ozeanischen Lithosphäre entstammen und basische bis hin zu ultrabasischen bzw. ultramafischen Gesteinen – also Gesteine reich an Magnesium und Eisen – enthalten, als Ophiolithe bzw. Ophiolith-Komplexe (vgl. Press u. a., 2011, S. 685). „Most exposures of serpentinite at the Earth’s continental surface come from ophiolites“ (Moores, 2011, S. 3). Tektonische Bewegungen und daraus resultierender Druck und Temperaturerhöhung lassen die Peridotitanteile der Ophiolithe unter Wasserzufuhr serpentinisieren (vgl. Coleman & Jove, 1992, S. 10).

Eine Serie geologischer Ereignisse begründet demnach, dass Serpentine, welche ursprünglich Teil ozeanischer Krusten waren und aus dem Erdmantel stammen, nahe aktiver Kontinentalränder, wie zum Beispiel jenen in der zirkumpazifischen oder in der mediterranen Region, zum Bestandteil kontinentaler Krusten wurden (vgl. Oze u. a., 2008, S. 3391–3392).

Untersuchungen an verschiedenen Serpentiniten zeigten, dass in Bezug auf das Alter der Gesteine Funde von rezenten Zeiten bis zum Proterozoikum stammen (vgl. Coleman & Jove, 1992, S. 14). Das Proterozoikum ist gemäß der geologischen Zeitskala der International Commission on Stratigraphy das jüngste Äon des Präkambriums und beschreibt die Zeit von 2500 bis 541 Millionen Jahren. Das Zeitalter des Präkambriums, in dem sich die Erdkruste, Ozeane, Kontinente sowie Lithos-, Hydros- und Atmosphäre bildeten und die Evolution des Lebens stattfand (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 119–121), startete mit der Entstehung der Erde vor 4,61 Mrd. Jahren und endete mit dem Proterozoikum, welches ins Zeitalter des Kambriums überleitet (vgl. International Commission on Stratigraphy, o. J.). Der Prozess der Serpentinisierung an ultramafischen Gesteinen begleitet demnach seit bis zu 2500 Millionen Jahren bzw. 2,5 Milliarden Jahren die Erdgeschichte.

Voraussetzend für die Bildung von Serpentiniten sind Umgebungen, in welchen Wasser und Peridotite bei bestimmten Temperaturen (meist unter 500 Grad Celsius) miteinander in Kontakt kommen. Wie bereits beschrieben bilden sich Serpentine an aktiven Kontinentalrändern, an welchen Gesteine des Erdmantels in die Erdkruste integriert werden, bzw. infolge der Reaktion zwischen Peridotiten und heißem Grundwasser (vgl. Moores, 2011, S. 8). Typische Bedingungen zur Formierung ultramafischer Gesteine stellen niedriger Druck, Temperaturen zwischen 100 und 300 Grad Celsius und ein pH-Wert >10 dar (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 496). Die Bezeichnung Serpentinisierung wird zur Beschreibung von Prozessen verwendet, in welchen Serpentine aus Mineralen, welche wenig oder kein Wasser enthalten, unter Wasserzufuhr gebildet werden. Olivin oder andere magnesiumreiche Silikate und Carbonate sind hierfür typische Beispiele. Produkt dieses Prozesses sind teilweise oder vollständig serpentinisierte Gesteine, die unter anderem aus den Mineralen Lizardit, Chrysotil oder Antigorit bestehen. Die Reaktionen sind stets exotherm (wärmeerzeugend) und verbrauchen Wasser (vgl. O'Hanley, 1996, S. 30). Im Prozess der Serpentinisierung werden primär die Olivin-Mineralen unter Wasseraufnahme verdrängt: Das ultramafische Gestein wird hydratisiert (vgl. Okrusch & Matthes, 2014, S. 176). Bei der Hydratation kommt es zur Anlagerung von Wassermolekülen, indem sich bestimmte Kationen von Mineralen mit Wassermolekülen umgeben, wodurch eine Hydrathülle und neue Mineralformen entstehen (vgl. Press u. a., 2011, S. 430). Charakteristisch ist folglich der hohe Wassergehalt der Serpentinminerale, welcher 13 bis 16 % beträgt (vgl. Coleman & Jove, 1992, S. 9–10). Der

Prozess der Serpentinisierung beinhaltet eine Reihe unterschiedlicher Reaktionen. Die Reaktion kann in folgender schematischer Form wiedergegeben werden (vgl. Press u. a., 2011, S. 154):



Bei der niedriggradigen Metamorphose von ultrabasischen Gesteinen bildet sich zunächst Lizardit, zum Teil auch bereits Antigorit. Bei Temperaturerhöhung wird Lizardit in Antigorit umgewandelt (vgl. Okrusch & Matthes, 2014, S. 176). Beginnend mit den Mineralien der Olivin-Gruppe erfahren anschließend auch Orthopyroxen und Klinopyroxen den Prozess der Serpentinisierung. Durch die Zufuhr von Wasser bei bestimmten Druckverhältnissen und einer Temperatur von 500 bis 600 Grad Celsius wird der Prozess der Serpentinisierung in Gang gesetzt. Endprodukt ist das metamorphe Gestein Serpentin. Olivin und Orthopyroxene enthalten Eisen, welches in Serpentin-Mineralen nicht eingebaut wird. Folglich bildet sich zusätzlich zum Serpentin auch eisenreicher Magnetit, der sich fein zerstäubt durch das ganze Gestein zieht und die dunkle Färbung hervorruft. Die Metamorphose beginnt mit der Durchdringung des Peridotits mit neugebildetem Serpentin. Von diesen ausgehend bilden sich Stränge, Büschel oder feine Fasern von Serpentin in den Rest des Gesteins. Dies erklärt die oftmals deutlich-sichtbare Maschenstruktur (vgl. Maresch u. a., 1987, S. 67–68).

Anschließend an den erfolgten Prozess der Serpentinisierung kann es zu weiteren Subprozessen kommen. Im Zuge der Serpentin-Rekristallisierung (serpentine recrystallization) entstehen veränderte Texturen, welche von der herkömmlichen Textur abweichen. Außerdem werden Serpentin-Mineralen durch andere Serpentin-Mineralen ersetzt (serpentine replacement), wie zum Beispiel der Austausch des Minerals Lizardit durch Chrysotil oder Antigorit. Die Bezeichnung Deserpentinisierung (deserpentinization) bezieht sich auf Prozesse, bei welchen Serpentinminerale dehydriert werden, um weniger wässrige Mineralien wie Olivin zu formen. Dabei handelt es sich nicht nur um eine Umkehrung des Serpentinisierungsprozesses, sondern vielmehr um den Austausch eines Minerals der Serpentin-Gruppe durch Olivin. Reaktionen der Deserpentinisierung wie zum Beispiel

Antigorit + Brucit = Olivin + Wasser verlaufen endotherm und produzieren Wasser (vgl. O'Hanley, 1996, S. 30–32).

Häufiger Begleiter von Serpentiniten sind Magnesite, welche deren Zersetzungsprodukte darstellen. In Folge des Abbaus bzw. der Verwitterung von Serpentiniten, der durch die Einwirkung CO₂-reicher Lösungen hervorgerufen wird, entsteht häufig Magnesitgestein. Im Zuge der Zersetzung bilden sich zunächst magnesiumangereicherte Lösungen, die sich folglich als Magnesit (Mg[CO₃]) in Klüften und Rissen des Gesteins wieder gelartig ausscheiden können. Dieses Zersetzungsprodukt wird auch entsprechend seines Aussehens als dichter Magnesit oder Gelmagnesit bezeichnet (vgl. Maresch u. a., 1987, S. 266)

2.2. Pedologische Aspekte

Als Boden wird der belebte Teil der obersten Erdkruste bezeichnet. 6370 km umfasst die Strecke von der Erdoberfläche bis zum Erdmittelpunkt. Während die Erdkruste eine Dicke von 5 bis 40 km aufweist, besitzen Böden lediglich eine Mächtigkeit von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Zehner-Metern. In Relation zu diesen Größenverhältnissen wird deutlich, dass Böden die dünne und verletzbare Haut der Erde bilden, der sich die Bodenwissenschaft bzw. Pedologie widmet, um unter anderem deren Eigenschaften und Funktionen sowie deren Entwicklung und Verbreitung zu analysieren. Ein bestimmter terrestrischer (Festland) und semiterrestrischer Bodentyp wird stets nach unten durch festes oder lockeres Gestein, nach oben in der Regel durch eine Vegetationsdecke und den Übergang zur Atmosphäre begrenzt und zur Seite gleiten sie in benachbarte Böden über. Böden sind Naturkörper unterschiedlichen Alters, die durch bodenbildende Prozesse entstanden sind (vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 1). Die wichtigsten Bodenbildungsprozesse, welche die belebte Pedosphäre ausbildet, sind Verwitterung, Verlagerung, Humusbildung¹⁴, Mineralneubildung und Gefügebildung (vgl. Bresinsky, Körner, Kadereit, Neuhaus & Sonnewald, 2008, S. 751–752).

Weltweit gibt es mehr als 7500 Bodentypen. Jeder von ihnen ist das Produkt aus mineralischen und biologischen Rohstoffen (vgl. Pott & Hüppe, 2007, S. 91). Die Bodentypisierung orientiert sich primär am Profilaufbau, also an der Ausbildung von Horizonten. Unterschieden wird im Zuge der Kategorisierung der Horizonte grundsätzlich zwischen Auflagehorizonten und Mineralbodenhorizonten. Die wichtigsten Bodenhorizonte werden nachfolgend kurz beschrieben (Bresinsky u. a., 2008, S. 754):

Wichtige Auflagehorizonte:

- L Streu, weitgehend unzersetzte Vegetationsrückstände
- F Fermentations- oder Vermoderungshorizont, Gewebestrukturen erkennbar
- H Humusstoffhorizont, organische Rückstände ohne Gewebestrukturen

¹⁴ **Humus:** Die organische Komponente des Bodens, die unter der Wirkung der Organismenwelt im Boden (Edaphon) durch Ab- und Umbau von organischen Abfällen und die Vermischung mit mineralischen Bestandteilen entsteht (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 752)

Wichtige Mineralbodenhorizonte:

- A Oberbodenhorizont (stark humushaltig)
- E Auswaschungshorizont (Eluvialhorizont)
- B Mineralerde-Verwitterungs-Horizont (gekennzeichnet durch Mineralneubildung und Anreicherungen)
- G von Grundwasser beeinflusster Horizont
- S von Stauwasser beeinflusster Horizont
- C Ausgangsmaterial im Untergrund, aus dem der Boden entstanden ist

Ausgangsmaterial zur Bildung von Böden sind verwittertes Gestein, Organismen bzw. organische Substanzen und Staub aus der Atmosphäre (vgl. Press u. a., 2011, S. 435). Der Prozess der Bodenbildung wird von mehreren Variablen beeinflusst, welche als genetische Faktoren bezeichnet werden: Ausgangsgestein (G), Klima (K), Organismen (O), Relief (R), Zeit (Z) und die Bodennutzung des Menschen (M) haben in Form eines komplexen Zusammenspiels maßgeblichen Einfluss auf die bodenbildenden Prozesse. Definiert werden Böden auch als die Funktion ihrer genetischen Faktoren, welche die bodenbildenden Prozesse steuern: $B = f(G, K, O, R, M) \times Z$ (vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 1).

Faktoren der Bodenentwicklung (vgl. Press u. a., 2011, S. 435)

- Mineralbestand des Ausgangsgesteins: Die Löslichkeit der Minerale, die Korngröße, Lagerungsdichte und Porosität, die Klüfte und Schieferungsflächen
- Klima: Die Temperatur und deren jahreszeitliche Schwankungen sowie die Niederschlagsmenge und die Niederschlagsverteilung
- Relief: Die Höhenlage und Geländeform, die Neigung und Ausrichtung des Hangs zur Himmelsrichtung
- Organismen: Diversität und Organismenzahl der Fauna und Flora
- Zeit: die Zeitdauer, die für die Bodenbildung zur Verfügung steht; je älter ein Boden ist, desto besser ist er entwickelt und desto stärker ist er in einzelne Horizonte differenziert

Durch die physikalische, chemische und biologische Verwitterung des Gesteins beginnen Böden zu entstehen. Gefrierendes Wasser sprengt das Gestein, im Wasser gelöste Säuren

zerlegen Gesteine. Beschleunigt wird der Verwitterungsprozess durch Organismen wie Bakterien, Pilze, Flechten, Moose und die Wurzeln von Gefäßpflanzen, die in das Gestein eindringen und dort Säuren ausscheiden oder mit ihren in Fugen wachsende Wurzeln das Gestein sprengen. Letztendlich entsteht auf diese Weise der Oberboden (Mutterboden), bestehend aus einer Mischung aus verschiedenen Gesteinspartikeln, lebenden Organismen und Humus (vgl. Campbell u. a., 2008, S. 923).

2.2.1. Die Rolle des Bodens für die Vegetation

Die Ergebnisse beständig laufender tektonischer Prozesse wie Gebirgsbildung, Vulkanismus, Faltung, Subduktion, etc. verleihen der Oberfläche der Erde ihre Form. Als Ergebnis der tektonischen Krustenbewegungen der Erde werden jene Gesteine und deren Mineralien ausgebildet, welche auf Basis von Verwitterungsprozessen als Grundlage zur Ausbildung von verschiedenen Bodentypen dienen. Sobald Gesteine an die Erdoberfläche gelangen und somit zum Bestandteil der Biosphäre¹⁵ werden, avancieren diese als Substratbildner zu einem bedeutenden Parameter für pflanzliches Leben (vgl. Kruckeberg, 2002, S. 4–5).

Böden dienen einerseits der Verankerung der Pflanze an ihrem Standort, andererseits fungieren sie als Lieferant und Speicher von Wasser und Nährstoffen (vgl. Brunold, Rügsegger & Brändle, 1996, S. 47). Als Primärproduzenten bzw. fotoautotrophe Organismen bauen Pflanzen aus anorganischen Verbindungen und Lichtenergie organische Substanzen auf. Im Prozess der Fotosynthese wird Sonnenlicht von den grünen Pflanzen zu chemischer Energie umgewandelt und aus anorganischen Verbindungen organische Verbindungen aufgebaut (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 224). Um den Stoffwechsel (Metabolismus) aufrechtzuerhalten bzw. um Biomasse aufzubauen, haben Pflanzen mineralische Nährstoffbedürfnisse. Während Kohlenstoff (als CO₂) und Sauerstoff (als O₂) über die Atmosphäre zur Verfügung gestellt werden (vgl. Schopfer & Brennicke, 2010, S. 297), decken die Böden, also die oberste, belebte Verwitterungsschicht der Erdkruste, beinahe den gesamten Wasser- und Mineralstoffbedarf der Pflanzen. Jene chemischen Elemente, die für Pflanzen notwendig sind, um ihren

¹⁵ **Biosphäre:** Der von Organismen besiedelte Bereich der Erde. Die Summe aller Ökosysteme (Campbell u. a., 2011, S. 1790)

Lebenszyklus (Entwicklungszyklus) erfolgreich zu durchlaufen und um eine neue Generation zu bilden, werden als essenzielle Nährelemente bzw. essenzielle Nährstoffe bezeichnet (vgl. Campbell, Reece & Kratochwil, 2011, S. 1061 u. 1067). Wird die Pflanze mit allen essenziellen Elementen versorgt, entwickelt sich diese normal, während bei Fehlen oder Unterversorgung Mangelerscheinungen auftreten. Unterteilt werden die essenziellen Nährstoffe in Makronährstoffe, welche in größeren Mengen notwendig sind ($> 20 \text{ mg l}^{-1}$) und Mikronährstoffe oder Spurenelemente, welche in geringen Mengen ($< 500 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$) unentbehrlich sind. Im Übergang zwischen Makro- und Mikronährelementen positioniert sich die erforderliche Menge (ca. 6 mg l^{-1}) des Elements Eisen (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 243–244). Im Folgenden werden die essenziellen Pflanzennährelemente und ihre Funktionen tabellarisch dargestellt (Weiler & Nover, 2008, S. 5):

Makronährstoffe		
Element	Aufnahmeform	Wichtige Funktionen bzw. Vorkommen in der Pflanze
Wasserstoff (H)	H_2O	Wasser („biologisches“ Lösungsmittel), alle organischen Verbindungen
Kohlenstoff (C)	CO_2	Alle organischen Verbindungen
Sauerstoff (O)	H_2O , CO_2 , O_2	Sehr viele organische Verbindungen, erhöht deren Polarität; z.B. Zucker, organische Säuren, Aminosäuren und davon abgeleitete Substanzen wie z.B. Polysaccharide, Proteine, Nucleinsäuren
Stickstoff (N)	NO_3^-	Aminosäuren, Purin- und Pyrimidinbasen sowie davon abgeleitete Verbindungen (Proteine, Nucleinsäuren, viele Coenzyme), Alkaloide
Kalium (K)	K^+	Hauptosmotikum, Gegen-Ionen insbesondere Cl^- , organische Säuren
Calcium (Ca)	Ca^{2+}	Vernetzung der Pectinsäuren der Zellwände und Mittellamellen, Regulator vieler Zellprozesse
Magnesium (Mg)	Mg^{2+}	Zentralatom im Chlorophyll, reguliert die Aktivität vieler Enzyme, Cofaktor ATP-umsetzender Enzyme (z.B. Kinasen)
Phosphor (P)	H_2PO_4^-	Bestandteil von Nucleotiden und davon abgeleiteten Verbindungen wie z.B. Nucleinsäuren, NAD(P); Phosphorsäureanhydride dienen der Aktivierung von Carboxylgruppen und der Energiespeicherung (insbesondere ATP, GTP)
Schwefel (S)	SO_4^{2-}	Aminosäuren und Proteine, Eisen-Schwefel-Zentren von Redoxproteinen, einige Coenzyme (Liponsäure, Coenzym A, Thiaminpyrophosphat), Glutathion

Mikronährstoffe		
Element	Aufnahmeform	Wichtige Funktionen bzw. Vorkommen in der Pflanze
Eisen (Fe)	Fe^{2+}	Eisen-Schwefel-Zentren von Redoxproteinen, Zentralatom im Häm, Cofaktor der Chlorophyllbiosynthese
Chlor (Cl)	Cl^-	Regulator der Fotosynthese, benötigt für die Schließzellenfunktion
Bor (B)	BO_3^{3-}	Essenziell für Meristemfunktionen
Mangan (Mn)	Mn^{2+}	Katalysator der Wasserspaltung und Elektronenspeicher im Photosystem II
Zink (Zn)	Zn^{2+}	Cofaktor von Metalloenzymen (z.B. Alkoholdehydrogenase)
Kupfer (Cu)	Cu^+ , Cu^{2+}	Cofaktor von Metalloenzymen, Elektronenüberträger der Fotosynthese (Plastocyanin) und der Atmungskette (Endoxidase)
Molybdän (Mo)	MoO_4^{2-}	Bestandteil von Molybdopterin, dem Cofaktor einiger Metalloenzyme (Aldehydoxidasen, Nitrat-Reduktase), Cofaktor der Nitrogenase

Mit Ausnahme von Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff werden alle anderen essenziellen Elemente in Form von Ionen von der Pflanze absorbiert. Pflanzen nehmen die anorganischen Nährstoffe in gelöster Form in der Regel über die Wurzel auf. Der Bedarf an essenziellen Nährstoffen und die Toleranz von Höchstmengen variiert jedoch von Pflanzenart zu Pflanzenart. Der Nährstoffbedarf wirkt somit als wichtiger Faktor für die individuelle differenzierte Standort-Einnischung der verschiedenen Pflanzenarten (vgl. Pott & Hüppe, 2007, S. 203). Folglich hat die Bodenchemie, welche mit der Chemie des Ausgangsgesteins assoziiert ist, bzw. die mineralische Zusammensetzung des bodenbildenden Muttergesteins wesentliche Bedeutung für die Pflanzen, deren Wachstum und für die Artenkonstellation am jeweiligen Standort. „Unterschiede im Nährstoffangebot verschiedener Bodentypen sind für das Verständnis der unterschiedlichen Zusammensetzung der Vegetation grundlegend.“ (Pott & Hüppe, 2007, S. 198). Gemeinsam mit dem Klima fungieren die edaphischen Bedingungen als wichtigste ökologische Parameter in Bezug auf das Verbreitungsgebiet bestimmter Pflanzentaxa (vgl. Rajakaruna, 2004, S. 584). Der Mineralbestand eines Gesteins und dessen chemische Zusammensetzung haben Einfluss auf die geochemischen Verhältnisse in und aufgrund von Prozessen der Verwitterung und Bodenbildung auch rund um das jeweilige Gestein. Ebenso ist deren mineralische bzw. chemische Konstitution im Zuge von Gesteinsmetamorphosen ausschlaggebend, da auf diesen die chemischen Reaktionen, welche im Laufe von Metamorphosen stattfinden, beruhen.

Da Pflanzen im Boden verwurzelt und folglich immobil sind, können diese den edaphischen Bedingungen nicht ausweichen (vgl. Punz, 2014, S. 239). „Plants, more than most animals, are captives of their inanimate environments.“ (Kruckeberg, 2002, S. 3). Pflanzen sind von den zahlreichen Standortfaktoren¹⁶ abhängig, welche den jeweiligen Standort¹⁷ charakterisieren. Die einzelnen Standortfaktoren wirken nicht für sich allein, sondern bilden einen Komplex ineinander greifender Faktoren. Alle Pflanzen sind entsprechend ihrer unterschiedlichen physiologischen und morphologischen Gegebenheiten an das Leben in einer ganz bestimmten ökologischen Nische¹⁸ angepasst, die u.a. eine spezifische Kombination von Klima- und Bodenfaktoren kennzeichnet. Jede Art besitzt in Anpassung an die Klimafaktoren Licht, Wärme und Kontinentalität sowie an die Bodenfaktoren wie Feuchtigkeit, Bodenreaktion und Stickstoffversorgung ein Minimum, ein Optimum und ein Maximum. Stimmen Arten in ihren soziologischen und ökologischen Bedürfnissen annähernd überein, können diese einer gemeinsamen ökologischen Gruppe zugeordnet werden (vgl. Pott & Hüppe, 2007, S. 196).

Unter dem Einfluss geologischer Bedingungen und deren edaphischen Folgeerscheinungen etablieren sich im Zuge evolutiver Prozesse auch Form und Struktur von Pflanzen. Die evolutive Ausprägung morphologischer und physiologischer Unterschiede zwischen Pflanzenarten ist häufig auf biotische und abiotische Bedingungen, welche ein Standort kennzeichnet, zurückzuführen und als Konsequenz bestimmter geologischer Faktoren zu erklären (vgl. Kruckeberg, 2002, S. 6). Ist zum Beispiel ein Mineralstoff im Übermaß vorhanden, führt dies zu Ernährungsstörungen und toxischen Bedingungen für die auf solchen Substraten wurzelnden Pflanzen. Diese Bedingungen werden gleichsam auch als selektionierender Stressor wirksam, der zur Etablierung von Pflanzensippen¹⁹ führt, welche den edaphischen Stressparameter besser ertragen können (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 389).

¹⁶ **Standortfaktoren:** Über gewisse Zeiträume fixe Gegebenheiten im Gelände wie Klima, Relief, Boden sowie biotische Einflüsse durch die Anwesenheit anderer Organismen. Den Standortfaktoren gegenüber stehen die wirksamen und kurzfristig stark variablen **Umweltfaktoren** wie Strahlungsangebot, Wärme, Feuchtigkeit, chemische Faktoren, mechanische und biologische Störgrößen (Bresinsky u. a., 2008, S. 749).

¹⁷ **Standort:** Eine Fläche, die durch einheitliche Standortfaktoren charakterisiert ist (Bresinsky u. a., 2008, S. 749)

¹⁸ **Ökologische Nische:** Die Summe aller von einer Art genutzten biotischen und abiotischen Ressourcen in ihrer Umwelt (Campbell u. a., 2011, S. 1823).

¹⁹ **Pflanzensippe:** Unter „ Sippe“ versteht man eine Verwandtschaftsgruppe unabhängig von ihrer Rangstufe und Größe, also eine natürlich, in der Natur existierende Einheit. Beispiele für Sippen: Samenpflanzen (Spermatophyta), Nadelhölzer (Coniferopsida), Korbblütler (Asteraceae), Veilchen (Viola), Wald-Erdbeere (Fragaria vesca), Österreichische Schwarz-Föhre (Pinus nigra subsp. nigra). Zur wissenschaftlichen Erfassung werden die Sippen klassifiziert (bekommen eine Rangstufe, einen Platz im Sippensystem und einen Namen) und heißen dann Taxa (Singular: Taxon) (vgl. Fischer u. a., 2008, S. 35).

Evolutive Anpassungen an spezifische edaphische Bedingungen können rasch erfolgen, im Fall von Schwermetallen können sich die Mechanismen zum Beispiel innerhalb weniger Generationen etablieren (vgl. Rajakaruna, 2004, S. 584).

2.2.2. Schwermetallböden und ihr Einfluss auf die Vegetation

Als Schwermetalle²⁰ werden Metalle bezeichnet, deren Dichte 5 g cm^{-3} übersteigt. Zu den Schwermetallen zählen sowohl essenzielle Nährstoffe wie Zink, Kupfer, Eisen, Molybdän, Mangan oder Nickel, aber ebenso von Pflanzen nicht benötigte, toxische Elemente wie Cadmium, Quecksilber, Blei oder Zinn. Charakteristisch ist ihr häufiges Vorkommen als metallische Komponente von Elektronen übertragenden Enzymen, zum Beispiel Fe im Häm. Schwermetalle sind natürliche Bestandteile von Mineralen. Schwermetallgehalte von Gesteinen liegen normalerweise im mg kg^{-1} Bereich. Ultrabasische Erguss- und Serpentinegesteine weisen erheblich höhere Gehalte an Schwermetallen auf, wodurch die Böden auf Serpentinesteinen auch als Schwermetallböden zu klassifizieren sind. Oberhalb eines bestimmten Konzentrationsbereichs können prinzipiell alle Schwermetalle (auch die Spurenelemente unter den Schwermetallen) auf Pflanzen toxisch wirken. Die Konzentrationsbereiche für Mangel, optimale Versorgung und Toxizität liegen bei den Schwermetallen eng beisammen (vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 459; vgl. Schulze, Beck & Müller-Hohenstein, 2002, S. 201–202; vgl. Weiler & Nover, 2008, S. 789 ff).

Weist ein Element im Vergleich zu seiner Umgebung ungewöhnliche, meist erhöhte Konzentrationen auf, wird dies in der Geochemie als Anomalie bezeichnet. Neben anthropogenen Ursachen von gesteigerten Schwermetallkonzentrationen wie Folgen des Bergbaus, Industrieabfälle, Industrierwässer, Industriestaub, Emissionen aus Industrie- und Verbrennungsanlagen und Kraftfahrzeugen oder Schwermetallspuren in Kunstdünger und Pestiziden können die Gründe für diese Erscheinungen auch geogener Natur sein und sich im Aufbau bzw. Chemismus der Erdkruste begründen. Natürlicherweise treten hohe Schwermetallkonzentrationen im Verwitterungsmaterial von erzhaltigem Gestein auf, das sich

²⁰ **Schwermetalle:** Ag, As, Au, Bi, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, No, Pb, Pt, Sb, Sn, Ti, Tl, U, V, Zn, Zr (Schulze, Beck & Müller-Hohenstein, 2002, S. 201)

nahe der Bodenoberfläche befindet (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 393; Punz, Aigner, Sieghardt, Justin & Zechmeister, 2010, S. 83; vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 459–460). Als Erz wird natürlich vorkommendes Material bezeichnet, aus dem ein Metall mit vertretbarem Aufwand gewonnen werden kann. Sie enthalten in der Regel unterschiedliche Mengen von „Gangart“, sprich für die Metallgewinnung unerwünschte Mineralien und Gesteine wie Quarz, Ton oder Granit (vgl. Mortimer & Müller, 2007, S. 473). Erze können bis zu 100 % aus Schwermetallen bestehen. In Folge der Verwitterung von erzhaltigem Gestein gelangen Schwermetalle auf natürliche Weise in die Böden. Als weitere Schwermetallquellen fungieren kontinentale Staubimmissionen sowie Ausgasungen aus Meerwasser und Vulkanen (vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 459).

Schwermetalle sind natürliche Bestandteile von Böden. Eine Übersicht mit Schwermetallstandorten in Österreich ist im Anhang D: Karten Schwermetallstandorte in Österreich zu finden. Ausgangsgestein (lithogener Anteil), Vererzungen (chalkogener bzw. erzbildender Anteil) und die durch pedogenetische Prozesse beeinflusste Umverteilung von Stoffen im Boden bilden den geogenen Grundgehalt an Schwermetallen im Boden. Geogene Grundgehalte unterscheiden sich in der Regel nur wenig von jenen der Ausgangsgesteine. Die meisten Schwermetalle liegen als hydratisierte Ionen (z.B. Cu^{2+} , Cd^{2+}), anorganische Ionenpaare (NiSO_4^0 , CdSO_4^0) oder als anorganische bzw. gelöste organische Substanzen im Boden vor (Scheffer u. a., 2010, S. 462 ff). Nachdem Böden zentrale Filter-, Puffer- und Speicherfunktionen innehaben und diese der Zu- und Abfuhr von Stoffen, die sowohl natürlicher als auch anthropogener Herkunft sind, unterliegen, kann es zur Akkumulation von potentiell toxischen Stoffen wie Schwermetallen und Schadstoffen in Böden kommen (vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 5).

Schwermetalle kommen in sehr unterschiedlichen Formen in der Umwelt vor. Ein Effekt auf Pflanzen kann jedoch nur dann erwartet werden, wenn die Schwermetalle in einer pflanzenverfügbaren Form vorliegen (vgl. Brunold u. a., 1996, S. 193). Inwieweit Pflanzen Schwermetalle aufnehmen, hängt unter anderem von der Löslichkeit der Schwermetalle im Boden ab (vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 467). Von den 53 natürlich vorkommenden Schwermetallen sind 17 pflanzenverfügbar. Schwermetalle in Böden wirken auf die meisten Pflanzensippen vitalitätsmindernd bis existenzgefährdend. Die Phytotoxizität der

Schwermetalle beruht vor allem auf ihrer Bindungsfähigkeit an Sulfhydrylgruppen (S-H-Gruppen, Thiolgruppen) von Proteinen, wodurch deren Aktivität gehemmt oder diese umstrukturiert werden. Weiters stimulieren größere Mengen von Schwermetallen die Bildung freier Radikale²¹ und von reaktivem Sauerstoff (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 393 ff). Schwermetalle in Böden können bei Erreichen bzw. Überschreiten von bestimmten Toxizitätswerten Pflanzen in ihrem Entwicklungszyklus beeinträchtigen und führen zum Beispiel zu Kümmerwuchs, Chlorose²², unterbinden die Nährstoffaufnahme (kann zum Beispiel zu Eisenmangel führen), erschweren oder verhindern die Durchwurzelung des Bodens und reduzieren das Wachstum. Je nach pH-Wert der Bodenlösung beeinflusst dieser die Wirkung der Schwermetalle und ist in der Lage, die Wirkung von Schwermetallen auf Pflanzen sowohl auszugleichen als auch zu verstärken (vgl. Kay, Ward, Watt & Schemske, 2011, S. 74). Mit abnehmendem pH-Wert nimmt die Löslichkeit der Metalle in der Regel zu (vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 464), wodurch deren Verfügbarkeit für Pflanzen steigt. Abhängig vom Taxon werden Schwermetalle unterschiedlich stark aus dem Boden aufgenommen. Weiters reichern sich Schwermetallen in Abhängigkeit vom Speicherorgan der Pflanze in unterschiedlichen Konzentrationen an: Während Wurzeln und Blätter häufig hohe Metallgehalte aufweisen, weisen Stängel, Früchte und Körner in der Regel geringere Konzentrationen auf (vgl. Scheffer u. a., 2010, S. 467–468).

Pflanzen, die ein hohes Angebot bestimmter Schwermetalle ertragen können bzw. eine Schwermetallresistenz²³ entwickelt haben, werden als Chalkophyten, Erzpflanzen (1882 nach Andrae), Schwermetallpflanzen (1926 nach Wein) oder Metallophyten (1979 nach Duvigneaud & Denayer-DeSmet) bezeichnet (vgl. Punz, 2001, S. 87). Die Schäden und Mechanismen, die ertragen werden können, sind in hohem Maße element- wie auch pflanzenspezifisch. „Eine generelle Eigenschaft „Resistenz gegen Schwermetalle“ gibt es nicht bzw. ist phänotypisch allenfalls schwach ausgeprägt.“ (Frey & Lösch, 2014, S. 394). Vielmehr haben sich bestimmte Pflanzen als Metallzeigerpflanzen auf einzelne Schwermetalle spezialisiert: “[...] metal uptake might be independent of the amount of metal available in the soil, but depends instead on the metabolism of each species, which promotes a selective

²¹ **Radikal:** Durch den Verlust einzelner Elektronen entstehen häufig instabile Atome oder Moleküle mit einzelnen ungepaarten Elektronen; solche Atome oder Moleküle nennt man Radikale (Weiler & Nover, 2008, S. 7).

²² **Chlorose:** Chlorophyllmangelerscheinungen (Bresinsky u. a., 2008, S. 246), die zum Vergilben der Blätter führen (Campbell u. a., 2011, S. 1068).

²³ **Resistenz:** Die Widerstandsfähigkeit gegenüber ungünstigen Faktoren (Wagenitz, 2003, S. 274)

absorption of the metals.” (Lombini, Dinelli, Ferrari & Simoni, 1998, S. 31–32). Beispielsweise verträgt *Silene vulgaris* (Blasen-Leimkraut, vgl. 3.3.17) Chrom und Nickel, *Festuca ovina* (Schaf-Schwingel) und *Agrostis tenuis*-Populationen (Rot-Straußgras) sind Bleizeiger, *Viola calaminaria* (Gelbes Galmei-Veilchen) und *Minuartia verna* (Galmei-Frühlings-Miere) wachsen auf zinkhaltigem Untergrund, der Farn *Pteris vittata* reichert Arsen an. Entscheidend für die Pflanzen ist nicht der Gesamtgehalt im Boden sondern vielmehr die Verfügbarkeit der Ionen. „As metal uptake in plants depends on the availability of soluble metal species in soils of the rhizosphere²⁴ rather than on bulk content, metal concentrations in plants was related to metal availabilities in the specific rhizosphere of each species.“ (Lombini u. a., 1998, S. 20). Somit bestimmen die Löslichkeit der Schwermetalle in Ionenform, der Boden-pH-Wert, das Redoxpotential des Bodens und die Aktivität der Pflanzenwurzeln die für Pflanzen zugängliche Konzentration an Schwermetallen (vgl. Schulze u. a., 2002, S. 203).

Metallophyten, bei welchen die Schadensschwelle der Konzentration höher liegt, weisen in der Regel ein ganzes Arsenal von Strategien auf, um der Toxizität eines Überangebots von Schwermetallionen zu begegnen. Schwermetallresistenz ist nicht nur auf einen bestimmten Mechanismus zurückzuführen. Der Übergang von metallempfindlichen zu -resistenten Pflanzen gilt als fließend (vgl. Schulze u. a., 2002, S. 219). Als Mechanismen im Umgang mit den Schwermetallen wurden zum Beispiel die aktive Sekretion bzw. Absonderung der eingedrungenen Metall-Ionen, die Bindung in Form von Chelatkomplexen²⁵, die Umwandlung der Metallionen in inaktive Formen z.B. durch eine durch abgesonderte Chelatoren bedingte Chelatisierung im Bereich der Rhizosphäre, die Speicherung in verschiedenen Pflanzenteilen wie Vakuolen, Zellwänden oder Milchröhren oder die Umgehung der Toxizität durch besondere Stoffwechselreaktionen untersucht (vgl. Saier & Trevors, 2010, S. 62; vgl. Weiler & Nover, 2008, S. 236).

²⁴ **Rhizosphäre:** Die Rhizosphäre umfasst den gesamten Wurzelraum und stellt die Schnittstelle zwischen Pflanzendecke und Boden dar (Bresinsky u. a., 2008, S. 752).

²⁵ **Chelat-Komplex:** Chelat-Komplexe gehören chemisch betrachtet zu den Komplex-Verbindungen. Ein Komplex-Ion oder Komplex-Molekül, häufig einfach Komplex genannt, besitzt als Zentralatom ein Metall-Ion oder Metall-Atom, an welches mehrere Moleküle oder Ionen, die Liganden, angelagert sind (vgl. Mortimer & Müller, 2007, S. 506). Zweizählige Liganden (binden sich mit zwei Atomen ihres Moleküls oder Ions an das Zentralatom) bilden mit dem Zentralatom ringförmige Strukturen. Solche Komplexe bestehend aus metallischem Zentralatom und mehrzähligen Liganden werden Chelat-Komplexe (griechisch chele = Krepsschere) genannt. Beispiel: Chlorophyll ist ein Chelat-Komplex des Mg²⁺-Ions (vgl. Mortimer & Müller, 2007, S. 509 ff).

Sowohl aus naturschutzkundlicher als auch aus wirtschaftlicher Perspektive bergen Chalkophyten zwei für die Belange in beiden Bereichen interessante Möglichkeiten: Zum einen können Schwermetallakkumulatorpflanzen für die Entseuchung schwermetallbelasteter Böden (Phytoremediation, Phytosanierung) verwendet werden, zum anderen können Metallophyten auch als Quelle für die Gewinnung seltener Metalle (Phytomining) genutzt werden (vgl. Schulze u. a., 2002, S. 219).

Erhöhte Schwermetallkonzentrationen in Böden sind oftmals anthropogenen Ursprungs. Mit dem Einsetzen der industriellen Revolution stieg und steigt das Ausmaß an pedologischen Schwermetallkontaminationen enorm. „Verglichen mit den Frachten aus anthropogenen Quellen sind die natürlichen meist unbedeutend.“ (Scheffer u. a., 2010, S. 459). In Europa sollen bereits 20% der terrestrischen Oberfläche mit Schadstoffen belastet sein, wobei vor allem stark besiedelte und industrialisierte Areale besonders betroffen sind. Da herkömmliche Methoden zur Dekontaminierung der Böden äußerst kostspielig und zeitintensiv sind, steht die Entwicklung von günstigeren und effizienten Verfahren im Fokus. Als mögliche Alternative bieten sich die Methoden der Phytoremediation, also die Verwendung von schwermetallakkumulierenden Pflanzentaxa zur Dekontaminierung von belasteten Böden, an (vgl. Saier & Trevors, 2010, S. 61–62). Die Phytosanierung gilt als zerstörungsfreies biotechnologisches Verfahren, welche sich die Fähigkeit von Pflanzen zunutze macht, Bodenschadstoffe aus dem Boden aufzunehmen und in bestimmten Pflanzenteilen anzureichern, die sich mit einfachen Maßnahmen abernten lassen (vgl. Campbell u. a., 2011, S. 1066). Mit der Ernte der schwermetallakkumulierenden Speicherorgane der Pflanzen können die anthropogen eingebrachten Schadstoffe entfernt werden. Für die Phytoremediation eignen sich vor allem Pflanzen, die in kurzer Zeit (zum Beispiel im Laufe einer Vegetationsperiode) einen großen Teil der Schwermetalle entziehen können. „The ideal plant is large and accumulates the undesirable substances well over 100-fold over the concentrations present in the contaminated site.“ (Saier & Trevors, 2010, S. 63). Mit dem Ziel der Bodensanierung gibt es mehrere Möglichkeiten und Verfahren, welche angewandt werden können (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 396; vgl. Schulze u. a., 2002, S. 219 ff):

- **Phytoextraktion:** Schadstoffakkumulierende Pflanzen extrahieren aus dem Boden und reichern den Schadstoff in der pflanzlichen Biomasse an. Anschließend erfolgen Ernte, Verbrennen der organischen Substanz und Kompakt-Lagerung (oder Rückgewinnung)

der mit Schwermetallen angereicherten Asche. Häufig verwendete Taxa sind zum Beispiel der Hyperakkumulator *Thlaspi caerulescens* oder annuelle Pflanzen mit starker Wüchsigkeit, die eine mehrfache Ernte pro Jahr zulässt, aber nur mäßigen Raten der Schwermetallanreicherung aufweisen wie z.B. Mais.

- **Phytodegradation:** Pflanzen und assoziierte Mikroorganismen bauen den Schadstoff, meist organische Verbindungen, zu ungefährlichen Substanzen ab.
- **Phytostabilisierung:** Pflanzen vermindern die Bioverfügbarkeit eines Schadstoffs im Habitat, zum Beispiel durch Komplexierung.
- **Phytoverflüchtigung** bzw. Phyto-Volatilisation: Pflanzen entgiften den Boden durch Produktion flüchtiger Verbindungen, welche als Gase in die Atmosphäre entweichen.
- **Rhizofiltration:** Pflanzenwurzeln adsorbieren Schadstoffe aus Wasser und Abwässern.

Schwermetallhyperakkumulierende Pflanzen haben außerdem das Potential, mit dem Ziel der Schwermetallgewinnung im Rahmen von Phytomining-Projekten eingesetzt zu werden. Unter Phytomining versteht man die Rückgewinnung von Metallen aus pflanzlichen Geweben (vgl. Saier & Trevors, 2010, S. 62). Phytomining bedarf ausdauernder, trotz der Schwermetallbelastung rasch wachsender Pflanzen, welche das Schwermetall in die oberirdischen Pflanzenteile transportieren und in entsprechend rentablen Konzentrationen anreichern. Akkumulations- und Wuchseistung avancieren daher im Zuge der Auswahl der Taxa zu den entscheidenden Parametern (vgl. Schulze u. a., 2002, S. 219–221).

Zahlreiche Taxa scheinen als Hyperakkumulatoren für den Einsatz in Phytoremediationsprojekten in Frage zu kommen. Beispielhaft angeführt werden Farne der Gattung *Pteris* zur Arsenakkumulation, *Arabidopsis halleri* (Kriech-Schaumkresse) zur Anreicherung von Zink und Cadmium, oder die schnellwüchsigen Baumarten der Gattung *Populus* (Pappel), die mit ihrem weitläufigen Wurzelsystem eine hohe Reichweite aufweisen und hohe Wassermengen und eine enorme Bandbreite an unterschiedlichen Schadstoffen aufnehmen können (vgl. Saier & Trevors, 2010, S. 63).

Nachdem auch einige Serpentinophyttaxa in Anpassung an den schwermetallhaltigen Serpentinboden über Mechanismen der Hyperakkumulation verfügen (vgl. Kapitel 2.3.5),

scheint es durchaus sinnvoll zu sein, im Einklang mit naturschutzkundlichen Aspekten die verschiedenen Taxa auf ihren potentiellen Einsatz in Phytoremediations-Projekten zu überprüfen.

2.2.3. Serpentinböden und ihre biotischen und abiotischen Eigenschaften

Serpentinböden entstehen durch die Verwitterung ultramafischer Gesteine, welche mindestens zu 70 Prozent aus mafischen Mineralen (eisen- und magnesiumreich) bestehen. (vgl. Brady u. a., 2005, S. 245). Durch die Verwitterung ultramafischer Gesteine bilden sich Serpentinböden, welche auf Basis der Eigenschaften des Ausgangsgesteins bestimmte Charakteristika aufweisen. „Die chemische und mineralogische Zusammensetzung des Muttergesteins ist für den Ablauf der Bodenentwicklung entscheidend.“ (Gisi, 1997, S. 12).

Die chemischen, physikalischen und biotischen Komponenten der bodenbedingten bzw. edaphischen Faktoren bestimmen somit die ökophysiologische Spezifität des Serpentinstandorts. Die Gesamtheit aller Parameter, welche das Leben auf Serpentinböden charakterisieren, wird je nach Literatur unter den Begriffen „Serpentin-Faktor“, „Serpentin-Syndrom“, „Serpentin-Problem“ oder „Serpentin-Phänomen“ subsummiert.

Im Vergleich mehrerer Serpentinstandorte zeigen Landschaften und Gebiete, die von Serpentin geprägt sind, ein relativ hohes Maß an Heterogenität. Die räumliche Heterogenität der Habitatcharakteristika lässt eine besonders ausgeprägte Vielfalt innerhalb und zwischen Serpentinegebieten vermuten (vgl. Moore & Elmendorf, 2011, S. 230). Abhängig von der jeweils konkret spezifischen chemischen Zusammensetzung erscheinen Serpentinböden in den Farbnuancen rot, grün, blau oder schwarz (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 496). Obwohl die jeweiligen Serpentinstandorte sich in einigen Merkmalen unterscheiden, sind diesen folgende drei pflanzenbezogene Eigenschaften gemeinsam (vgl. Brady u. a., 2005, S. 245):

- a) Eine verringerte pflanzliche Produktivität

- b) Eine hohe Rate an Endemiten²⁶
- c) Vegetationstypen, welche sich von angrenzenden Gebieten wesentlich unterscheiden

Kausalanalytisch wirken mehrere unterschiedliche Faktoren zusammen, welche das „Serpentinphänomen“ begründen. Zusammengefasst werden folgende ökophysiologische Eigenheiten von Serpentinstandorten im Vergleich zu „Normalstandorten“ angeführt (vgl. Punz u. a., 2010, S. 88 ff):

- Höhere durchschnittliche Bodentemperatur
- Höhere Bodentemperaturspitzen (bis zu 12 Grad)
- Veränderter Luft- und Bodentemperatur-Tagesgang
- Höhere Boden- als Lufttemperatur mittags
- Höhere Evaporationswerte
- Höhere Beleuchtungsstärke
- Höherer Skelettanteil des Bodens
- Größerer Anteil an Grobkornfraktionen
- Höherer Magnesiumgehalt
- Höhere pH-Werte
- Höhere Transpirationswerte (aber größere mittägliche Einschränkungen)
- Höhere Blattsaugspannungswerte
- Höhere Wassersättigungsdefizite
- Geringere relative Luftfeuchtigkeit
- Geringerer Gehalt an K, P, Ca
- Geringerer Gehalt an anorganischer Substanz
- Geringerer Wassergehalt aller Bodenschichten

In den folgenden Unterkapiteln sollen die chemischen, physikalischen und biologischen Bedingungen und Faktoren von Serpentinböden genauer betrachtet werden.

2.2.3.1. Chemische Faktoren von Serpentinböden

Als einflussreichster Faktor, der auf die Flora an Serpentinstandorten wirkt, fungieren die spezifischen chemischen Bodenverhältnisse. Besonders charakteristisch sind im Vergleich zum reichhaltigen Magnesiumvorkommen die niedrigen Raten an Calcium. „Magnesium is nearly

²⁶ **Endemische Art:** Eine Art, die auf ein spezifisches, relativ kleines geographisches Gebiet begrenzt ist (Campbell, Reece, Held & Markl, 2008, S. 1507)

3 times more abundant than Ca in the serpentine soils“ (Oze u. a., 2008, S. 3391). Die hohen Magnesiumanteile im Boden wirken antagonistisch zur Calciumaufnahme durch die Pflanze und führen zu Mg-Vergiftungen (vgl. Brady u. a., 2005, S. 249). Der geringe Anteil an Calcium in Relation zu den hohen Magnesiumgehalten stellt die Flora vor pflanzenphysiologische Herausforderungen. Calcium hat eine wesentliche Bedeutung für das Pflanzenwachstum und für die Signalübertragung auf intra- und interzellulärer Ebene. Hohe Magnesiumgehalte stehen der Aufnahme von Calcium antagonistisch entgegen. Um den erhöhten Magnesiumgehalt auszugleichen, erfordert es Anpassungen der Pflanze, auf Basis welcher zum Beispiel der Ionenaustausch zwischen Wurzeln und Boden, der Calcium-Transport von den Wurzeln zu den Sprossen oder die Absonderung von Magnesium in die Vakuolen gewährleistet werden kann (vgl. Kay u. a., 2011, S. 74).

Außerdem enthalten Serpentinböden häufig erhöhte Raten an Schwermetallen wie Eisen, Nickel, Zink, Cadmium, Chrom, Kobalt oder Mangan, welche die Flora vor weitere Herausforderungen stellt (vgl. Kay u. a., 2011, S. 74), da deren Gehalte im Boden toxisch wirken können. Die Konzentrationen von Nickel und Chrom in Serpentinböden können je nach Standort von 500 bis 5000 µg / g variieren, Kobaltkonzentrationen werden zwischen 110 – 500 µg / g gemessen, Mangan kommt oftmals in Vergleich mit anderen Bodentypen in etwas erhöhten Konzentrationen vor (vgl. Ghaderian, Fattahi, Khosravi & Noghreian, 2009, S. 8). Hohe Schwermetall- oder Metallkonzentrationen müssen jedoch nicht immer automatisch mit ökologischen Problemen einhergehen. Die Schwermetalle können in Form von verschiedenen Molekülverbindungen so fixiert sein, dass diese wenig Einfluss auf die Bodenchemie oder auf den Ionenaustausch zwischen Boden und Pflanze ausüben bzw. bei bestimmten pH-Bedingungen praktisch immobil im Boden verbleiben. Am wenigsten beeinflussen Chromgehalte das Pflanzenwachstum, da Chromanteile, welche in Serpentinböden häufig in Form der Minerale Chromit oder Chromspinell (Picotit) vorkommen, in Böden besonders unlöslich sind. Die Verwitterung von Peridotiten und Serpentiniten führt zu erhöhten Fe- und Al-Gehalten in den Böden. Aufgrund der Eisenoxide erscheinen Serpentinböden häufig in rötlicher Farbe (vgl. Kruckeberg, 2002, S. 165–167; vgl. Lombini u. a., 1998, S. 20 u. 25).

Des Weiteren weisen Serpentinböden einen Mangel an primären Pflanzennährstoffen wie Stickstoff (N), Kalium (K) und Phosphor (P) auf (vgl. Brady u. a., 2005, S. 245).

Pflanzennährstoffe sind Elemente, die für das Wachstum und die normale Entwicklung der Pflanze lebensnotwendig (essenziell) sind und die in ihrer Funktion durch kein anderes Element ersetzt werden können. Diese werden von der Pflanze entweder als Moleküle (CO_2 , H_2O , O_2) oder als Ionen (Kationen und Anionen) aufgenommen. N, K und P zählen neben H, C, O, S, Mg und Ca zu den 9 Makronährstoffen (Hauptnährstoffe), die gemeinsam mit den 7 Mikronährstoffen (Spurennährstoffe) B, Cl, Mn, Fe, Cu, Zn, Mo jene 16 essenziellen Nährelemente bilden, welche Höhere Pflanzen benötigen (vgl. Gisi, 1997, S. 144). Die Verfügbarkeit von Phosphor wird vor allem durch die Bindung der Phosphate an die anwesenden Schwermetalle vermindert (vgl. Fischer, 2010b, S. 59). Das Defizit an Makronährstoffen scheint weltweit je nach Standort zu variieren: Während es zum Beispiel in Kaliforniens Serpentinegebieten vor allem an Stickstoff mangelt, kennzeichnet europäische Serpentinböden verminderte Kaliumgehalte (vgl. Kay u. a., 2011, S. 74). Der Mangel an Calcium und Kalium in Verbindung mit erhöhten giftigen Schwermetall- und Magnesiumgehalten bewirken besondere Nährstoffbedingungen und evozieren physikalische Faktoren wie zum Beispiel Austrocknung (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 9).

Zusammengefasst beschreiben im Wesentlichen vier Faktoren die Chemie der Serpentinböden (vgl. Kruckeberg, 2002, S. 164; vgl. Oze u. a., 2008, S. 3392):

- (1) Die niedrige Konzentration an Pflanzennährstoffen wie N, P und K
- (2) Die hohe Konzentration tendenziell toxisch wirkender Elemente bzw. Schwermetalle wie Cr, Ni, Fe, Mn, Co und Cd
- (3) Wenig Tonmineralanteile und niedrige Feuchtigkeitsgehalte
- (4) Niedriger Calcium/Magnesium Quotient; Calciummangel

2.2.3.2. Physikalische Faktoren von Serpentinböden

In Bezug auf die physikalischen Bedingungen erscheinen Serpentinstandorte oftmals steil und vergleichsweise steinig, wodurch die Böden angreifbar sind bzw. leicht verwittern und stark erodieren. Dies resultiert in meist sehr flachgründigen Böden mit minimalen Anteilen an bodenbildenden Elementen wie Schluff und Ton. In Bezug auf die Schichten bzw. die Horizonte

des Bodens stellt Kruckeberg fest: „Most have only A and C horizons.“ (Kruckeberg, 2002, S. 165). Böden werden anhand ihres Profilaufbaus, sprich ihrer Ausbildung von Horizonten, welche mit Großbuchstaben gekennzeichnet werden, typisiert. Unterschieden wird zwischen Auflage- und Mineralbodenhorizonten. Der A- und der C-Horizont sind beide Teil des Mineralbodenhorizonts (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 964; vgl. Gisi, 1997, S. 17):

- A-Horizont: Mineralischer Oberbodenhorizont mit Akkumulation zersetzter organischer Substanz und/oder Verarmung an mineralischer Substanz und/oder Humus (stark humushaltig)
- C-Horizont: Mineralischer Untergrundhorizont; entspricht dem Ausgangsmaterial im Untergrund, aus dem der Boden entstanden ist

Charakteristisch erscheint der Mangel an organischem Material (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 496). Demnach fehlen Serpentinböden im Vergleich mit der Liste der Haupthorizonte in der Regel häufig folgende Bodenhorizonte (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 964; vgl. Gisi, 1997, S. 17):

Fehlende bzw. reduzierte Auflagenhorizonte:

- L-Horizont: die Streuauflage, weitgehend unzersetzte Vegetationsrückstände
- F-Horizont: Fermentations- oder Vermoderungshorizont, Gewebestrukturen erkennbar
- H-Horizont: Humusstoffhorizont; Organischer Horizont mit mehr als 30 Masseprozent organischer Substanz, welcher unter Wasserüberschuss gebildet wird (Torf); keine Gewebestrukturen

Fehlende bzw. reduzierte Mineralbodenhorizonte:

- E-Horizont: Auswaschungshorizont (Eluvialhorizont)
- O-Horizont: Organischer Horizont über dem Mineralboden aus Humusansammlung mit Feinsubstanzbestandteilen
- B-Horizont: Mineralerde-Verwitterungs-Horizont, welche durch Mineralneubildung und Anreicherungen gekennzeichnet ist; jener mineralische Unterbodenhorizont, welcher in Farbe und Stoffbestand dem Ausgangsgestein ähnelt, jedoch durch die Akkumulation von eingelagerten Stoffen aus dem Oberboden und/oder Verwitterung verändert wurde;

- G-Horizont: der Mineralbodenhorizont mit Grundwassereinfluss und dadurch verursachten hydromorphen Merkmalen
- S-Horizont: Mineralischer Unterbodenhorizont mit Stauwassereinfluss, infolge gehemmter Wassersickerung zeitweise oder ständig luftarm

Folglich zeichnen sich Serpentinböden auch durch wenig Feuchtigkeit und niedrigen Nährstoffgehalten aus. Pflanzen an Serpentinstandorten müssen demnach sowohl mit Trockenheit als auch mit den für Serpentinböden typischen chemischen Merkmalen auskommen können. Im Vergleich mit Gebieten rund um die Serpentinstandorte weisen Serpentinböden eine verarmte Pflanzenvegetation auf. „Harsh substrates like serpentine also have low vegetation cover: a fact that, in turn, may slow the build-up of organic matter in soils“ (Strauss & Boyd, 2011, S. 182). Die lückige Pflanzendecke unterstützt die Erosion am Standort, fördert höhere Bodentemperaturen (vgl. Brady u. a., 2005, S. 245–246), reduziert den Aufbau von Nährstoffen und stärkt den Stressor Trockenheit, da der Boden kaum beschattet wird und Möglichkeiten zur Begünstigung fehlen (vgl. Strauss & Boyd, 2011, S. 182). Eine erhöhte Temperatur führt in der Regel zu einer erhöhten Wasserabgabe des Bodens (Evaporation) und in Folge zu einer reduzierten Verfügbarkeit von Bodenwasser für die Pflanzen. Erhöhte Temperaturen führen daher verstärkt zu Trockenstress bei Pflanzen (vgl. Brunold u. a., 1996, S. 47). Trotz Hitze und Trockenheit an der Oberfläche konnten jedoch durchaus auch Feuchtigkeitsgehalte unter der Oberfläche bzw. unterirdisch festgestellt werden. Dies liegt daran, dass Niederschlag zwar aufgrund der geringen Wasserspeicherkapazitäten rasch durchsickert, jedoch wiederum Grundwasser an Serpentinstandorten häufig an die Oberfläche dringt (vgl. Kruckeberg, 2002, S. 167).

2.2.3.3. Biologische Faktoren von Serpentinböden

Aus botanischer Perspektive zeichnen sich Serpentinstandorte insbesondere durch ihre im Vergleich mit benachbarten Regionen verarmte Flora und einen kargen Pflanzenbewuchs aus (vgl. Brady u. a., 2005, S. 246). In Bezug auf biotischen Stressoren an Serpentinstandorten wirken vor allem die verringerten Nährstoffgehalte im Boden. Die chemischen und physikalischen Faktoren spiegeln sich in Form verminderter pflanzlicher Produktivität wider,

welche zu weniger Produktion von Biomasse führt. Dies hält wiederum zugleich die Nährstoffgehalte im Boden auf gleichbleibend geringem Niveau (vgl. Kruckeberg, 2002, S. 168). Weiters stellen, zum Beispiel aufgrund der lichten Pflanzendecke bzw. geringeren Anzahl an Individuen, Herbivoren eine größere Gefahr für Serpentinophyten dar, als diese für Pflanzen auf nährstoffreicheren Böden besteht. Verstärkt wird das Risiko eines Herbivorenbefalls durch den Faktor Licht: Nachdem der Pflanzenbewuchs auf Serpentinböden dünn, Serpentinhänge häufig sonnenexponiert sind und die Bodentemperatur erhöht ist, wirken Serpentinstandorte auf olfaktorisch und visuell geleitete Herbivoren wie Insekten und deren Larven anziehend. Weiters sind Serpentinophyten auf den rudimentär besiedelten Standorten leicht auszumachen. Der Verlust an Geweben in einem Gebiet mit einem niedrigen Gehalt an Ressourcen wie Nährstoffen oder Wasser kostet der Pflanze mehr Energie und Fitness, da die Fähigkeit zur Regeneration nach einer Beschädigung bzw. Verletzung von den zur Verfügung stehenden Ressourcen abhängig ist. Toleranz gegenüber Verletzungen durch Herbivoren scheint von Arten auf Serpentinböden folglich geringer ausgeprägt zu sein als auf nährstoffreicheren, gemäßigten Böden (vgl. Strauss & Boyd, 2011, S. 183–184).

Jedes einzelnes Merkmal, welche in ihrer Gesamtheit das Serpentinphänomen generieren, erhöht den Stressfaktor, dem die Vegetation am Serpentinstandort ausgesetzt ist und aushalten muss. „At present, there is no general consensus on which factor is most important or even if one factor is more important than the others.“ (O’Dell, James & Richards, 2006, S. 50). Um dennoch zu überleben, bedarf es der Etablierung einer Reihe an physiologischen und morphologischen Anpassungen an die chemischen und physikalischen Bedingungen. Diese evolutiv bedingten Adaptationen werden diesen Ausführungen folgend nun im Kapitel 2.3 erarbeitet.

2.3. Pflanzenphysiologische und –morphologische Besonderheiten

Die chemischen, physikalischen und biotischen Bedingungen auf Serpentinböden haben wesentlichen Einfluss auf das Pflanzenwachstum. Wachstumsfaktoren wie die spezifische Beschaffenheit von Klima, Relief, Zeit oder Wasserverfügbarkeit kontrollieren und beeinflussen das Pflanzenwachstum (vgl. Oze u. a., 2008, S. 3391) und führen im Fall der Serpentinstandorte zu verarmter pflanzlicher Produktivität und zu einer hohen Anzahl an Endemiten, welche die Vegetation an Serpentinstandorten kennzeichnet (Oze u. a., 2008, S. 3393).

Bemerkenswert scheinen die verschiedensten Formen an evolutiven und modifikatorischen Anpassungen²⁷ zu sein, welche die Pflanzen an Serpentinstandorten kennzeichnen. „Among all morphological changes produced in vegetation by substrates, those found in serpentine floras are probably the most extreme.“ (Ghaderian u. a., 2009, S. 8). Faktoren wie hohe Konzentrationen an toxisch wirkenden Metallen im Boden, das ungleiche Verhältnis von Calcium- und Magnesiumgehalten, eine dünne Bodenschicht, die zu rascher Austrocknung neigt, der hohe Genfluss²⁸ zwischen Serpentinophyten und Arten angrenzender, nicht serpentinärer Habitate und die räumliche Isolierung von anderen Populationen kennzeichnen den Lebensraum auf Serpentin. „Serpentine habitats possess a seemingly insurmountable set of obstacles to successful colonization by plants.“ (Kay u. a., 2011, S. 71). In Anbetracht der hohen Anzahl an Stressoren wird deutlich, dass die Serpentinflora evolutiv entwickelte Spezialisierungen und Anpassungen erfahren haben müssen, um erfolgreich den Standort besiedeln und Populationen aufbauen zu können.

„Die an serpentinsspezifische Stressbedingungen angepassten pflanzlichen Eigenschaften („traits“) wurden von Hans Jenny (1980) summarisch mit dem Begriff „serpentine syndrome“

²⁷ **Anpassung: Evolutionäre Anpassung:** Im Laufe der Evolution erworbene, erbliche Merkmale oder Eigenschaften eines Organismus, die die Überlebenswahrscheinlichkeit und/oder den Fortpflanzungserfolg (individuelle Fitness) bei bestimmten Umweltbedingungen verbessern. Dabei kann es sich um morphologisch-anatomische Strukturen, physiologische Vorgänge oder Verhaltensweisen handeln. **Modifikatorische Anpassung:** Veränderungen von Eigenschaften des Phänotyps als Reaktion auf variierende Umweltbedingungen. (Campbell u. a., 2011, S. 1784)

²⁸ **Genfluss:** Die Migration fertiler Individuen oder ihrer Gameten führt zum Genfluss zwischen Populationen. Genfluss meint den Austausch von Allelen zwischen Populationen und bewirkt die Veränderung der Allelfrequenzen. Da Allele zwischen Populationen ausgetauscht werden, verringert der Genfluss die Unterschiede in den Allelfrequenzen zwischen Populationen (vgl. Campbell u. a., 2011, S. 641–642).

(vgl. Kruckeberg 1984) belegt“ (Punz u. a., 2010, S. 89). Im Folgenden sollen die modifikativ bedingten Serpentinomorphosen dargestellt und floristische Anpassungen an spezifische biotische und abiotische Merkmale von Serpentinstandorten, die das Serpentin Syndrom generieren, wie den niedrigen Ca:Mg-Quotienten, Nährstoffmangel, Wassermangel und Trockenheit, Schwermetallgehalte und Anpassungen zur Abwehr von Herbivoren erarbeitet und beschrieben werden.

2.3.1. Morphologische Modifikationen: Serpentinomorphosen

Serpentinophyten weisen im Vergleich zur Flora angrenzender Gebiete charakteristische Abweichungen in Bezug auf das Erscheinungsbild der Individuen (Phänotyp) auf. Bezeichnet werden diese Merkmale, die bei Pflanzen auf Serpentinböden auftreten, als „Serpentinomorphosen“, welche häufig nur modifikativ bedingt sind (vgl. Punz u. a., 2010, S. 89). Als Modifikationen²⁹ werden Änderungen in der Gestalt bzw. des Phänotypen bezeichnet, deren Ausbildung primär durch Umweltfaktoren evoziert wurde. Modifikationen sind – im Gegensatz zu Mutationen³⁰ – nicht genetisch fixiert und folglich auch nicht vererbbar. Eine Form der genetischen Prädisposition, welche die Varianz des Erscheinungsbildes zulässt, muss jedoch gegeben sein, um die entsprechenden Modifikationen ausbilden zu können. Diese kann über die artspezifische Modifikationsbreite, die einer erblich bedingten Reaktionsnorm unterliegt, beschrieben werden. Nachfolgende Beispiele für typische Serpentinomorphosen nennen Punz u. a. (2010, S. 89):

- **Nanismus:** Zwergwuchs, *Minderwuchs*, *Nanismus*, *Nanosomie* bezeichnet eine bei Pflanzen, Tieren und Mensch durch die verschiedensten Ursachen zustande gekommene Wuchsform, bei der die normale Größe der Gestalt (Körpergröße) nicht erreicht wird. Zwergwuchs kann als Rassenmerkmal einer Art im Zusammenhang mit

²⁹ **Modifikation:** Nicht erbliche, umweltbedingte Änderung der Gestalt (Nultsch, 2001, S. 626). Modifikationsfaktoren bzw. Modifikatoren: z.B. Licht, Temperatur, Nahrung, Sauerstoffpartialdruck, Salinität. Die Variationsbreite der Modifikationen (Modifikationsbreite) ist durch eine erblich bedingte Reaktionsnorm festgelegt und bei verschiedenen Arten unterschiedlich groß (vgl. Kompaktlexikon der Biologie, o. J.).

³⁰ **Mutation:** Vererbliche Veränderung im genetischen Material eines Organismus, die nicht auf Rekombination zurückzuführen ist. Molekular eine Veränderung in der Nucleotidsequenz des Erbmaterials (DNA oder RNA) (Campbell u. a., 2011, S. 1820)

der Anpassung an extreme Lebensräume selektioniert werden, als genetischer Defekt (Gendefekt) vorhanden sein oder aufgrund von Mangelzuständen (trockene Standorte, vermindertes Angebot an Nährsalzen oder Spurenelementen, Stickstoff- oder Zinkmangel bei Pflanzen oder Unterernährung bei Tieren) während der Ontogenese des Individuums auftreten (vgl. Lexikon der Biologie, o. J.-d). Nanismus bei Serpentinophyten wird demnach Folge der biotisch und abiotisch bedingten Mangelzustände auf Serpentinstandorten sein. Kümmerwuchs wird zum Beispiel mit minimierter Wasserversorgung (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 482) oder Mangel an Stickstoff (vgl. Pott & Hüppe, 2007, S. 205) assoziiert.

- **Stenophyllie:** griech. stenós = schmal, eng (Alexiou-Puljer, Zoli-Sudbrock & Puljer, 2008, S. 543); Die Bezeichnung „stenophyllus“ im Artnamen verweist auf Pflanzen mit sehr schmalen Blättern (vgl. Schmalblättrige Steppenkerze (*Eremurus stenophyllus*), Schmalblatt-Vergissmeinnicht (*Myosotis stenophylla* Knaf)). In diesem Sinne meint die Stenophyllie die Ausbildung von sehr schmalen, lanzettförmigen bis hin zu fadenförmigen Blättern.
- **Plagiotropie**³¹: Ausrichtung der Wachstumsrichtung von Pflanzenorganen (Seitenwurzeln oder -sprossen, Blättern) in einem festgelegten Winkel, der jedoch von der Reizrichtung (z.B. Licht oder Schwerkraft;) abweicht (Lexikon der Biologie, o. J.-c).
- **Glabreszenz:** Die Glabreszenz meint den teilweisen oder vollkommenen Verlust der Haare einer Pflanze (Verkahlung). Zu beobachten ist dies vor allem an jenen Exemplaren, die sich auf serpentinen Skelettböden befinden. Glabreszenz tritt nur bei manchen Arten auf. Pflanzen auf Serpentin erscheinen im Vergleich mit jenen auf anderen Bodentypen kahler (vgl. Ritter-Studnicka, 1967, S. 101–102).

³¹ **Plagiotropie:** plagios = schief, quer, schräg; tropos = Wendung, Richtung; Tropismus: Durch einen Reiz ausgelöste Bewegung einer ortsgebundenen Pflanze bzw. eines ihrer Organe, deren Richtung in Beziehung zur Richtung des einwirkenden Reizes steht (Nultsch, 2001, S. 631 und 639)

- **Glaukeszenz:** Bezeichnet die Grau-, Blaugrün- oder Blaufärbung von Blättern, Stängeln und Früchten, die durch Wachsausscheidungen hervorgerufen wird (Lexikon der Biologie, o. J.-b). Glaukeszente Pflanzen kommen auf Serpentin häufig vor. Mitunter wird eine bläuliche Färbung auch an Pflanzen beobachtet, die diese unter normalen Verhältnissen nicht aufweisen. Pflanzen mit Wachsdecken können besser mit ihrem Wasser haushalten, da diese Schutz vor Transpiration und somit vor Wasserverlust bieten. Die Dicke der Wachsdecken kann den momentanen Bedürfnissen der Pflanzen entsprechend unterschiedlich ausgebildet sein. Während in kühlen, regnerischen Jahren oder an schattigen Standorten die Wachsdecke oft nur schwach ausgebildet ist, nimmt die Dicke der Wachsdecke während trockener Bedingungen zu. Die Vorteile glaukeszenter Pflanzen sind für das Überdauern von Trockenzeiten auf den heißen Serpentinböden für die Pflanzenwelt offensichtlich (vgl. Ritter-Studnicka, 1967, S. 101 ff).
- **Sukkulenz:** Die Ausbildung fleischig-saftiger Wasserspeichergewebe (Nultsch, 2001, S. 636) verleiht den Pflanzen die Eigenschaft, längere trockene, heiße Perioden und den daraus resultierenden Wassermangel zu überstehen (vgl. Kiehn & Knickmann, 2015, S. 12). Die Umweltbedingungen auf trockenem, heißen Serpentin spiegeln sich im Blattbau vieler Serpentinpflanzen wider. Vergleichende Studien zeigten, dass bei Pflanzen über Serpentin die Zellen der Epidermis und mancher parenchymatischer Gewebe größer ausgebildet sind, sich die Zahl der Stomata je Flächeneinheit verringert und häufig größere Saftmengen und somit höhere Wassergehalte gemessen werden können (vgl. Ritter-Studnicka, 1972, S. 244 ff).

Ein weiteres Merkmal sind Verfärbungen der Pflanzen. Typisch sind zum Beispiel rote Färbungen (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 15) der Blattspitzen. Die Tendenz zu purpurnen Farbtönen zeigt eine ökophysiologische Stresssituation an (vgl. Fischer, 2010a, S. 213). Serpentinpflanzen zeigen im Unterschied zu ihren nächsten Verwandten, die nicht über Serpentin wachsen, allgemein bestimmte Merkmale wie etwa stärkere Rottöne (Naturschutzbund Burgenland, o. J.-i).

2.3.2. Anpassungen an den niedrigen Ca:Mg-Quotienten

Serpentinböden zeichnen sich, wie bereits erläutert, durch niedrige Calcium- und hohe Magnesiumgehalte aus. Forschungen zeigten, dass der niedrige Calciumanteil im Boden in Kombination mit dem erhöhten Magnesiumanteil jenen Faktor generiert, welcher das Pflanzenwachstum auf Serpentinböden im Vergleich mit weiteren Bedingungen, welche das Serpentin-Syndrom bedingen, am meisten beeinflusst. Die Erhöhung der Calciumanteile im Boden verringert Vergiftungserscheinungen von Pflanzen beeindruckend dramatisch (vgl. Brady u. a., 2005, S. 249). Der hohe Magnesiumanteil in Serpentinböden minimiert die pflanzenphysiologisch bedeutende Aufnahme von Calcium, weshalb die Etablierung spezifischer physiologischer Mechanismen zur Gewährleistung entsprechender Calciumkonzentrationen in der Pflanze notwendig ist. Mehrere an Serpentinböden angepasste Arten weisen im Vergleich mit ihren nicht-serpentinigen Verwandten höheren internen und externen Bedarf an Magnesium auf. Um jedoch die Vielzahl an pflanzenphysiologischen Herausforderungen, welche aufgrund des spezifischen Ca:Mg-Verhältnisses existieren, zu meistern, braucht es mehr als nur einen Mechanismus je Spezies. Es bedarf noch intensiver Forschungsarbeiten, um die toxische Wirkung von Magnesium und entwickelte Resistenzen zu verstehen (vgl. Kay u. a., 2011, S. 74). Mechanismen im Umgang mit dem niedrigen Ca/Mg-Quotienten, der auf Serpentinböden unter 1 liegt und üblicherweise einen Wert über 1 hat, werden folgendermaßen zusammengefasst (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 497):

- Selektivität: Mechanismen, anhand welcher Ca trotz der hohen Mg-Konzentrationen aufgenommen werden kann
- Die Ausbildung von Toleranz gegenüber Ca-Mangel und/oder toxischen Mg-Gehalten
- Hohe (geradezu luxuriöse) Mg-Aufnahme, welches für eine spätere Verwendung gespeichert wird

Als Beispiel zeigen dikotyle Angiospermen (zweikeimblättrige Blütenpflanzen) im Verhältnis zum gesamten Calciumgehalt in der Pflanze einen hohen Ca-Anteil in den Zellwänden, welche

an die Pektine³² der Mittellamelle³³ der pflanzlichen Zellwand gebunden sind. Als charakteristische Folgeerscheinungen von Calciummangel lassen sich vor allem in wachsenden Geweben wie Wurzelspitzen, Sprossen oder Blättern fehlende Zellwandverlängerungen, Disintegration von Zellwänden oder Gewebzusammenbrüche aufgrund Pektinabbaus erkennen. Im Umgang mit dem niedrigen Ca:Mg-Verhältnis wurden als Formen der Anpassung bereits mehrere physiologische Mechanismen wie selektive Ca-Aufnahme, Translokationen, die Exklusion von Magnesium oder Magnesium-Absonderung entdeckt (vgl. O'Dell & Rajakaruna, 2011, S. 100). Selektive Ca-Aufnahme bedeutet, dass Serpentinpflanzen mehr Calcium und weniger Magnesium absorbieren als ihre nicht-serpentin Äquivalenzarten. Die Absorptionseffektivität von Calcium muss bei Serpentinarten größer sein als bei nicht-serpentin Arten, sprich das weniger verfügbare Calcium wird besser genutzt. Serpentin-tolerante Pflanzen können auf Serpentinböden überleben, wenn sie einen Mechanismus ausgebildet haben, um entsprechende Mengen an Calcium aufzunehmen, ohne gleichzeitig dabei exzessive Mengen an Magnesium zu absorbieren. Während Formen selektiver Ca-Translokation von den Wurzeln zu den Blättern gefördert werden, wird die Translokation von Magnesium blockiert und Mg über die Wurzeln verstärkt wieder abgeschieden (vgl. Brady u. a., 2005, S. 248–249; vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 497).

Serpentinpflanzen erweisen sich als toleranter gegenüber hohen Magnesiumkonzentrationen im Boden, indem dessen Aufnahme unterbunden wird. Bevor die Pflanze damit beginnt, Magnesium zu absorbieren, muss dessen Konzentration im Boden einen bestimmten Schwellenwert überschritten haben. Der für optimales Wachstum unnatürlich hohe Bedarf an Magnesium bestimmter Serpentinarten konnte an den Gräsern *Poa curtifolia* und *Agrostis stolonifera* festgestellt werden (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 497). Der Mechanismus, Magnesium in weit höheren Mengen als für das unmittelbare Wachstum benötigt aufzunehmen („luxury consumption“), scheint eine weitere Form der Ausbildung von erhöhter Toleranz gegenüber Magnesium zu sein, welche mit einer verringerten Absorptionseffizienz von Magnesium gleichgesetzt werden kann (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 497).

³² **Pektine:** Gemeinsam mit der Hemicellulose und Cellulose zählen die Pektine zu den drei Gruppen an Kohlenhydraten, welche im typischen Falle als Bausteine der pflanzlichen Zellwände dienen. Als Pektine werden verschiedene hochpolare, dadurch hydrophile und stark hydratisierte und somit verhältnismäßig wasserlösliche Polysaccharide zusammengefasst (vgl. Weiler & Nover, 2008, S. 88–89).

³³ **Mittellamelle:** Dünne Schicht adhäsiven extrazellulären Materials (zumeist Pektine) zwischen den Primärzellwänden junger Pflanzenzellen (Campbell u. a., 2011, S. 1819).

Zunächst überraschend aber auf Basis der soeben beschriebenen Mechanismen im Umgang mit den hohen Magnesiumgehalten und mit den niedrigen Calciumanteilen in Serpentinböden scheint es daher nachvollziehbar zu sein, dass neben kalkmeidenden Taxa wie *Notholaena marantae* (Europa-Pelzfarn, vgl. 3.3.13) auch kalkstete oder kalkholde Taxa³⁴ auf Serpentinböden Populationen ausbilden können (vgl. Braun-Blanquet, 1964, S. 355). Als Beispiele für primär Kalkstandorte bevorzugende Taxa, die an Serpentinstandorten und auch in der Serpentinegruppe im Botanischen Garten der Universität Wien zu finden sind, können *Veronica austriaca* (Österreich-Ehrenpreis, vgl. 3.3.19), *Silene vulgaris subsp. glareosa* (Schutt-Blasen-Leimkraut, vgl. 3.3.17), *Arabidopsis* (= *Cardaminopsis*) *arenosa* (Sand-Schaumkresse, vgl. 3.3.2), *Digitalis grandiflora* (Großblütiger Fingerhut, vgl. 3.3.7), *Galium austriacum* (Österreich-Labkraut, vgl. 3.3.9) oder *Jovibarba globifera subsp. hirta* (Kurzhaar-Donarsbart, vgl. 3.3.11) angeführt werden. Zum einen begründet sich das Vorkommen kalksteter und kalkholder Taxa in den chemisch heterogen ausgeprägten Serpentinstandorten, deren Ca-Mengen standortabhängig variiert. Ein hoher Mg-Gehalt bleibt ohne Wirkung, wenn der Ca-Gehalt groß ist (vgl. Braun-Blanquet, 1964, S. 353–355). Diese Beobachtung unterstreicht zum anderen aber auch das Vorhandensein und die Notwendigkeit vielfältiger evolutiv bedingter Mechanismen wie Selektivität und erhöhte Toleranz gegenüber Magnesium, welche es den verschiedensten und so auch den calciphilen Taxa an Serpentinstandorten ermöglichen, mit den hohen Magnesium- und niedrigen Calciumanteilen in Serpentinböden umgehen zu können.

2.3.3. Anpassungen an den Nährstoffmangel

Kennzeichen von Serpentinböden sind deren verringerte Nährstoffgehalte. Im Umgang mit limitierten Makronährstoffgehalten, der auf geringen Anteilen organischer Materialien im Boden und dem Mangel an Phosphor und Kalium im Ausgangsgestein fundiert, entwickelten sich eine Bandbreite unterschiedlichster Strategien (vgl. Kay u. a., 2011, S. 74). Folge und auch Anpassungsstrategie von Nährstoffmangel sind unter anderem genetisch fixierte langsame Wachstumsraten, verarmte pflanzliche Produktivität und eine höhere Biomasseentwicklung

³⁴ **kalkstet**: ausschließlich auf kalkreichen Standorten; **kalkhold**: kalkreiche Standorte bevorzugend, aber nicht streng an sie gebunden; **calciphil**: kalkliebend (vgl. Fischer u. a., 2008, S. 1279–1280)

der Wurzeln im Vergleich zum Sprossanteil (vgl. O'Dell & Rajakaruna, 2011, S. 100). Infolge der verringerten Nährstoffkonzentrationen von Serpentinböden bilden sich Systeme zur Nährstoffaufnahme aus, welche bereits bei relativ niedrigen Nährstoffgehalten im Boden gesättigt sind. Folglich nehmen die Pflanzen weniger Nährstoffe auf (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 502).

Zusammengefasst finden sich unter anderem folgende acht Anpassungen an den limitierten Zugang zu Nährstoffen (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 501):

1. Langsame Wachstumsraten
2. Erhöhte Investition in die Ausbildung von Abwehrmechanismen gegen Herbivoren
3. Selektivität im Zuge der Absorption von Nährstoffen
4. Niedrige Sättigungsraten im Zuge der Nährstoffaufnahme
5. Nährstoffspeicherung und effiziente Nährstoffverwertung
6. Flexible Zuweisungsmuster (z.B.: Plastizität innerhalb des gleichen Wurzelsystems)
7. Hohe Investition in die Ausbildung von Wurzelsystemen
8. Effiziente Nährstoff-Recyclingmechanismen zur Sicherstellung minimaler Nährstoffverluste während der Blattseneszenz³⁵

2.3.4. Anpassungen an Wassermangel, erhöhte Temperaturen und Trockenheit

Nachdem Serpentinböden wie in Kapitel 2.2.3 dargestellt wasserdurchlässig sind und somit trockene Bedingungen fördern, müssen serpentintolerante Arten Anpassungen im Umgang mit der Trockenheit besitzen. „First, they typically possess xeromorphic³⁶ foliage, including reduced leaf size and sclerophylls.“ (vgl. Brady u. a., 2005, S. 246). Typisches Merkmal der

³⁵ **Seneszenz:** (1) Allgemein: Altern (2) Bei Pflanzen ein genetisch gesteuerter und energieabhängiger Alterungsprozess. Die Wachstumsphase zwischen dem Erreichen des vollen Reifestadiums (Maturitas) bis zum Absterben. Kann die ganze Pflanze oder nur Teile betreffen (Campbell u. a., 2011, S. 1838).

³⁶ **Xeromorphosen:** Bei Wassermangel und trockener Luft beobachtet man oft eine Verdickung der Cuticula, eine Verringerung der Zahl der Spaltöffnungen pro Fläche, stärkere Behaarung und eine stärkere Ausbildung der Gefäße und Festigungselemente. Diese morphologischen Anpassungen an Trockenheit werden als Xeromorphosen bezeichnet (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 482)

Serpentinophyten sind starke Sklerenchymentwicklung³⁷ der Blätter verbunden mit Dickblättrigkeit und mitunter eine blaugrüne, fast metallisch irisierende Blattfärbung (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 397). Charakteristische Anpassungen an Trockenheit inkludieren reduzierte Blattgrößen, Sukkulenz, Sklerophyllie und ein hohes Verhältnis der Wurzel:Spross-Biomasse³⁸ (vgl. O'Dell & Rajakaruna, 2011, S. 100).

Die an Serpentinstandorten vorkommenden Pflanzen weisen vielfach Zwerg- und Kümmerwuchs (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 397) bzw. Krüppelwuchs (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 15) auf. „[...] the stature of serpentine-tolerant plants is significantly reduced relative to counterparts on nonserpentine soil“ (vgl. Brady u. a., 2005, S. 246). Kompaktere Formen bzw. die Tendenz zur Ausbildung reduzierter Körpergrößen (Nanismus) sind unter trockenen Bedingungen von Vorteil und können so auch die charakteristischen verkümmerten Erscheinungsformen auf Serpentinstandorten erklären: „[...] the most [drought] tolerant plants were also the smallest“ (Brady u. a., 2005, S. 257).

Verstärktes Wurzelwachstum verbessert die Aufnahme von Wasser (und auch von Nährstoffen): Während die Ausbildung der Lateralwurzeln³⁹ unterdrückt wird, werden für die längeren und vor allem in die Tiefe wachsenden Wurzeln mehr Ressourcen zur Verfügung gestellt (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 502). „[...] root systems of species growing on and off serpentine sites are often more developed on serpentine soils than on neighboring soils“ (vgl. Brady u. a., 2005, S. 246). Gut ausgebildete Wurzelsysteme erleichtern den Zugang zu Feuchtigkeit in größeren Tiefen (vgl. Brady u. a., 2005, S. 254) und die Aufnahme von Nährstoffen. Bei manchen Arten wird bei trockenen Bedingungen das Tiefenwachstum der Wurzeln verstärkt (vgl. Kay u. a., 2011, S. 73–74). Auch Eigenheiten in der Mykorrhizierung ermöglichen manchen Serpentinophyten ihre Existenz an solchen Sonderstandorten (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 397). Untersuchte Symbiosen mit serpentinintoleranten ektomykorrhizalen

³⁷ **Sklerenchym:** Festigungsgewebe bei Höheren Pflanzen aus toten Zellen mit verdickten und zumeist verholzten Sekundärzellwänden. Hauptelemente sind Steinzellen (dienen der mechanischen Verfestigung und Verstärkung von Pflanzenzellen) und Sklerenchymfasern (lignifizierter Zelltyp, der strukturell verstärkt und mechanisch versteift) (vgl. Campbell u. a., 2011, S. 1839).

³⁸ **Biomasse:** Gesamtmasse der aus lebenden und toten Organismen bestehenden organischen Masse pro Flächen- oder Volumeneinheit eines Lebensraumes zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Biomasse kann als Frisch- oder Trockengewicht angegeben werden (Campbell u. a., 2011, S. 1790).

³⁹ **Lateralwurzel** (lateral root): Seitenwurzel; die Verzweigung der Wurzel erfolgt seitlich und ist endogenen Ursprungs, daher müssen sie die Rinde durchbrechen, indem sie deren Zellen mechanisch beiseiteschieben (vgl. Weiler & Nover, 2008, S. 199).

Gemeinschaften zeigen, dass diese die Anpassung an edaphische Stressoren auf Serpentin erleichtern (vgl. Kay u. a., 2011, S. 75). Als Mykorrhiza wird eine Gemeinschaft zwischen Pilzen und Pflanzenwurzeln, die für beide Seiten von Vorteil ist, bezeichnet. Das Mycel (das Geflecht aus Pilzhypphen) der Mykorrhizapilze kann Nährstoffe besser als die Pflanzenwurzeln aus dem Boden aufnehmen und die Pflanze damit versorgen, während die Pflanze im Gegenzug dem Pilz Kohlenhydrate und andere organische Nährstoffe zur Verfügung stellt. Ektomykorrhizapilze bilden ein Hyphengeflecht auf der Oberfläche einer Wurzel und können in die extrazellulären Räume im Inneren der Wurzel einwachsen (vgl. Campbell u. a., 2011, S. 860–861). Ektomykorrhizapilze vergrößern so die Wurzeloberfläche, die zur Wasser- und Nährstoffaufnahme zur Verfügung steht. Arbuskuläre Mykorrhiza-Pilze entwickeln dagegen keinen dichten Hyphenmantel an der Oberfläche der Wurzel, sondern die äußerst kleinen und stark verzweigten Pilzhypphen reichen bis in die Wurzelrinde hinein und bilden bäumchenartig verzweigte Strukturen. Die Hyphen durchdringen als schlauchförmige Einbuchtungen die Zellwand, jedoch nicht die Plasmamembran der Wurzelrindenzellen und gelangen daher auch nicht ins Zytoplasma (vgl. Campbell u. a., 2011, S. 1076–1077). Die Mehrheit der Serpentinpflanzen weist Symbiosen mit arbuskulären Mykorrhizapilzen auf. Arbuskuläre Mykorrhizapilze erhöhen die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen und erhöhen auch den Schutz zur Abwehr von Krankheitserregern. Je schwieriger die Nährstoffaufnahme in einem Ökosystem, desto mehr sind die Pflanzen von der Symbiose mit Mykorrhizapilzen abhängig, um Nährstoffaufnahme und Wachstum sicherstellen zu können (vgl. Schechter & Bruns, 2008, S. 3199).

Ein weiteres Kennzeichen vieler Serpentinophyten sind die xeromorphen Merkmale wie kleine, dicke, behaarte und bzw. oder immergrüne Belaubung (vgl. Safford & Mallek, 2011, S. 250). Zum Schutz vor Austrocknung werden auch vermehrt Haare ausgebildet. In Anpassung an die höheren Temperaturen an Serpentinstandorten besitzt zum Beispiel die Serpentinform des Crantz-Fingerkrauts (*Potentilla crantzii* var. *serpentina*, vgl. 3.3.14) eine starke drüsige Behaarung (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 15).

Pflanzen geben den Großteil des aufgenommenen Wassers als Wasserdampf ab. Dies wird auch als Transpirationswasser bezeichnet. Transpiration oder Verdunstung beschreibt den Übertritt von Wassermolekülen aus der flüssigen Phase in die Gasphase, die an allen

Grenzflächen einer Pflanze gegen nicht mit Wasserdampf gesättigter Luft erfolgt (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 264–266). In Bezug auf den Wassertransport zwischen Boden, Pflanze und Atmosphäre folgt das Wasser dem Potentialgradienten von hohem zu niedrigem Potential. Mit der Transpiration entsteht zwischen Boden und Atmosphäre ein Gradient im Wasserpotential⁴⁰ (vgl. Schulze u. a., 2002, S. 334). Die treibende Kraft der Transpiration ist das extreme Wasserpotenzialgefälle zwischen nichtwasserdampfgesättigter Außenluft und Interzellularenluft der Grenzschicht (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 267). Als Regelventile, welche den Wasserfluss begrenzen, fungieren die Stomata⁴¹ (Spaltöffnungen). Die Öffnungsweite der Stomata wird als Leitfähigkeit ausgedrückt (vgl. Schulze u. a., 2002, S. 351 ff). Die Reduktion der Leitfähigkeit der Stomata verringert die Transpirationsraten der Stomata und erhöht das Wasserpotential in den Blättern bei manchen Serpentinarten oder -ökotypen wie zum Beispiel *Bromus hordeaceus* (Flaum-Trespe; syn. Weiche Trespe) aus der Familie der Poaceae (Süßgräser) (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 501–502).

Neben den reduzierten Blattoberflächen weisen Serpentinophyten als Anpassung an die spezifischen edaphischen Bedingungen in vielen Fällen auch kleinere Blüten und eine verringerte Produktion von Nektar und Pollen auf. Serpentinophyten blühen in Anpassung an die Trockenheit im Vergleich mit dem Entwicklungsrhythmus nicht-serpentinärer Komplementärarten in der Regel früher und entwickeln schneller ihre Diasporen⁴². Diese verfrühte Ausbildung der Geschlechtsorgane der Pflanze geht zum Teil zu Lasten der Entwicklung der Biomasse der Blätter. In Folge der verkürzten Vegetationsperiode und des kümmerlichen, reduzierten Wuchses der meisten Serpentinophyten scheint eine ausschließliche Spezialisierung von Bestäubern auf Serpentinarten unökonomisch zu sein. Als

⁴⁰ **Wasserpotential:** Im Fließgeschehen zwischen Boden, Pflanze und Atmosphäre wirken mehrere Kräfte zusammen. Unter dem Begriff des Wasserpotentials wird das Fließgeschehen innerhalb und zwischen sehr unterschiedlichen Kompartimenten und die Verfügbarkeit des Wassers beschrieben. Es repräsentiert die Energie, die aufgewendet werden muss, um gebundenes Wasser in den Zustand freien Wassers überzuführen. Die Wasserbewegung erfolgt von Orten mit hohem Potential zu Orten mit niedrigem Potential (vgl. Schulze u. a., 2002, S. 332–334)

⁴¹ **Stomata, Spaltöffnungen:** Sind charakteristisch für cutinisierte Epidermen; jedes Stoma besteht aus zwei länglichen Schließzellen, die nur an ihren Enden fest miteinander verbunden sind, während die mittleren Bereiche durch den Porus voneinander getrennt sind. Der Porus stellt durch Epidermis und Cuticula hindurch die Verbindung zwischen Außenluft und Interzellularraum des Mesophyll- bzw. Rindengewebes her. Verformungen der Schließzellen regulieren die Weite des Porus. Die Stomata sind die entscheidenden Regulatoren des Gasaustauschs und der Transpiration (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 134).

⁴² **Diasporen:** generative (Sporen, Samen, Früchte, Fruchtstände oder auch komplette Samen tragende Pflanzen etc.) und vegetative (Zwiebeln, Spross- und Ausläuferknollen, Adventivknospen, Teile von Rhizomen, klonales Wachstum etc.) Ausbreitungseinheiten (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 831; vgl. Schulze u. a., 2002, S. 644)

Bestäuber fungieren daher Generalisten. Bienenpopulationen, welche Serpentinarten bestäuben, limitieren ihren Lebensraum bzw. ihre Nahrungsquelle nicht nur auf Serpentinophyten und deren Verbreitungsgebiet, profitieren jedoch vom zusätzlichen Nahrungsangebot an Serpentinstandorten (vgl. Brady u. a., 2005, S. 257; vgl. Wolf & Thorp, 2011, S. 276–277).

2.3.5. Anpassungen an erhöhte Schwermetallgehalte

Der entscheidende Faktor, um auf Serpentinböden leben zu können, scheint die Ausbildung von Anpassungen im Umgang mit den Schwermetallen zu sein. Untersuchungen zeigten, dass Serpentinophyten insbesondere gegenüber Nickel Anpassungen entwickelt haben: Mehr als 360 Arten in über 90 Gattungen und aus über 40 Familien zum Großteil dikotyler Pflanzen wurden identifiziert, welche Nickelkonzentrationen über 1000 mg/kg aushalten können. Davon scheinen 85-90 % der Arten auf Serpentinböden endemisch zu sein (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 499). Die meisten Pflanzen auf Serpentinböden zeigen jedoch im Vergleich mit Pflanzen auf anderen Bodentypen nur leicht erhöhte Schwermetallkonzentrationen. Ni-, Cr- oder Co-Gehalte variieren zwischen 10-100, 5-50 und 2-20 µg / g (vgl. Ghaderian u. a., 2009, S. 9).

Im Zusammenspiel von Pflanzen und Schwermetallen werden zur Kategorisierung der Pflanzen vier Typen genannt: Pflanzen mit Exklusion („excluders“), Akkumulatoren („accumulators“), Indikatoren („indicators“) und Hyperakkumulatoren („hyperaccumulators“). Exklusion unterbindet den Transport von Metallen von der Wurzel bis zu den Trieben oder verhindert die Aufnahme von Schwermetallen über die Wurzeln, indem Aufnahmemechanismen gänzlich fehlen (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 498). Anpassungsformen, um mit den erhöhten Schwermetallanteilen in Serpentinböden auszukommen, beinhalten physiologische Mechanismen zur Exklusion von Schwermetallen an den Wurzeln (entweder durch aktive Verhinderung der Aufnahme von Schwermetallen oder durch das gänzliche Fehlen von Mechanismen, die Metallionen aufnehmen würden), die Kompartimentierung bzw. Speicherung und Ablagerung von Metallen in verschiedenen Organen der Pflanze (wie zum Beispiel in Vakuolen, Zellwänden, epidermalen Zellen oder Trichomen) oder die

Entwicklung von erhöhten Toxizitätstoleranzen. Als Akkumulatoren bezeichnet man jene Pflanzen, welche die Fähigkeit besitzen, Metalle in Organen über der Erdoberfläche zu speichern. Als Hyperakkumulatoren werden jene Pflanzen benannt, welche in der Lage sind, bis zu 100fach mehr Metalle in ihren Trieben zu speichern als gewöhnliche Pflanzen. Als Hyperakkumulatoren werden Pflanzen definiert, welche in ihren Organen $> 1000 \text{ mg / kg}$ an Cu, Co, Cr, Ni oder Pb, oder mehr als $10\,000 \text{ mg/kg}$ an Mn oder Zn akkumulieren können (Brady u. a., 2005, S. 251; vgl. Wenzel & Jockwer, 1999, S. 145). Während bei metallausscheidenden Pflanzen (Exklusion) der Schwermetallgehalt in den Wurzeln höher ist, weisen Akkumulatoren und Hyperakkumulatoren die höchsten Metallgehalte in den Trieben und Blättern auf. In Bezug auf die Metallkonzentrationen bei Indikatorpflanzen zeigt sich bei diesen ein lineares Verhältnis von den Metallgehalten in Pflanze und Boden (vgl. Kay u. a., 2011, S. 74; vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 498–499).

Um mit den hohen Schwermetallgehalten in Serpentinböden umzugehen, werden die Schwermetalle u.a. in den Zellen der Pflanzen gespeichert. Manche Pflanzenarten haben die Fähigkeit entwickelt, in ihren Geweben Schwermetallkonzentrationen zu speichern, welche selbst die Konzentrationen im Boden übersteigen. „Hyperaccumulators can simply be viewed as accumulator plants that show extreme behaviour in metal uptake and translocation to the shoots“ (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 498). Hyperakkumulatoren (vor allem von Nickel) stehen auch bezüglich ihres Potentials zur Bioextraktion wertvoller Metalle im Fokus ökonomischer Interessen (vgl. Kay u. a., 2011, S. 74). Das Gösing-Täschelkraut (*Noccaea goesingensis*, vgl. 3.3.12) ist in der Lage, Zink und Nickel in den Zellen der Blattepidermis anzureichern (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 15). Messungen zum akkumulierten Nickelgehalt in den Blättern von *Noccaea goesingensis* aus dem Raum Bernstein im Burgenland zeigten, dass die Nickelgehalte der getrockneten Blätter (Trockenmasse) des Gösing-Täschelkrauts bis zu $\text{ca. } 12\,400 \text{ mg kg}^{-1}$ hoch waren. Alle anderen in der Studie involvierten Arten wiesen weniger als 1000 mg kg^{-1} Nickelanteil in der Trockenmasse auf, wie zum Beispiel *Achillea nobilis* (Edel-Schafgarbe) 160 mg kg^{-1} , *Genista pilosa* (Heide-Ginster, vgl. 3.3.10) 87 mg kg^{-1} , *Silene vulgaris* (Blasen-Leimkraut, vgl. 3.3.17) 64 mg kg^{-1} (vgl. Wenzel & Jockwer, 1999, S. 150). „[...] Untersuchungen ergaben Nickel- und Zink-Hyperakkumulation bei *Thlaspi* [*Noccaea*] *goesingenese* vom Standort Redlschag, wobei die Blattepidermen die höchsten Konzentrationen aufwiesen; anatomische Schnitte zeigten hier auch auffällig vergrößerte Zellen; ähnlich hohe Werte

finden sich in den Blattrosetten.“ (Punz u. a., 2010, S. 86). Weiters unterstützt die Hyperakkumulation von Schwermetallen die Pflanze bei osmotischen Regulationen und erhöht somit die Toleranz gegenüber Trockenheit (vgl. O’Dell & Rajakaruna, 2011, S. 101). Werden gelöste Stoffe wie Mineralionen einer Lösung hinzugefügt, binden die Solute Wassermoleküle, vermindern damit die Zahl der freien Wassermoleküle und erniedrigen die Kapazität des Wassers, um sich frei hin- und herzubewegen und Arbeit zu verrichten. Folglich bewirkt die Zugabe von gelösten Stoffen immer eine Erniedrigung des Wasserpotenzials (vgl. Campbell u. a., 2011, S. 1039). Nickel wirkt in der pflanzlichen Zelle als Osmotikum⁴³, da durch Nickel das Wasserpotential⁴⁴ der Pflanze verringert wird. Folglich kann Fotosynthese auch unter trockenen Bedingungen stattfinden (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 499). Wenig überraschend weist auch die Bodenstreu auf Serpentinflächen aufgrund der Speicherung in den Organen erhöhte Nickelgehalte auf. Als Folge der Nickelkonzentrationen in der Streu verändert sich zum einen die Qualität der pflanzlichen Abbauprodukte und zum anderen hat die nickelhaltige Streu Einfluss auf die Destruenten. Bei erhöhten Schwermetallkonzentrationen reduzieren sich die mikrobielle Diversität, die Biomasse und die Aktivität in Böden. Untersuchungen zeigten, dass zum einen Schwermetallgehalte in der Bodenstreu die Zersetzbarkeit erschweren und somit den Abbau der Bodenstreu verlangsamen. Zum anderen bedingt die erhöhte Konzentration von Schwermetallen auch eine veränderte Konstitution der Destruenten: Rund um Ni-hyperakkumulierende Pflanzen (wie zum Beispiel dem Baum *Sebertia acuminata* oder bei *Alyssum bertolonii*) findet sich häufig auch ein erhöhter Anteil nickelresistenter Bakterien (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 503–504). Der Faktor der erschwerten und verlangsamen Zersetzbarkeit von Bodenstreu aufgrund von erhöhten Schwermetallgehalten in pflanzlichen Abbauprodukten muss demnach auch

⁴³ **Osmose:** Diffusion durch eine semipermeable Membran, die das Lösungsmittel (in der Pflanze Wasser) durchlässt, die gelösten Stoffe aber nicht oder wesentlich langsamer. Das Wasser bewegt sich von der geringeren zur höheren Konzentration (Wagenitz, 2003, S. 227). **Osmotikum:** “A substance which plays a significant role in increasing or maintaining osmotic pressure, especially within cells” (Oxford University Press, o. J.)

⁴⁴ **Wasserpotential:** Potential, das die Verfügbarkeit von Wasser für Pflanzen angibt (Campbell u. a., 2011, S. 1850). Das Wasserpotential beschreibt die Gesamtwirkung der Konzentration gelöster Stoffe und des physikalischen Drucks. Wasseraufnahme und Wasserabgabe müssen zum Überleben der Pflanzen im Gleichgewicht gehalten werden. In den Zellen erfolgt die Nettowasseraufnahme und -abgabe durch Osmose. Das Wasserpotential bestimmt die Richtung der Wasserbewegung. Freies Wasser bewegt sich immer vom Ort des höheren Wasserpotentials zum Ort des niedrigeren Wasserpotentials. Der Wortteil „-potential“ im Begriff Wasserpotential bezieht sich auf die potenzielle Energie des Wassers – seine Kapazität, Arbeit zu verrichten, wenn es von einem Ort des höheren Wasserpotentials zum Ort des niedrigeren Wasserpotentials wandert (z.B. die Zellausdehnung) (vgl. Campbell u. a., 2011, S. 1038–1039). Eine voll turgeszente Zelle hat das Gesamtwasserpotential 0, eine welke Zelle mit negativem Gesamtwasserpotential nimmt Wasser aus ihrer Umgebung mit höherem Potential auf (vgl. Wagenitz, 2003, S. 349)

Einfluss auf die Bodenausbildung haben. Daraus schlussfolgernd fördern zusätzlich zu den bereits beschriebenen physikalisch begründeten Faktoren auch die Schwermetall- insbesondere die Nickelgehalte in pflanzlichen Abbauprodukten die Flachgründigkeit der Böden und das limitiert vorhandene organische Material an Serpentinstandorten.

Während die Symbiose mit arbuskulären Mykorrhiza-Pilzen, wie bereits erläutert, die Wasser- und Nährstoffaufnahme von Pflanzen positiv unterstützt, zeigen Studien, dass derartige Symbiosen auch im Umgang mit erhöhten Schwermetallgehalten von Bedeutung sein können. So wurden bei schwach- bis mittelmäßig nickelakkumulierenden Pflanzen auf Serpentinböden Neukaledoniens, die in stark ausgeprägten Symbiosen mit arbuskulären Mykorrhiza-Pilzen standen, verringerte Nickelgehalte in den Blättern und Sprossen gemessen und damit eine erhöhte Toleranz gegenüber erhöhten Metallkonzentrationen wahrgenommen. Hingegen wurden bei starken Ni-Hyperakkumulatoren, die über entsprechende Mechanismen im Umgang mit hohen Nickelkonzentrationen und zur Ni-Anreicherung verfügen und daher hohe Ni-Konzentrationen in Sprossen, Blättern und im Bereich der Rhizosphäre aufweisen, vermindert ausgeprägte Symbioseaktivitäten mit arbuskulären Mykorrhiza-Pilzen festgestellt (vgl. Amir, Perrier, Rigault & Jaffré, 2007). Die Ausprägung von Symbiosen zwischen Pflanzen und arbuskulären Mykorrhiza-Pilzen stehen demnach in Korrelation mit der Fähigkeit zur Hyperakkumulation. Während Pflanzen ohne hyperakkumulative Merkmale ihre Resistenz gegenüber hohen Nickelgehalten mithilfe von arbuskulären Mykorrhiza-Pilzen erhöhen können, scheinen Hyperakkumulatoren Symbiosen mit arbuskulären Mykorrhiza-Pilzen eher zu vermeiden.

Wesentliche Bedeutung hat Calcium für Pflanzen in der Ausbildung von Resistenzen gegenüber Krankheitserregern. Da Serpentinböden nur wenig Calcium zur Verfügung stellen, besteht die Vermutung, dass die Pflanzen in Relation anfälliger gegenüber pathogenen Befällen sein könnten. Herausgefunden wurde allerdings, dass durch die Hyperakkumulation von Nickel oder Zink bakterielle oder pilzartige Infektionen verringert werden. Festgestellt wurde diese evolutive Anpassung an mehreren Arten der Gattung *Noccaea*. Nickeltoleranz erhöht sich mit steigenden Salizylsäuregehalten. Salizylsäure wirkt gleichzeitig als wichtiges Signalmolekül, das die Ausbildung von Resistenzen gegenüber Krankheitserregern initiiert. Die Art *Noccaea goesingensis* (vgl. 3.3.12) zeichnet sich durch hohe Nickeltoleranz aus und weist

folglich auch hohe Salizylsäuregehalte auf. Untersuchungen am Hyperakkumulator *Noccaea goesingensis* zeigten, dass ein Pilzbefall durch den Echten Mehltau (Erysiphaceae) verhindert bzw. abgewehrt werden konnte, weil die höheren Salizylsäuregehalte die Ausbildung entsprechender Abwehrmechanismen rasch stimulierten. Der aufgrund der Nickelhyperakkumulation bereits erhöht vorhandene Gehalt an Salizylsäure scheint im Falle eines Befalls durch einen Krankheitserreger, die Ausbildung von Schutzmaßnahmen der Pflanze zu ersetzen bzw. zu beschleunigen, welche über Signalwege den Aufbau von Salizylsäure erst initiieren würden (vgl. Strauss & Boyd, 2011, S. 193).

2.3.6. Anpassungen zur Abwehr von Herbivoren

Als Vorteil erweist sich Hyperakkumulation von Schwermetallen in Bezug auf die Abwehr von Fressfeinden. Verletzungen und Beschädigungen der Pflanze stellen am Sonderstandort Serpentinboden aufgrund des limitierten Zugangs zu Ressourcen ein höheres Risiko dar. „[...] the relative fitness costs of herbivory are greater where resources are scarce [...]” (Harrison & Rajakaruna, 2011b, S. 421), weshalb in rauen und unproduktiven Ökosystemen Abwehrmechanismen besser ausgebildet werden. Regeneration kostet Energie und Vitalität. Untersuchungen zeigen, dass insbesondere die Hyperakkumulation von Nickel die Pflanzen dabei unterstützen, Herbivoren vor dem Verzehr der Pflanze abzuhalten (vgl. Kay u. a., 2011, S. 75). „These substances are foul-tasting and often toxic, causing animals that eat them to prefer other sources of nutrition.” (vgl. Saier & Trevors, 2010, S. 63). Der Verzehr von schwermetallangereicherten Pflanzenteilen kann Brechreiz auslösen und bis hin zum Tod führen, wodurch folglich Fressfeinde von der Insektenlarve bis hin zu großen Herbivoren lernen, diese zu meiden. Weiters erhöhen die angereicherten Schwermetallgehalte den Schutz vor pathogenen Infektionen durch Pflanzenviren, Bakterien und Pilzen (vgl. Saier & Trevors, 2010, S. 63). Am Beispiel von *Thlaspi montanum*, Syn. *Noccaea montana* (Berg-Täschelkraut, Syn. Berg-Hellerkraut) konnte außerdem im Rahmen von Versuchen nachgewiesen werden, dass bei Ergänzung von nickelhaltigem Boden die Toleranz gegenüber schweren Beschädigungen bzw. Verletzungen der Pflanze erhöht werden konnte (vgl. Strauss & Boyd, 2011, S. 183).

2.4. Evolutive Aspekte des Sonderstandorts Serpentin

Bereits Alfred Russel Wallace und Charles Darwin, die in etwa zeitgleich 1858 (Wallace) und 1859 (Darwin) die Evolutionstheorien entwickelten, erkannten, dass sogenannte „Anpassungen“ an neue Lebensbedingungen das Produkt natürlicher Selektion und Zeugnis für evolutive Prozesse sind, welche schlussendlich neue Arten entstehen lassen. Aufgrund der speziellen Bedingungen an Serpentinstandorten, welche Anpassungen zum Überleben notwendig machen, stellen Serpentinböden möglicherweise ein ideales Modell dar, um ökologische Faktoren im Kontext evolutionärer Entwicklung zu betrachten: „Among such examples of edaphic specilization, plant adaptation to serpentine soils is a system ideal for studies in evolutionary ecology and satisfies key requirements for addressing mechanistic questions of adaptive evolution in nature.“ (Brady u. a., 2005, S. 243–244). In Bezug auf evolutive Betrachtungen ist auch der Insel-Charakter von Vorteil, der Serpentinstandorte kennzeichnet: Mit ihrer auffällig divergierenden Flora, die sich von jener der angrenzenden Habitate stark kontrastiv abhebt, gleichen Serpentinegebiete aufgrund ihrer Isolation und geringen Flächen edaphisch bedingten ökologischen Inseln wie kaum ein anderes Habitat am Festland (vgl. Harrison, 2011, S. 297). Das Prinzip der Verinselung, welches auf edaphischen Bedingungen basiert, findet sich neben Serpentinstandorten zum Beispiel auch auf Kalkstein, Guano, Salzmarschen oder in Bergbaugebieten (vgl. Rajakaruna, 2004, S. 584). Die Kategorisierung als inselähnlicher, terrestrischer, isolierter Sonderstandort begründet sich in den spezifischen abiotischen Bedingungen, welche den Lebensraum formen.

Als charakteristisches Merkmal von Serpentinstandorten weisen diese Gebiete neben langsamen Wachstumsraten, einer dünnen Pflanzendecke, verringerter Produktivität auch eine verlangsamte Sukzession⁴⁵ auf (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 502). Auf den Serpentin-Faktor ist es zurückzuführen, dass anspruchsvollere Arten auf diesen flachgründigen und mageren Standorten nicht überleben können und sich stattdessen konkurrenzschwache Sippen ansiedeln, die im Laufe der Evolution besondere Anpassungen entwickelt haben, um unter den extremen Bedingungen wachsen zu können (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 15). Als

⁴⁵ **Sukzession:** Wandel der Vegetation; Die Pflanzendecke befindet sich in beständigem Wandel und tritt am selben Standort je nach Phase der Sukzession mit unterschiedlichen Artenspektren, Lebensformspektren und Dominanzverhältnissen in Erscheinung. Jede Sukzession ist mit einer Veränderung des Habitats verbunden (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 1067–1068)

Endemiten werden Taxa bezeichnet, deren Verbreitungsgebiet räumlich sehr eng begrenzt ist. Im Gegensatz zu den Endemiten treten Kosmopoliten, wenn die entsprechenden ökologischen Ansprüche gegeben sind, weltweit oder nahezu weltweit auf (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 15–16). Endemismus, der auf einem bestimmten Bodentypen beruht, stellt eine häufige und besonders wichtige Spezialisierungsform von Lebewesen dar. Edaphisch bedingter Endemismus erhöht die Artenvielfalt bzw. die Betadiversität⁴⁶ einer Landschaft, weil die Zahl der vorkommenden Arten in einem Gebiet, das insbesondere aus mehreren unterschiedlichen, edaphisch und topographisch heterogenen Habitaten besteht, vergrößert wird. „But an entire ensemble of patches might have a greater regional diversity (aggregate number of species) than an undivided habitat of equal area because of the potential for competing species to coexist in a subdivided environment“ (Harrison, 2011, S. 303). In Verbindung mit dem Vorkommen von Arten, welche nur räumlich begrenzt auftreten, und einer erhöhten Betadiversität wirkt somit die Spezialisierung auf Habitate sowohl auf die Entstehung als auch auf das Aussterben von Arten (vgl. Anacker, 2011, S. 49).

2.4.1. Der Prozess der Speziation an Serpentinstandorten

Kennzeichnend für die Flora auf Serpentinstandorten ist ein beständiger potentieller Genfluss zwischen den Serpentinarten auf Serpentinböden und nächstverwandten nicht-serpentinigen Arten, die rund um bzw. angrenzend an das jeweilige Serpentinegebiet auf nicht-serpentinigen Böden gedeihen. Der Austausch genetischen Materials bzw. die Hybridisierung unterschiedlich an den Serpentinstandort angepasster Individuen führt zu einer gewissen Homogenisierung der serpentinigen und nicht-serpentinigen Populationen und erschwert so den evolutiven Prozess der Adaptierung an die Standortbedingungen und die Etablierung tatsächlich angepasster Arten, welche den Stressoren standhalten können. „[...] hybrids between differently adapted populations may be relatively unfit, not because of intrinsic genetic incompatibilities but because they are poorly adapted to available habitats [...]“ (Kay u. a., 2011, S. 78). Um mit den spezifischen chemischen, physikalischen und biologischen

⁴⁶ **Betadiversität:** Erfasst die Artenzahl-Differenz zwischen verschiedenen Habitaten und meint die auf Basis von Standortsunterschieden bedingte Variabilität der Artenzusammensetzung zwischen miteinander verbundenen, aber nicht einheitlichen Lebensräumen (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 60).

Bedingungen auf Serpentin umgehen zu können, sind jedoch Anpassungen der Populationen notwendig. Als Resultat dieser evolutiven Prozesse kommt es auch zur Entstehung neuer Arten.

Die Ausbildung innerartlicher Variationen stellt im Verlauf evolutiver Entwicklungen einen entscheidenden Parameter dar, da diese die Entwicklung von Anpassungen und Prozesse natürlicher Selektion einleiten und die Entstehung neuer Arten initiieren (vgl. O'Dell & Rajakaruna, 2011, S. 101). Innerartliche Variation resultiert aus unterschiedlichen genetischen Informationen im Genotyp verschiedener Individuen einer Art. Sichtbar können diese unterschiedlichen innerartlichen Erbinformationen durch die Manifestation phänotypischer Variationen (morphologischer oder physiologischer Art) werden. Im Verlauf der Zeit lassen natürliche Selektionsprozesse, die auf eine Population einwirken, genetisch unterschiedliche Teilpopulationen einer Art entstehen, die an spezifische ökologische Bedingungen angepasst sind. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der Ausbildung eines Ökotypen (vgl. O'Dell & Rajakaruna, 2011, S. 97). Als besonders evident erweist sich die Ausbildung von Variationen und Ökotypen an Nahtstellen, also im Übergangsbereich von zum Beispiel serpentin und nicht-serpentin Böden. In diesen Bereichen wechseln sich die Bodentypen und somit auch die edaphischen Bedingungen ab. An diesen Nahtstellen können innerhalb von Arten kleinräumig Mutationen akkumulieren, die Anpassungen an die Bodenverhältnisse darstellen, wodurch auf Basis natürlicher Selektion Variationen bzw. Ökotypen entstehen. Hier besteht die Chance, dass der spezialisierte Ökotyp überlebt bzw. sich im neuen Habitat etabliert. Auf diesem Wege können auf ein bestimmtes Habitat limitiert Endemiten entstehen, die ursprünglich weite Gebiete besiedelten („dezimierte Endemiten“, vgl. Kapitel 2.4.2. (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 501)). Vergleichbar ist der Prozess der Speziation auf Serpentinstandorten mit dem Prozess der phylogenetischen Diversifikation von Arten, welche Meeresinseln besiedelten und anschließend in Folge evolutiver Anpassungen Unterarten und neue eigenständige Arten ausbildeten, indem Varianten oder Unterarten verschiedene ökologische Nischen mit unterschiedlichen Ansprüchen für sich eroberten und besetzten (vgl. Harrison & Rajakaruna, 2011b, S. 419). Im Laufe der Generationenfolge entwickeln sich diese Teilpopulationen zu von der Mutterpopulation deutlich abgesetzten Pflanzenformen, die schließlich entsprechend ihrer phylogenetischen Differenzierung taxonomisch den Rang einer eigenen Art erhalten (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 32).

In Bezug auf die Bildung neuer biologischer Arten auf Serpentinstandorten bestehen zwei grundlegende Möglichkeiten, die eine Speziation zulassen: Entweder werden reproduktive Barrieren etabliert, welche Serpentinpopulationen von ihren nicht-serpentinigen Verwandten trennen, oder es kommt zu einer geographischen Isolierung der Populationen, welche einen möglichen Genfluss unterbindet. Die Ausbildung von postzygotischen Barrieren (nach Bildung der Zygote) verhindert, dass Hybriden sich zu lebens- und fortpflanzungsfähigen Adulten entwickeln. Als präzygotisch (vor der Bildung der Zygote) reproduktive Barriere wirkt neben der Habitatisolierung zum Beispiel die Verschiebung der Blütezeit (phänologische Isolation). Trockene Bedingungen auf Serpentinböden verlagern die Entwicklung und somit auch die Blütezeit der Pflanzen vor. Die zeitliche Verlagerung der Blütezeit unterbindet den Genfluss mit nicht-serpentinigen Individuen und dies reicht aus, um unterschiedlich angepasste Populationen voneinander zu trennen (vgl. Kay u. a., 2011, S. 76–79). Als weitere präzygotisch reproduktive Mechanismen mit dem Ziel der Isolierung gelten zum Beispiel die Veränderung der Fortpflanzungs- bzw. Ausbreitungsstrategien von Fremdbestäubern zu Selbstbestäubern oder die Entwicklung blütenmorphologischer Anpassungen, welche Einfluss auf die Attraktivität für die blütenbesuchenden Bestäuber haben (vgl. Brady u. a., 2005, S. 258) und so die Zusammensetzung der Bestäuber-Arten von jener der Nominatart⁴⁷ abwandelt. Während bei der Fremdbestäubung (Allogamie) stets zwei Individuen involviert sind, findet bei der Selbstbestäubung (Autogamie) die Bestäubung innerhalb eines Individuums statt (vgl. Bresinsky u. a., 2008, S. 819). Die Selbstbestäubung reduziert im Zuge der Reproduktion die Abhängigkeit der Pflanze von äußeren Einflüssen wie dies bei der Anemochorie (Transport durch Wind), Zoochorie (Ausbreitung durch Tiere), Hydrochorie (Transport durch Wasser) oder Hemerochorie (Ausbreitung durch den Menschen) der Fall wäre und schafft eine Barriere, welche Hybridisierung und Allogamie unterbindet. Der Vorteil der Isolierung überwiegt offenbar den Nachteil des fehlenden Genaustauschs im Zuge der Reproduktion. Als Beispiel kann in diesem Zusammenhang die Schwermetalltoleranz angeführt werden. Um das Merkmal der Schwermetalltoleranz zu erhalten und nicht durch Hybridisierung zu verlieren, etablierte sich bei manchen Arten die Autogamie anstelle der Fremdbestäubung:

„Tolerant strains of a taxon such as *Agrostis tenuis* are normally surrounded by non tolerant strains of the same species in the surrounding terrain and gene flow between the two populations is therefore possible. Tolerance across a geochemical boundary,

⁴⁷ **Nominat-Taxon:** namengebendes Taxon (vgl. Fischer u. a., 2008, S. 1288)

changes abruptly over a few meters. The self fertility of metal-tolerant populations is usually much greater than that of non-tolerant taxa and is presumably a strategy to reduce reduction of tolerance by flow of non-tolerant genes from the surrounding populations.“ (Brooks, 1987, S. 70).

In der Biologie wird dieser Effekt auch als „Gründereffekt“ beschrieben: Eine Gründerpopulation, die an einem isolierten Standort eine genetische Abweichung von der Ausgangspopulation erfährt, besteht nur aus wenigen Individuen. Die Anzahl der in der neuen Population vorhandenen Allele ist im Vergleich zur Ausgangspopulation stark dezimiert, wodurch sich die genotypische und phänotypische Variabilität – und damit auch die Fähigkeit bei sich verändernden Umweltbedingungen zu reagieren – stark reduziert. Hingegen können sich Allele, die für die Anpassung und Fitness vorteilhaft sind, in kleinen Populationen durch Selektion der Phänotypen rascher durchsetzen als in großen, wodurch es zur Entstehung neuer Arten kommen kann (vgl. Lüttge, Kluge, Thiel & Lüttge-Kluge-Thiel, 2010, S. 895–896). Auf diese Weise können ein paar wenige vorangepasste Genotypen zu Gründern einer toleranten Population werden (vgl. Rajakaruna, 2004, S. 584).

O’Dell und Rajakaruna fassen den Prozess der Speziation an Serpentinstandorten in fünf Schritten zusammen (vgl. O’Dell & Rajakaruna, 2011, S. 101–102):

1. Einige Individuen einer Art innerhalb einer nicht-serpentinigen Population entwickeln auf Basis genetischer Mutationen Merkmale, mit welchen diese mit den bodenbedingten Stressoren besser umgehen können.
2. Formen der Selektion wie zum Beispiel die disruptive Selektion⁴⁸ trennen die Art in serpentin-tolerante und serpentin-intolerante Ökotypen.
3. Der serpentin-tolerante Ökotyp etabliert weitere genetisch fixierte strukturelle und funktionelle Merkmale, die von Vorteil sind.
4. Die Isolierung der serpentin-toleranten und serpentin-intoleranten Arten wird genetisch markiert und fixiert. Der Genfluss zwischen den serpentin-toleranten Ökotypen und angrenzenden Populationen wird durch genetische und edaphische Faktoren reduziert.

⁴⁸ **Disruptive Selektion:** *zentrifugale Selektion*, bevorzugt phänotypische Extreme in einer polymorphen Population, die dadurch erhalten und verstärkt werden. Individuen mit einer Merkmalsausprägung, die dem Mittel der Population entspricht, haben folglich einen Nachteil (Lexikon der Biologie, o. J.-a).

5. Weitere evolutive Anpassungen des serpentintoleranten Ökotypen (Divergenz zur Ursprungspopulation in Bezug auf morphologische, physiologische und reproduktive Merkmale) lassen schlussendlich eine neue Art entstehen.

Die eben beschriebenen, Serpentinvegetationen kennzeichnenden Prozesse wie Genfluss, Gründereffekt, Verinselung, natürliche Selektion, die Ausbildung von Anpassungen und die damit einhergehende Etablierung von Variationen und Ökotypen bis hin zu neuen Arten unterstreichen die Bedeutung von Serpentinstandorten als Modellregionen bzw. Hotspots der Evolution.

2.4.2. Endemismus am Sonderstandort

Eine Spezifität von einigen Serpentinstandorten ist ihre hohe Anzahl an Endemiten. Die Zahl der Endemiten variiert weltweit jedoch je nach Standort. Während manche Serpentinegebiete weniger als 10 Endemiten aufweisen, sind in anderen Gebieten mehr als 900 Endemiten zu finden (vgl. Abbildung 4). Entsprechend der Grafik von Anacker, welche Serpentinstandorte anhand der Zahl der endemischen Serpentinophyten weltweit vergleicht, weisen die Serpentinstandorte im zentraleuropäischen Raum, somit Österreich inbegriffen, in Relation mit 18 anderen Serpentinstandorten nur niedrige Raten an Serpentin-Endemiten, nämlich <10 endemische Arten, auf (vgl. Anacker, 2011, S. 50). Zu den endemitenreichen Gebieten („endemic-rich areas“) gehören die Serpentinstandorte auf Neukaledonien (90% der Pflanzen auf Serpentinböden endemisch), Kuba (920 endemische Serpentinarten) oder Kalifornien. Als endemitenarme Gebiete wurden u.a. die Serpentinstandorte auf Neuseeland, Japan oder in Simbabwe klassifiziert (vgl. Ghaderian u. a., 2009, S. 8, 13–14).

Die Rate der endemischen Serpentinophyten an einem Serpentinstandort hängt auch von der Größe des Serpentinegebietes ab. Je mehr Serpentin-Fläche zur Verfügung steht, desto mehr Arten entwickeln Anpassungen an den bestimmten Bodentyp. „The increased exposure may provide more chances for species to adapt to the soil and eventually become restricted to it.“ (Anacker, 2011, S. 62). Während größere Gebiete eine höhere Diversitätsproduktivität aufweisen, werden besonders auf kleineren Gebieten durchaus auch neutrale bis negative Diversitätsraten beobachtet (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 502).

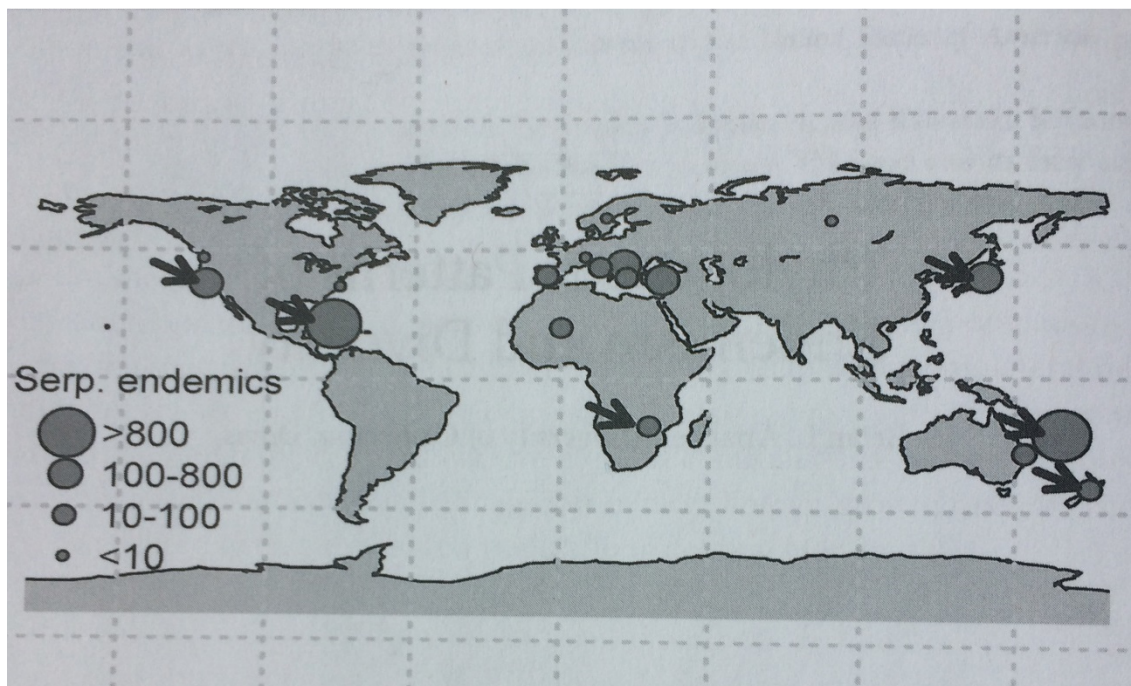


Abbildung 4: Karte, welche an 18 Serpentinstandorten weltweit die Zahl der Serpentin-Endemiten auf Ebene der Arten vergleicht. Pfeile zeigen die sechs Regionen an, welche eine hohe Artenzahl an Endemiten aufweisen: von links nach rechts: Kalifornien, Kuba, der Great Dyke in Simbabwe, Japan, Neukaledonien und Neuseeland (vgl. Anacker, 2011, S. 50).

Untersuchungen zeigten, dass zahlreiche Serpentinophyten ausschließlich auf Serpentinböden existieren können. Ihr natürlicher Lebensraum ist demnach auf Serpentinstandorte hin limitiert. Dies könnte darauf hinweisen, dass manche Serpentinophyten als Folge ihrer evolutiven Anpassungen an die chemischen und physikalischen Bedingungen auf Serpentinstandorten, ihre ursprünglichen Lebensräume nicht mehr besiedeln können. Folglich sind serpentin-tolerante Arten oftmals an Serpentinregionen endemisch (vgl. Brady u. a., 2005, S. 246). Diese evolutiven Entwicklungen können auch Zeugnis dafür sein, warum die Zahl der Endemiten an Serpentinstandorten in Relation zu anderen Standorten besonders groß ist.

In Bezug auf die Arten, welche auf Serpentinstandorten vorkommen, können fakultative und obligate Serpentinophyten unterschieden werden. Fakultative Taxa gedeihen auf Serpentinböden, obwohl die speziellen edaphischen und physikalischen Bedingungen an Serpentinstandorten für deren Wachstum keine Voraussetzung darstellen. Obligate Arten wachsen auf Serpentinböden, weil die speziellen Nährstoffbedingungen oder spezifische Ansprüche der Pflanze an diesen Standorten geboten werden. In diesem Zusammenhang

weist Brooks aber auch darauf hin, dass seiner Erfahrung nach obligate Serpentin-Endemiten auch auf anderen Böden wachsen könnten, jedoch halten diese in den meisten Fällen dem Konkurrenzdruck von anderen, widerstandsfähigeren bzw. kräftigeren Arten nicht stand: „It would seem that these plants are obligate to serpentine only insofar as such soils provide a refuge from biotic factors present in non-serpentine substrates“ (Brooks, 1987, S. 70). Die Besiedlung eines Lebensraums trotz dessen für das Pflanzenwachstum nachteiliger biotischer und abiotischer Bedingungen scheint demnach das Ergebnis einer unzureichenden Konkurrenzstärke gegenüber anderen Arten zu sein: „Experiments have shown that serpentine-tolerant species and races are limited to serpentine soils because of their inability to compete in nonserpentine environments“ (Brady u. a., 2005, S. 246). Serpentinintolerante Arten oder Serpentinendemiten erscheinen im Vergleich zu ihren robusteren, nicht-serpentinigen Nachbarn in angrenzenden Habitaten als konkurrenzschwach und wurden weniger aus physiologischer Präferenz, sondern vielmehr aus evolutiv kompetitiven Gründen auf Serpentinegebiet verdrängt. Bezeichnet wird dieser Effekt auch als Konkurrenzausschlussprinzip⁴⁹ (vgl. Moore & Elmendorf, 2011, S. 229). Serpentinstandorte scheinen demnach Rückzugsgebiet für Arten zu sein, welche an anderen Standorten rasch verdrängt werden würden, jedoch sich zugleich durch einen hohen Grad an Anpassungsfähigkeiten gegenüber den verschiedensten Stressoren auf Serpentinstandorten auszeichnen. Kazakou greift in diesem Zusammenhang auf folgende Kategorisierung der Serpentin-Endemiten zurück: Als dezimierte Arten („depleted species“) werden jene Endemiten bezeichnet, deren Verbreitungsgebiet sich zu früheren Zeiten über ein größeres Gebiet erstreckte, während diese heute nur mehr auf Serpentinhabitats reduziert sind. Im Gegensatz zu den dezimierten Arten stammen insulare Arten („insular species“) von einigen wenigen isolierten Individuen ab, welche bereits an ein spezifisches Habitat vorangepasst („pre-adapted“) waren (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 501). Aus dieser Perspektive heraus setzen sich Serpentinophyten aus Arten zusammen, die sich direkt am Serpentinstandort entwickelt haben, und aus Arten, welche den Standort aufgrund des Konkurrenzdrucks an anderen Standorten als Rückzugsgebiet nutzen.

⁴⁹ **Konkurrenzausschluss-Prinzip:** Besagt in der Populationsökologie, dass zwei oder mehrere Arten mit ähnlicher oder gleicher fundamentaler Nische in einem Lebensraum nicht koexistieren können. Diejenige Art, die die limitierte Ressource am effizientesten ausbeutet, wird sich einen Konkurrenzvorteil verschaffen und die anderen Arten verdrängen (ausschließen) (Campbell u. a., 2011, S. 1813).

Zusammengefasst beeinflussen Serpentinstandorte die Pflanzenevolution hauptsächlich über folgende zwei Formen (vgl. Paule, Kolar & Dobes, 2015, S. 196):

- Serpentinstandorte fungieren als ökologische Filter, welche die Besiedlung des Standortes nur von Arten mit (prä-) adaptierten Genotypen, welche die Erhöhung des Selektionsdrucks nutzen, um reproduktive Barrieren zu entwickeln, zulassen. Diese Form mündet im Gründer-Effekt bzw. in der peripatrischen Speziation.
- Serpentinstandorte wirken als Rückzugsgebiet für Arten mit verminderter Konkurrenzfähigkeit.

Ein weiterer Versuch der Systematisierung stellt die Einteilung der Serpentinophyten in endemisch („endemic“), tolerant („tolerator“) und nicht-tolerant („non-tolerator“) dar. Endemiten sind ausschließlich mit dem entsprechenden Bodentypen assoziiert und deren Verbreitungsgebiet an Serpentinböden geknüpft. Serpentinintolerante Arten finden sich sowohl auf Serpentinböden als auch auf anderen Bodentypen. Nicht-toleranten Arten ist es nicht möglich, auf Serpentinböden Populationen zu entwickeln. Die Kategorie der Serpentin-Endemiten gliedert sich in die beiden Subkategorien Paläoendemiten und Neoendemiten, deren Klassifizierung sich nach dem Zeitpunkt der phylogenetischen Entwicklung des Endemismus vollzieht. Als Paläoendemiten werden Arten bezeichnet, die sich von Populationen aus älteren Abstammungslinien ableiten und ihre Anpassungen früher ausgebildet haben („preadapted“), während Neoendemiten ihre evolutiven Anpassungen an die Serpentinböden erst in der jüngeren phylogenetischen Stammesgeschichte der Pflanze entwickelt haben (vgl. Anacker, 2011, S. 50). Paläoendemiten werden auch als Reliktendemiten bezeichnet, da das Fortbestehen der Art an den über geologische Zeiträume hinweg isolierten Lebensraum gekoppelt ist, da diese in Regionen mit erhöhtem floristischen Austausch, höherem Konkurrenzdruck und evolutionärer Weiterentwicklung nicht überdauern hätten können (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 16).

Untersuchungen nach Anacker zeigten, dass evolutive Entwicklungen von oder zu serpentinintoleranten Arten häufiger auftraten, als jene von oder zu endemischen Arten. Dies lässt erkennen, dass im Laufe evolutiver Prozesse eine Serpentinintoleranz leichter erreicht und auch wieder verloren gehen kann, als eine Spezialisierung auf den Lebensraum an

Serpentinstandorten⁵⁰ bzw. die Ausbildung eines Endemismus. Obwohl edaphisch bedingte Stressfaktoren und die Verinselung des Lebensraums – als edaphische Insel kann das durch den Bodentypen abgegrenzte Habitat betrachtet werden – eine phylogenetische Erweiterung unterstützen, begünstigen andererseits diverse Faktoren auch das Verschwinden bzw. Aussterben endemischer Arten: Niedrige Populationsgrößen, die räumliche Isolierung, ein geographisch begrenztes Verbreitungsgebiet, geringe genetische Vielfalt (schmaler Genpool) und enge Verwandtschaftsgrade (hohe Inzuchtraten) schwächen die Entwicklung der Populationen und führen möglicherweise wieder zu deren Extinktion (vgl. Anacker, 2011, S. 63–64). In diesem Zusammenhang scheint es auch nachvollziehbar, dass nach Anacker das durchschnittliche Alter von Serpentinböden endemitenreicher Serpentinstandorte niedriger ist als jenes endemitenarmer Serpentinstandorte⁵¹. Auch Thomson u. a. führen im Zusammenhang mit Serpentinstandorten an, dass ein kleines Verbreitungsgebiet in Kombination mit limitierter Immigration aus demographischen und genetischen Gründen zum Aussterben führen kann. Geringe Wachstumsraten, Allee-Effekte⁵², die vor der Ausbildung von Anpassungen eintreten und genetische Drift in kleinen, marginalisierten Populationen können zu einem Mangel an Variationen und einem negativen evolutionären Potential führen (vgl. Thomson, Baythavong & Rice, 2011, S. 202). Während man von der Annahme ausgehen könnte, dass sich die Zahl der Endemiten im Laufe der Zeit bzw. im Zuge fortschreitender evolutiver Anpassungen an einem Serpentinstandort grundsätzlich erhöht, widerlegen die Ausführungen Anackers diese Hypothese. Vielmehr begründen Anackers Ausführungen über die Entwicklung der Diversifikation endemischer Arten, welche im Laufe der Zeit rückläufig zu sein scheint, Serpentinstandorte als Orte höchst aktiver evolutiver Prozesse bzw. als Hotspots der Evolution. Während jüngere Serpentinböden eine höhere Rate an Endemiten aufweisen, sind auf älteren Serpentinböden weniger endemische Arten zu finden. Mit erneutem Verweis auf Brooks, der Serpentinstandorte ohnehin bereits als Rückzugsgebiet für jene Arten bezeichnet, die an anderen Standorten zu konkurrenzschwach sind, um sich durchsetzen zu können, scheinen die Serpentinophyten auch am Serpentinstandort gemäß Charles Darwins

⁵⁰ „This implies that serpentine tolerance may be more easily attained and lost (i.e., labile) over evolutionary time than habitat specialization.“ (Anacker, 2011, S. 63)

⁵¹ „The mean age of exposure of serpentine in endemic-rich areas is significantly lower than in endemic-poor areas [...]“ (Anacker, 2011, S. 62)

⁵² **Allee-Effekt:** Bezeichnet den Effekt, dass sich das Unterschreiten einer bestimmten Mindestgröße einer Population negativ auf das Überleben und auf die Reproduktion der Mitglieder auswirken kann (Campbell u. a., 2008, S. 1387).

Grundsatz „the survival of the fittest“ erneut evolutiven bzw. kompetitiven Prozessen ausgesetzt zu sein. Diese dürften demnach zunächst zu einer erhöhten Rate an Endemitendiversität führen (vgl. endemic-rich areas). Anschließend haben Stressoren wie niedrige Populationsgrößen, räumliche Isolierung, geographisch begrenztes Verbreitungsgebiet, geringe genetische Vielfalt (schmaler Genpool) und enge Verwandtschaftsgrade (hohe Inzuchtraten) das Potential, die Diversität an Endemiten zu reduzieren, um die Serpentinstandorte wiederum in endemitenarme Gebiete (endemic-poor areas) münden zu lassen. Aus dieser Perspektive heraus betrachtet, unterstreichen diese Entwicklungen die Theorie, Serpentinstandorte zum Beispiel aufgrund abiotischer Stressfaktoren, Symptome der Verinselung und hoher Grad an Habitat-Spezialisierungen sowohl als Hotspot als auch als Modell für evolutive Prozesse heranziehen zu können.

2.4.3. Taxonomische Herausforderungen

Das wissenschaftliche Fachgebiet zur Benennung (Nomenklatur) und zur auf Ähnlichkeiten beruhenden Klassifikation von Lebewesen wird als Taxonomie bezeichnet. Die auf phylogenetischer Verwandtschaft basierende Einordnung in das hierarchische System der Rangstufen ist die Aufgabe der Systematik. Das biologische System zur Einteilung eines Taxons in verschiedene Rangstufen (vgl. Anhang E: Wichtige taxonomische Rangstufen) wie Art, Gattung, Familie, Ordnung, Klasse, Stamm etc. wie auch die binäre Nomenklatur (zweiteiliges Schema zur Benennung einer Art bestehend aus Gattungs- und Artnamen (Epitheton)) beruhen auf Carl von Linné (vgl. Campbell u. a., 2011, S. 720 ff). Ziel der Systematik ist es, die Vielfalt von Organismen unterschiedlichster Form und Lebensweisen zu ordnen. Auch wenn es sich um ein künstliches System zur Einteilung von Lebewesen handelt, sollen Systematiken die korrekte Darstellung von natürlichen Verwandtschaftsverhältnissen zwischen Organismengruppen als grundlegende Absicht dieser wissenschaftlichen Auseinandersetzung widerspiegeln (vgl. Kadereit, Körner, Kost & Sonnewald, 2014, S. 534). Wenn auch die Rangstufe der Art als kleinste evolutiv selbstständige, gegeneinander klar abgegrenzte Verwandtschaftseinheit im hierarchischen System als zentralste zu betrachten ist, ist auch diese Ebene (wie die anderen Rangstufen) nicht einförmig homogen, sondern gegliedert heterogen. Sind unterscheidbare Einheiten vorhanden, welche mehr als ein einziges Merkmal

betreffen, handelt es sich um Rassen bzw. Sippen innerhalb einer Art, die taxonomisch als infraspezifische (= intraspezifische) Taxa bewertet werden. Je nach Ausmaß der Unterschiede werden diese als Unterarten, Varietäten oder *Formae* klassifiziert (vgl. Fischer u. a., 2008, S. 38–39). Speziell in der Auseinandersetzung mit der Taxonomie und Systematik von Serpentinophyten scheinen die Rangstufen der Unterarten und Varietäten wesentliche Bedeutung zu erlangen, um mit den intraspezifischen Taxa und deren Systematik hantieren zu können.

Wie bereits dargelegt, unterliegen Serpentinophyten verschiedensten evolutiv wirksamen Prozessen wie natürlicher Selektion, Genfluss, Gründereffekt, Verinselung, Konkurrenz-Ausschluss-Prinzip, Allee-Effekt, genetischen Drift, etc. Daraus schlussfolgernd können Serpentinstandorte durchaus als Hotspots der Evolution bezeichnet werden. In der Auseinandersetzung mit Taxa aus der Gruppe der Serpentinophyten und insbesondere auch im Zuge von Versuchen, diese systematisch einzuordnen, wird die evolutive Aktivität deutlich, denn die systematische Zuordnung von Serpentinophyten ist in vielen Fällen nicht geklärt und daher als kritisch oder problematisch zu betrachten.

Die Ausbildung von Ökotypen und Varianten kann als Vorstufe der Speziation und auch als Anzeichen laufender Artbildungsprozesse betrachtet werden. Pflanzenphysiologische und insbesondere phänetisch-pflanzenmorphologische Merkmale von Serpentinophyten wie die Ausbildung von Serpentinomorphosen, welche sowohl genetisch als auch modifikativ begründet sein können, stellen Systematiker vor Herausforderungen. „Floristisch erscheint es zweifelhaft, ob es sich bei „Serpentinpflanzen“ tatsächlich um genetisch distinkte Taxa oder lediglich um Serpentinomorphosen bzw. Varianten handelt.“ (Punz, 2014, S. 240). In vielen Fällen, wie der Ausprägung von Serpentinomorphosen, bedarf es daher molekularbiologischer Untersuchungen, welche anhand des Genoms feststellen, inwiefern Merkmale genetisch fixiert oder das epigenetische Produkt von Umwelteinflüssen bzw. edaphischer Stressoren sind. Studien zur Serpentinökologie und Biogeographie zeigten, dass Serpentinstandorte entweder eine unerwartete, noch nicht entschlüsselte taxonomische Diversität beherbergen, lokal angepasste Ökotypen, welche sich von den angrenzenden Populationen unterscheiden, beheimaten oder genetisch nicht unterscheidbare Populationen von präadaptierten

Pflanzenarten einen Lebensraum bieten, welche die entsprechende genetische Prädisposition haben, um am Serpentinstandort überleben zu können (vgl. Paule u. a., 2015, S. 196).

Mutationen und Prozesse wie genetische Drift wirken als Motor zur Ausbildung von neuen Merkmalen. Molekularbiologische Techniken erlauben es, im Vergleich mit dem Genom der Ursprungspopulation Differenzen in den Genotypen festzustellen, welche phänotypisch noch keine Ausprägungen gefunden haben und folglich auch nicht analysierbar sind. Anhand der Sequenzierung des genetischen Codes (DNA, RNA) wird das Genom von serpentin- und nichtserpentin- Pflanzen verglichen, um Gene zu identifizieren, die sich charakteristisch je nach Habitat oder bei speziellen edaphischen Bedingungen wie zum Beispiel Metallgehalten, Magnesiumanteilen, mikrobiellen Symbionten unterschiedlich ausprägen (vgl. Wettberg & Wright, 2011, S. 139–140).

Obwohl das Potential, an Serpentinstandorten Endemiten vorzufinden, gesteigert ist, bedarf es, so empfiehlt auch Kazakou, molekularbiologischer Untersuchungen, auf Basis welcher die Rangstufe einer Population, die sich in einem oder mehreren Merkmalen von einer Nominatart unterscheidet, feststellen zu können:

“There may be considerable pressure to demonstrate uniqueness in a serpentine flora of particular locality or region. The danger is that this can lead to description and naming of varieties, subspecies or even species that are not reliably distinguishable from other serpentine, or non-serpentine populations. Part of the problem lies in separating edaphic from genetic effects. Plants of a serpentine population of a species with wider distribution may show distinctive characteristics in stature or habit, or reduced size of particular plant organs, etc.” (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 501)

Als Beispiel kann in diesem Zusammenhang das Preissmann-Berg-Steinkraut (*Alyssum montanum* var. *preissmannii*, vgl. 3.3.1), welches über Serpentin in der Steiermark zu finden ist, herangezogen werden. Die taxonomische Einordnung der Populationen auf Serpentin ist wie bei vielen anderen Serpentinpflanzen nicht eindeutig geklärt. Augenscheinlich wird dies im Vergleich der Nomenklaturen (Benennung), welche die Pflanze zum Teil als Unterart (Subspezies) oder auch als Varietät behandeln: Das Taxon *Alyssum montanum* var. *preissmannii* (vgl. Fischer u. a., 2008, S. 645) wird von manchen Autoren auch als *Alyssum montanum* subsp. *preissmannii* (vgl. Wendelberger, 1974, S. 20–22) benannt. Die taxonomische Rangstufe der Varietät (=varietas) wird oft nicht zur Darstellung von natürlichen

Verwandtschaftsbeziehungen verwendet, sondern zur Bezeichnung von Populationen, die sich durch sehr wenige, zwar oft auffallende, aber taxonomisch bedeutungslose Merkmale hervortun (vgl. Fischer u. a., 2008, S. 41). Die taxonomisch kritische Stellung spiegeln auch Floren wie der „Catalogue of Life“ und „The Plant List“: Während The Plant List für den Suchbegriff *Alyssum montanum* var. *preissmannii* die Beschreibung „*Alyssum preissmannii* Hayek is an unresolved name“ (The Plant List, o. J.) anführt, weist der Catalogue of Life das Taxon *Alyssum preissmannii* nach Hayek auf *Artrang* aus, aber nennt das Taxon als Synonym für eine andere Berg-Steinkraut-Unterart, nämlich für das in Niederösterreich und im osteuropäischen Raum verbreitete Sand-Berg-Steinkraut (*Alyssum montanum* subsp. *gmelinii*) (vgl. Catalogue of Life, 2016). Auf der Homepage der Burgenlandflora wird hingegen *Alyssum montanum* subsp. *gmelinii* mit dem Trivialnamen „Gewöhnliches Berg-Steinkraut“ und *Alyssum montanum* subsp. *montanum* unter Anführungszeichen als Synonym für *Alyssum montanum* subsp. *gmelinii* angeführt. Damit stellt die Burgenlandflora.at mit Berufung auf eine Publikation aus dem Jahr 2012 die Rangstufe des *Alyssum montanum* subsp. *montanum* in Frage (vgl. Naturschutzbund Burgenland, o. J.-a). Welche Rangstufe für *Alyssum montanum* var. *preissmannii* diesem relativierten Artverständnis von *Alyssum montanum* entsprechend vorgesehen wäre, kann der Homepage der Burgenlandflora, welche die steiermärkische Flora nicht berücksichtigt, nicht entnommen werden. Auch Fischer u.a. markieren in der Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (2008) *Alyssum montanum* subsp. *montanum* als taxonomisch kritisch. Weiters wird angemerkt, dass die heute noch in Österreich vorhandenen Populationen von *Alyssum montanum* subsp. *gmelinii* den Populationen von *Alyssum montanum* subsp. *montanum* morphologisch recht nahe stehen und dass das typische subsp. *gmelinii*, das es früher in Österreich gegeben haben soll und in Herbarien dokumentiert ist, heute ausgestorben sein könnte (vgl. Fischer u. a., 2008, S. 645). Aus diesen Ausführungen schlussfolgernd scheint die systematische Aufspaltung der Art *Alyssum montanum* grundsätzlich weiteren Forschungs- und Fundierungsbedarf zu haben. Es fehlen Erkenntnisse, inwiefern und ob überhaupt das Taxon *Alyssum montanum* var. *preissmannii* (Preissmann-Berg-Steinkraut) von *Alyssum montanum* subsp. *montanum* (Gewöhnliches Berg-Steinkraut) und auch von *Alyssum montanum* subsp. *gmelinii* (Sand-Berg-Steinkraut) abzugrenzen ist. Mit der Benennung der Steinkraut-Vorkommen auf Serpentinstandorten als *Alyssum montanum* var. *preissmannii* werden nach Fischer u. a. (2008) die Populationen über Serpentinegestein lediglich von *Alyssum montanum* subsp.

montanum-Vorkommen an anderen Standorten abgegrenzt. Bestimmungsliteratur wie die Exkursionsflora von Österreich, Liechtenstein und Südtirol von Fischer, Oswald und Stadler führt das Taxon zwar als Varietät an, verweist aber auf den problematischen Wert dieser systematischen Zuordnung (vgl. Fischer u. a., 2008, S. 645). Weitere Forschungsarbeiten bzw. molekularbiologische Untersuchungen sind notwendig, um das Taxon eindeutig sprich genetisch fundiert systematisieren zu können.

Auf Basis der Ergebnisse genetischer Untersuchungen konnte die systematische Zuordnung zahlreicher Taxa korrigiert werden. 1974 wurden von Wendelberger zum Beispiel noch 18 Serpentinata unterschiedlicher Rangstufen angeführt. Spätere Untersuchungen und neuere Einstufungen klassifizieren die meisten Taxa nur als modifikative Serpentinomorphosen oder Varianten. Als „echte“ Serpentinarten werden von den ursprünglichen 18 Taxa nur mehr fünf als gültig erachtet, nämlich: *Asplenium cuneifolium*, *Asplenium adulterinum*, *Avenula adsurgens*, *Dianthus carthusianorum* ssp. *capillifrons*, *Myosotis stenophylla*. In weiteren Fällen ist es zweifelhaft, ob es sich tatsächlich um genetisch distinkte Taxa handelt oder lediglich um modifikative Serpentinomorphosen bzw. Varianten. Trotz der anzuzweifelnden systematischen Zuordnung werden bestimmte Taxa dennoch provisorisch als infraspezifische Taxa behandelt. An österreichischen Serpentinstandorten betrifft dies zum Beispiel die Taxa *Potentilla crantzii* var. *serpentina*, *Sorbus austriaca* subsp. *serpentina*, *Tephroseris integrifolia* subsp. (oder: var.) *serpentina* (vgl. Punz u. a., 2010, S. 86).

Ein Blick auf die Historie der Systematik des Serpentin-Steppen-Aschenkrauts (*Tephroseris integrifolia* subsp. *serpentina*, vgl. 3.3.18) offenbart beispielhaft die Korrekturen der Rangstufen einer Sippe, welche sich auf Basis fortschreitender wissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden ergeben. Das Serpentin-Steppen-Aschenkraut wurde vom ungarischen Botaniker Gayer im Jahr 1929 im Artrang (als „*Senecio serpentina*“) beschrieben. Damals war man der Überzeugung, dass Serpentinpflanzen jedenfalls „etwas Eigenes“ seien, auch wenn sie sich nur geringfügig unterscheiden würden. Diese Serpentin Sippe wurde später von Spezialisten und Spezialistinnen für diese Gattung als Unterart von *Senecio integrifolius* eingestuft. Die Gattung *Tephroseris* wurde aufgrund der Ähnlichkeit der Korbhülle lange Zeit als Sektion (sectio) der Gattung *Senecio* (Greiskraut) eingestuft. Mittlerweile steht fest, dass keine enge Verwandtschaft zwischen den Gattungen *Senecio* und *Tephroseris* vorliegt,

weshalb *Tephroseris* Gattungsrang erhalten hat, der auch das Serpentin-Steppen-Aschenkraut angehört. Gegenwärtig wird untersucht, ob es sich bei *Tephroseris integrifolia* subsp. *serpentini* um eine genetisch eigenständige Sippe und nicht nur um eine Standortsmodifikante handelt, denn auf Rangstufe der Unterart könnte das Taxon immer noch zu hoch eingestuft sein. Einziges phänetisches Unterscheidungsmerkmal des Serpentin-Steppen-Aschenkrauts von anderen *Tephroseris*-Taxa sind nämlich die purpurfarbenen Verfärbungen der Korbhüllblätter. Pflanzen mit purpurn gefärbter Korbhülle treten jedoch gelegentlich auch an Stellen auf, an welchen es keinerlei Serpentinegestein gibt. Vielmehr handelt es sich um das Anzeichen einer verminderten Nährstoffversorgung. Mit Verweis auf die zuvor genannte Aussage Kazakous, welcher im Bestreben, die Einzigartigkeit der Serpentinflora in den Systematiken abzuspiegeln, die Gefahr sieht, dass Rangstufen vorschnell vergeben worden sind, bedarf es der genomfundierte Richtigstellung, auch wenn ein möglicher taxonomischer Bedeutungsverlust aus Sicht der burgenländischen Floristik gewiss zu bedauern wäre, denn das Serpentin-Steppen-Aschenkraut wäre einer der wenigen burgenländischen Endemiten (Fischer, 2010a, S. 213).

Als weiteres Beispiel für eine unzureichend fundierte pflanzensystematische Einordnung eines in Österreich vorkommenden Serpentinophyten kann der Kurzhaar-Donarsbart (*Jovibarba globifera* subsp. *hirta*, vgl. 3.3.11) aus der Familie der Dickblattgewächse (Crassulaceae) genannt werden. *Jovibarba* gilt heute vielfach als Sektion (sectio, taxonomische Einordnung zwischen Gattung und Art) der Gattung Hauswurz (*Sempervivum*) und wird daher als *Sempervivum* sect. *Jovibarba* bezeichnet (vgl. Fischer u. a., 2008, S. 405). In Bezug auf die Benennung bestehen neben *Jovibarba globifera* subsp. *hirta* mehrere Synonyme, die auf die mehrfach wechselnden Zuordnungen auf Art- und Gattungsebene hinweisen: *Jovibarba hirta*, *Jovibarba hirta* subsp. *hirta*, *Sempervivum hirtum*, *Sempervivum adenophorum*, *Diopogon hirtus*. Die mehrfachen taxonomischen Korrekturen spiegeln sich zum Beispiel in Floren wie dem „Catalogue of Life“ wider, welche insbesondere auf Ebene der Unterart mehrere Synonyme anführen.

Die Beispiele und Analysen in Bezug auf die Taxonomie und Systematik der Serpentinophyten zeigen, dass sich die hochaktiven evolutiven Prozesse (Hotspots der Evolution), welchen die serpentine Flora unterliegen, auch in den divergierenden systematisch-taxonomischen

Konzepten zur Einordnung der Sippen widerspiegeln. Sie repräsentieren demnach einerseits die floristische, ökologische und evolutive Dynamik, welche Pflanzen auf Serpentinstandorten erfahren, andererseits fehlen entsprechende Genomanalysen, um widerspruchsfreiere Systematiken und taxonomische Zuordnungen erstellen zu können. Während zum einen evolutive Prozesse wie beispielsweise die Entstehung neuer Arten noch nicht abgeschlossen und daher weiterhin zu beobachten sind, bedarf es zum anderen weiterer molekularbiologischer Untersuchungen, um die bestehende Sippensystematik zu fundieren.

3. Serpentinophyten und ihr Lebensraum

Im Anschluss an die geobotanischen Grundlagen, welche im zweiten Kapitel erarbeitet und behandelt wurden, widmet sich dieses dritte Kapitel den Pflanzen und dem Lebensraum über dem Gestein Serpentin. Pflanzen, die entsprechende Mechanismen vorweisen, um mit den extremen Bedingungen über Serpentinegestein umgehen und an Serpentinböden wachsen zu können, werden als Serpentinophyten bezeichnet (vgl. Fischer & Fally, 2006, S. 64).

Eines der eindrucksvollsten Merkmale der Serpentinstandorte zeigt sich bereits in den Übergangsbereichen von Serpentinegebieten und den ihnen angrenzenden Arealen. „The world's serpentine regions are known for their striking levels of endemism and the distinctive flora they possess relative to surrounding areas.“ (Kay u. a., 2011, S. 71). Die Physiognomie der Serpentinstandorte, welche demnach als botanische Manifestation der von Boden und Muttergestein bedingten abiotischen Faktoren betrachtet werden kann, scheint dem menschlichen Auge bereits im Moment des Betretens eines Serpentinegebietes am augenscheinlichsten zu werden. Im Folgenden soll daher der Lebensraum eines Serpentinstandorts auf sein Erscheinungsbild und die floristische Konstitution der Formationen über Serpentin hin untersucht werden.

Serpentinstandorte beherbergen eine Vielzahl an botanischen Raritäten, welche in den Roten Listen Österreichs als gefährdet bis hin zu stark gefährdet aufscheinen. Um diese Taxa zu sichern und langfristig zu erhalten, muss dem Schutz des natürlichen Lebensraums über Serpentin besondere Priorität verliehen werden. An das Kapitel über die Physiognomie des Biotoptypus anschließend werden daher die drei Hauptstandorte serpentinen Vorkommens in Österreich, welche sich in der Region um Bernstein im Burgenland, im Gurhofgraben bei Melk in Niederösterreich und in der Marktgemeinde Kraubath an der Mur in der Steiermark befinden, auf ihren naturschutzkundlichen Status hin überprüft.

Abschließend werden für 20 Serpentinophyten aus der Serpentin-Schaugruppe im Botanischen Garten der Universität Wien Pflanzenporträts entworfen, deren Verwendung als Informationsquelle für die Besucherinnen und Besucher des Botanischen Gartens angedacht ist.

3.1. Die Physiognomie des Biotoptypus Serpentinstandort

Unter dem Begriff des Biotops ist der Lebensraum (die abiotische Matrix bzw. der Standort) einer Lebensgemeinschaft bzw. Biozönose (die Gesamtheit aller Organismen in einem Lebensraum) zu verstehen, welche sich aus bestimmten Pflanzen-, Tier- und Mikroorganismenarten zusammensetzt. Biotop und Biozönose stehen in einem engen Wechselspiel und beeinflussen sich daher auch gegenseitig. Der pflanzliche Anteil wird auch als Phytozönose, der tierische Anteil als Zoozönose und die Mikroorganismengemeinschaften und weiteren Kleinlebensgemeinschaften als Synusien bezeichnet. Die Artenzusammensetzung an einem bestimmten Ort ergibt sich stets infolge ähnlicher abiotischer und biotischer Umweltansprüche (vgl. Campbell u. a., 2011, S. 1610 u. 1815; vgl. Kadereit u. a., 2014, S. 746). Zur Abgrenzung des Begriffs Habitat vom Begriff Biotop ist unter dem Begriff des Biotops ein aus verschiedenen Teillebensräumen bestehender Lebensraum zu verstehen, welche von mehreren Pflanzen und Tieren benutzt werden, während der Begriff des Habitats (im engeren Sinn der Wohnort einer Einzelart) stets mit dem Lebensraum eines bestimmten Taxons (wie zum Beispiel einer bestimmten Art) assoziiert ist (vgl. Pott, 1996, S. 41). Ein Biotop ist charakterisiert von einer bestimmten Mindestgröße und von einer einheitlichen, vegetationstypologisch oder landschaftsökologisch gegen die Umgebung abgrenzbaren Beschaffenheit, welche von bestimmten Strukturen bzw. Biotopelementen gekennzeichnet sind. Biotopelemente bzw. Biotopstrukturen stellen typische Biotopqualitäten dar, können aber in mehreren Biotoptypen enthalten sind (z.B. stehendes Totholz in Wäldern). Die Gesamtheit gleichartiger Biotope kann abstrahierend als Typus mit dem Begriff Biotoptyp(us) zusammengefasst werden. Charakteristische oft wiederkehrende Kombinationen von Biotopen entlang eines bestimmten ökologischen Faktorengradienten (häufig wiederkehrende in festem räumlichen Gefüge stehende Kombinationen von Biotoptypen) wie auch die Mosaike von Biotopen werden als Biotopkomplexe bezeichnet (vgl. Essl, Egger & Ellmauer, 2002, S. 10; vgl. Pott, 1996, S. 41).

Werden mehrere Serpentinstandorte miteinander verglichen, erweisen sich diese als äußerst vielfältig. Eine bestehende Heterogenität zwischen und innerhalb von im Vergleich betrachteten verschiedenen Serpentinstandorten gilt als Kennzeichen dieser Lebensräume. Ökosysteme von Serpentinegebieten weisen einen hohen Grad an Variation in Bezug auf

Faktoren wie Bodenkonstitution, Produktivität, Störungseinflüsse oder der Größe des Gebiets auf (vgl. Moore & Elmendorf, 2011, S. 230–231). Räumlich heterogen erscheint die Ausprägung der verschiedensten Parameter wie zum Beispiel Bodenchemie, Textur, Gesteinsanteile oder Toxizitätswerte. Die Palette an ökologischen Bedingungen variiert von unwirtlich-rau und unproduktiv bis hin zu ziemlich produktiven Standorten (vgl. Davies, 2011, S. 237–238). Mit rauen Bedingungen definiert Davies das Zusammenspiel jener Serpentin-Faktoren, welche aus den physiologischen Ungleichgewichten heraus und aufgrund limitierter Ressourcen resultieren und welche zu einer geringen Populationsdichte führen (vgl. Davies, 2011, S. 241). Gemeint sind jene Faktoren, welche das Serpentin-Syndrom wie bereits dargestellt generieren.

„The most common effect of this rock type upon the vegetation is to produce a xeromorphic impoverished flora, poor in species and individuals.“ (Brooks, 1987, S. 5). Charakteristisch für die Struktur des Serpentin-Ökosystems erweisen sich die unterentwickelte, kleinwüchsige Vegetation, eine relativ spärlich aber heterogen ausgeprägte Pflanzendecke, eine geringe Dichte an verholzten Elementen und Baumarten, eine vergleichsweise niedrige Biomasse, ungeschützt exponierter Boden, niedrige Baumkronen und eine im Vergleich stärker entwickelte vegetative Unterschicht. Die in Relation weniger ausgeprägte Baum- und Strauchschicht auf Serpentinböden schafft auch größere Angriffsflächen für Wind und Sonne und fördert demnach Austrocknung und Hitze (vgl. Safford & Mallek, 2011, S. 250). Standorte, die in besonders hohem Maße vom Serpentin-Syndrom geprägt sind, zeigen im extremsten Fall lediglich verkümmerte Wälder oder vertrocknetes Buschland bis hin zu Ödland mit kaum einer Vegetation (vgl. Kruckeberg, 2002, S. 160). Die rauen ökologischen Bedingungen an Serpentinstandorten agieren und fungieren als Filter für die an diesen Standorten vorkommenden Arten bzw. auf das Artenreichtum (vgl. Kazakou u. a., 2008, S. 502).

Die ökologische Standortamplitude reicht von extrem trocken und warm auf Felswänden über frische bis wechselfeuchte Standorte an Wegrändern bis hin zu kleinen Tümpeln und Lacken (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 17). „Serpentine soils vary from bare, rocky outcrops to deeper, more fertile grasslands even within local areas.“ (Kay u. a., 2011, S. 73). In besonderem Maße sichtbar werden die spezifischen physiognomischen Merkmale von Serpentinlandschaften an den Grenzgebieten im Übergang zu nicht-serpentinischen Arealen. Der Kontrast von

Serpentinegebieten zur Umgebung ist in der Regel deutlich sichtbar: Angrenzende Wälder überlassen das Terrain der Strauchschicht, wechselfeuchtes Grasland wandelt sich zu einem Standort mit dünn besiedelter krautiger Pflanzendecke, bis hin zum Wechsel von dichter Vegetation, die sich im Übergang zu Serpentinegebiet Ödland-Charakter annimmt. In Quebec wird die Taiga am Serpentinstandort zur Tundra, in Kuba und Neukaledonien ist ein Wechsel von tropischen Wäldern zu Savannen zu beobachten, auf Neuseeland folgen plötzlich Buchenwäldern Grasflächen bestehend aus verschiedenen Horstgras-Arten (vgl. Kruckeberg, 2002, S. 169).

Serpentinstandorte sind wie dargestellt in Bezug auf ihre Physiognomie und ihre Morphologie nicht homogen sondern von äußerst heterogenen Erscheinungsformen und unterschiedlichen Formationen bzw. Lebensräumen gekennzeichnet. Im Zuge der nun intendierten weiteren Auseinandersetzung mit den verschiedenen Vegetationsformationen über Serpentinittgestein bedarf es zur nachvollziehbaren Einordnung des in diesem Kapitel eingangs umrissenen Biotop-Begriffs einer begrifflichen Bedeutungsnuancierung. Mit Bezug auf die vom österreichischen Umweltbundesamt publizierte Monographie „Biototypen in Österreich. Vorarbeiten zu einem Katalog“ aus dem Jahr 1989, in welchem Serpentinstandorte als Biototypus klassifiziert und ausgewiesen werden (vgl. Holzner u. a., 1989, S. 206), sollen entsprechend dieser Auffassung alle verschiedenartig ausgeprägten Lebensräume (Biotope) über Serpentinitt-Gestein unter dem übergeordneten Begriff des „Biototypus Serpentinstandort“ subsummiert werden. Dem Biototypus der Serpentinstandorte gehören jedoch sehr unterschiedliche serpentine Lebensräume (Biotope) wie beispielsweise Serpentin-Trockenrasen, Serpentin-Rot-Föhrenwälder bis hin zu Serpentin-Felsspaltenfluren an. Den sehr verschiedenartig ausgeprägten serpentininen Lebensräumen gemeinsam ist der Standort über dem Gestein Serpentinitt, welcher Flora und Fauna bzw. sämtliche abiotische und biotische Bedingungen in diesen Lebensräumen in höchstem Maße beeinflusst. Dieser verbindende Faktor legitimiert trotz der Verschiedenartigkeit der darin enthaltenen Lebensräume die gemeinsame Kategorie des Biototypus Serpentinstandort. Um die verschiedenen Lebensräume (Biotope) auf Serpentinstandorten dem hierarchisch strukturierten Biotop-Konzepts zuordnen zu können, bedarf es folglich der Einführung einer weiteren Unterkategorie zum Biototypus Serpentinstandort. Die Kategorie des Subtyps dient der Differenzierung unterhalb des Niveaus der Biototypen (vgl. Essl u. a., 2002, S. 10). Die

heterogen ausgeprägten serpentinen Lebensräume (Biotope) können als Subtypen aufgefasst werden, die dem Biotoptypus Serpentinstandort angehören. Auf Basis dieser Überlegungen zur Einordnung der Formationen auf Serpentinstandorten werden dem Biotoptypus Serpentinstandorte angehörige Biotope als Subtypen behandelt.

Biotoptypus: Serpentinstandort

Subtypen: serpentine Trockenrasen, serpentine Rot-Föhrenwälder, serpentine Felsspaltenfluren, ...

An österreichischen Serpentinstandorten scheinen vordergründig zwei Subtypen von besonderer Bedeutung zu sein: Es prägen natürlich bedingte gehölzfreie oder gehölzarme Serpentin-Trockenrasen und Serpentin-Rot-Föhrenwälder das Landschaftsbild der Serpentinfluren (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 15 ff). Im Folgenden sollen nun exemplarisch drei der als Subtypen kategorisierten serpentinen Biotope vorgestellt werden. Auch wenn diese nachfolgend separiert behandelt werden, treten die Subtypen entsprechend dem charakteristischen Biotopmosaik miteinander eng verzahnt an Serpentinstandorten auf.

3.1.1. Serpentin-Rot-Föhrenwälder

Die dominierende Baumart auf den Serpentinstandorten ist die Rot-Föhre (*Pinus sylvestris*) (Michalek u. a., 2015, S. 9). Nachdem Serpentinstandorte zumeist felsig, flachgründig, nährstoffarm und trocken sind, können lockere bzw. lichte Rot-Föhrenwälder als jene Formation betrachtet werden, zu welcher sich die Vegetation günstigstenfalls entwickelt (vgl. Fischer & Fally, 2006, S. 30). Föhren-Trockenwälder treten unter natürlichen Bedingungen an Extremhabitaten auf. Die Rot-Föhre (*Pinus sylvestris*) verfügt über eine breite physiologische und ökologische Amplitude und besiedelt wie zahlreiche weitere Serpentinophyten Extremstandorte als Folge von Konkurrenzschwäche an vorteilhafteren Standorten. Während das Taxon nacheiszeitlich während der klima- und sukzessionsbedingten Wiederbewaldung ganz Europa überdeckte, wurde sie bereits im und seit dem wärmer werdenden Boreal (Mittel-Steinzeit) zu Gunsten klimatisch begünstigter Laubholzarten wieder zurückgedrängt und tritt heute im westlichen Mitteleuropa nur inselartig auf konkurrenzschwachen

Extremstandorten wie in Moor- und Trockenwäldern auf (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 123 u. 463; vgl. Pott, 1996, S. 245). Schlussfolgernd könnten die lichten Rot-Föhrenwälder über Serpentinitt demnach auch als serpentine Klimaxvegetation angesehen werden.

Neben den dominierenden Rot-Föhren finden sich an Serpentinstandorten auch weitere begleitende Baumarten. Gemeinsam mit der Trauben-Eiche (*Quercus petraea*) und der Fichte (*Picea abies*) bilden diese die charakteristische lockere, manchmal lichte und krüppelwüchsige Baumschicht (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 17) an Serpentinittstandorten.

Der Lichtholzcharakter von *Pinus sylvestris* begünstigt im Unterwuchs der Kiefernwälder einen vergleichsweise großen Arten- und Individuenreichtum (vgl. Pott, 1996, S. 245). Die Krautschicht der schütterten, schlechtwüchsigen Rot-Föhren-Wälder charakterisieren thermophile Arten wie Ästige Graslilie (*Anthericum ramosum*), Trauben-Geißklee (*Cytisus nigricans*), Kerner-Brillenschötchen (*Biscutella laevigata* subsp. *kernerii*), Wildes Alpenveilchen Synonym Alpen-Zyklame (*Cyclamen purpurascens*, vgl. 3.3.5) (Fischer u. a., 2008; vgl. Lanius, 2016). Im Serpentin-Rot-Föhrenwald treten auch typische seltene Arten wie Serpentin-Streifenfarn (*Asplenium cuneifolium*, vgl. 3.3.3) und das Gösing-Täschelkraut (*Noccaea goesingensis*, vgl. 3.3.12) auf.

Die Artenzusammensetzung variiert von Standort zu Standort. Um einen Eindruck zur Artenkonstellation zu erhalten, soll die Artenzusammensetzung des Rot-Föhren-Waldrasens am Serpentinstandorts im Gurhofgraben bei Melk (Niederösterreich) beispielhaft angeführt werden (vgl. Holzner u. a., 1989, S. 206): Die Taxa Seidenhaar-Backenklees (*Dorycnium germanicum*, vgl. 3.3.8), Zypressen-Wolfsmilch (*Euphorbia cyparissias*), Skabiosen-Flockenblume (*Centaurea scabiosa*) dominieren die Krautschicht. Daneben finden sich auch Glattfrüchtiges Brillenschötchen (*Biscutella laevigata*), Färber-Ginster (*Genista tinctoria*), Sichelblättriges Hasenohr (*Bupleurum falcatum*), Hügel-Meister (*Asperula cynanchica*), Kleine Bibernelle (*Pimpinella saxifraga*), Graslilien (*Anthericum* sp.), Tauben-Skabiose (*Scabiosa columbaria*), Echtes Labkraut (*Galium verum*), Heide-Labkraut (*Galium pumilum*), Heide-Ginster (*Genista pilosa*, vgl. 3.3.10), Echtes Leinkraut (*Linaria vulgaris*), Hügel-Echt-Schafgarbe (*Achillea collina*), Echtes Johanniskraut (*Hypericum perforatum*), Behaartes Johanniskraut (*Hypericum hirsutum*), Berg-Johanniskraut (*Hypericum montanum*), Karthäuser-Nelke

(*Dianthus carthusianorum*, vgl. 3.3.6), Sand-Fingerkraut (*Potentilla arenaria*), Buchs-Kreuzblume (*Polygala chamaebuxus*), Gewürz-Thymian (*Thymus vulgaris*), Rauken-Greiskraut (*Senecio erucifolius*), Echte Berberitze (*Berberis vulgaris*) oder die Fieder-Zwenke (*Brachypodium pinnatum*).

Die Strauchschicht ist an Serpentinstandorten generell nur sehr marginal ausgebildet. Dennoch treten vereinzelt auch Sträucher wie Heidelbeere (*Vaccinium sp.*), Faulbaum (*Frangula alnus*), Mehlbeere (*Sorbus aria*) und Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*) an Serpentinstandorten auf (vgl. Lanius, 2016; vgl. Michalek u. a., 2015, S. 17)

3.1.2. Serpentin-Trockenrasen

An felsigen, flachgründigen Standorten, an welchen kein Wald mehr wachsen kann, haben sich natürliche Felsrasen, sog. „Serpentin-Steppen“ gebildet (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 9). Felsrasen können als Subtyp des Biotoptypus Trockenrasen kategorisiert werden. Sie kennzeichnen niedrigwüchsige, schütterere Rasen, die kleinflächig felsige Hänge, Hügelkuppen oder Felsköpfe besiedeln, auf welchen wegen der Flachgründigkeit und Trockenheit des Bodens keine Gehölzvegetation aufkommen kann (vgl. Holzner u. a., 1989, S. 53). Als Rasen werden alle mehr oder weniger geschlossenen Vegetationstypen bezeichnet, welche reich an Grasartigen sind und in welchen größere Gehölze fehlen, so zum Beispiel Wiesen, Weiderasen, Steppen (vgl. Fischer & Fally, 2006, S. 63). Die mitteleuropäische Region würde ohne menschliches Eingreifen eine beinahe geschlossene Walddecke aufweisen. Ursprünglich, ohne anthropogenen Einfluss waldfrei sind lokal nur solche Standorte zu betrachten, die für Waldwuchs zu trocken, zu nass oder zu salzreich sind wie subkontinentale Trockenrasen, Dünen, Felsbereiche, Steinschutthalden, Lawinenbahnen, nährstoffarme Moore, Verlandungszonen der Binnenseen, Salzwiesen oder Schwermetall-Fluren (vgl. Frey & Lösch, 2014, S. 448 ff).

Serpentin-Trockenrasen sind natürlich waldfreie Gebiete. Serpentinrasen kommen natürlich bedingt auf gehölzfreien oder -armen Flächen auf Waldlichtungen, Schuttfluren und Felsen oder an anthropogen geschaffenen Sonderstandorten wie an Steinbrüchen und

Geländeanrissen, die beim Forstbau entstehen. Meist treten sie eng verzahnt bzw. eingebettet im Serpentin-Rot-Föhrenwald auf (vgl. Dillinger, 2014, S. 5–6). Die natürlich waldfreie Vegetation und die Ausbildung von Serpentin-Steppen bzw. Serpentin-Trockenrasen müssen auf den Faktoren wie erhöhte Trockenheit, Schwermetallgehalte, Nährstoffarmut oder Flachgründigkeit begründen. Gemeint sind jene Parameter, welche das Serpentin-Syndrom generieren.

Dominiert werden die Trockenrasen auf nährstoffarmen, flachgründigen, steinigen bis felsigen Böden an meist sehr steilen Stellen wie jene im Burgenland von schmalblättrigen Gräsern (Poaceae) wie Eigentlicher-Aufsteige-Wiesenhafer (*Avenula adsurgens subsp. adsurgens*), Eigentlicher Bleich-Schwingel (*Festuca pallens subsp. pallens*), Erd-Segge (*Carex humilis*) (Naturschutzbund Burgenland, o. J.-b), Gewöhnlicher Schaf-Schwingel (*Festuca guestphalica*) oder das stark gefährdete Kelchgras (*Danthonia alpina*). Ausschließlich auf Trockenrasen über Serpentin zu finden ist zum Beispiel die Serpentin-Kammschmiele (*Koeleria pyramidata subsp. pubiculmis*) (vgl. Fischer u. a., 2008, S. 1180). Neben vielen weiteren typischen Serpentinrasenarten ist auf den Serpentin-Trockenrasen des Burgenlands auch der burgenländische Endemit Serpentin-Steppen-Aschenkraut (*Tephroseris integrifolia subsp. serpentina*, vgl. 3.3.18) anzutreffen (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 16–19).

Eine Zusammenstellung über charakteristische Pflanzenarten, welche die Phytozönose der Krautschicht von Schwermetallfluren und Serpentinrasen kennzeichnen, bietet eine Publikation des österreichischen Bundesumweltamtes aus dem Jahr 2005, welche im Kontext der Beurteilung des Erhaltungszustandes der Natura-2000-Schutzgüter entstanden ist (Ellmauer & Essl, 2005, S. 167). Diese Veröffentlichung enthält eine Liste mit 20 Arten, welche den Lebensraumtyp Schwermetallfluren und Serpentinrasen charakterisieren und welche geeignet sind, die Vollständigkeit des Lebensraumtyps festzustellen (Ergänzung der Trivialnamen anhand von Fischer u. a., 2008):

Preissmann-Berg-Steinkraut (*Alyssum montanum* var. *preissmannii*, vgl. 3.3.1), Wulfen-Steinkraut (*Alyssum wulfenianum*), Sand-Grasnelke (*Armeria elongata*), Grünsputz-Streifenfarn (*Asplenium adulterinum*), Serpentin-Streifenfarn (*Asplenium cuneifolium*, vgl. 3.3.3), Eigentlicher Aufsteigender-Wiesenhafer (*Avenula adsurgens* ssp. *adsurgens*),

Pannonien-Trespe (*Bromus pannonicus*), Serpentin-Karthäuser-Nelke (*Dianthus carhusianorum* ssp. *capillifrons*, vgl. 3.3.6), Eggler-Schaf-Schwingel (*Festuca eggleri*), Norische Witwenblume (*Knautia norica*), Gewöhnliche Wiesen-Kammschmiele (*Koeleria pyramidata* var. *pubiculmis*), Schmalblatt-Vergissmeinnicht (*Myosotis stenophylla*), Europa-Pelzfarn (*Notholaena marantae*, vgl. 3.3.13), Alpen-Knöterich (*Persicaria alpina*), Serpentin-Crantz-Fingerkraut (*Potentilla crantzii* ssp. *serpentini*, vgl. 3.3.14), Serpentin-Hauswurz (*Sempervivum pittonii*, vgl. 3.3.16), Schutt-Blasen-Leimkraut (*Silene vulgaris* ssp. *glareosa*, vgl. 3.3.17), Serpentin-Steppen-Aschenkraut (*Tephroseris serpentini*, vgl. 3.3.18), Gösing-Täschelkraut (*Noccaea goesingensis*, vgl. 3.3.12), Raibler Rundblatt-Täschelkraut (*Noccaea rotundifolia* ssp. *cepaeifolia*).

Die Liste der mit Schwermetallböden assoziierten Charakterarten führt Taxa an, welche Schwermetallfluren im Allgemeinen und Serpentinrasen im Besonderen kennzeichnen. Eine Übersicht über verschiedene Schwermetallstandorte im Ostalpenraum findet sich unter Anhang C: Liste Serpentinstandorte im Ostalpenraum. Während der Großteil der angeführten Taxa charakteristische fakultative oder obligate Serpentin-taxa darstellen (*Alyssum montanum* var. *preissmannii*, *Armeria elongata*, *Asplenium adulterinum*, *Asplenium cuneifolium*, *Avenula adsurgens* ssp. *adsurgens*, *Dianthus carhusianorum* ssp. *capillifrons*, *Festuca eggleri*, *Knautia norica*, *Koeleria pyramidata* var. *pubiculmis*, *Myosotis stenophylla*, *Notholaena marantae*, *Persicaria alpina*, *Potentilla crantzii* ssp. *serpentini*, *Sempervivum pittonii*, *Silene vulgaris* ssp. *glareosa*, *Tephroseris serpentini*, *Noccaea goesingensis*, überprüft anhand Fischer u. a., 2008; Justin, 1993) weist die Liste nur zwei Arten auf, welche keine Populationen über Serpentin, sondern auf anderen Schwermetallstandorten aufweisen. Die Taxa, welche in der Regel nicht mit Serpentin assoziiert sind, sind das sehr seltene Kärntner Wulfen-Steinkraut (*Alyssum wulfenianum*) und der Lokalendemit und Galmeizeiger der südöstlichen Alpen Raibler Rundblatt-Täschelkraut (*Noccaea rotundifolia* ssp. *cepaeifolia*).

3.1.3. Serpentin-Felsspaltenfluren

Ein weiterer für Serpentinstandorte charakteristischer Lebensraum sind die Serpentin-Felsspalten und ihre Felsspaltengesellschaften. Diese sind sowohl auf Serpentinrasen wie auch

in serpentinen Waldgebieten auf aus dem Untergrund hervorragenden Felsblöcken zu finden. Verschiedene Streifenfarn-Arten (*Asplenium* sp.), Mauerpfeffer-Arten (*Sedum* sp.), der Kurzhaar-Donarsbart (*Jovibarba globifera* subsp. *hirta*, vgl. 3.3.11) und der Berg-Lauch (*Allium lusitanicum*) prägen als typische Vertreter serpentine Felsspaltengesellschaften (vgl. Dillinger, 2014, S. 5; vgl. Michalek u. a., 2015, S. 17).

Am Serpentinstandort im Gurhofgraben bei Melk zeigt sich die seltene Serpentin-Felsspaltengesellschaft Notholaeno-Sempervivetum (Serpentin-Strichfarn-Flur), an welchen Besonderheiten wie der Serpentin-Streifenfarn (*Asplenium cuneifolium*, vgl. 3.3.3) und der Europa-Pelzfarn (*Notholaena marantae*, vgl. 3.3.13) auftreten (vgl. Lanius, 2016). Die den Serpentin-Felsspaltentfluren angehörigen Pflanzengesellschaft Notholaeno-Sempervivetum hirti (Serpentin-Strichfarn-Flur) weist als dominierende Kennart den Europa-Pelzfarn (*Notholaena marantae*) aus. Dominante und konstante Begleitarten sind Kurzhaar-Donarsbart (*Jovibarba globifera* subsp. *hirta*, vgl. 3.3.11), Serpentin-Streifenfarn (*Asplenium cuneifolium*, vgl. 3.3.3), Bleich-Schaf-Schwingel (*Festuca pallens*), Weiß-Mauerpfeffer (*Sedum album*) und Serpentin-Hauswurz (*Sempervivum pittonii*, vgl. 3.3.16). Nachgewiesen bzw. beschrieben wurde diese spezifische Felsspaltengesellschaft neben dem Gurhofgraben in der Gemeinde Dunkelsteinerwald bei Melk (Niederösterreich) auch in der Gulsen und in der Umgebung von Kirchdorf in der Steiermark (vgl. Grabherr & Mucina, 1993, S. 266–267)

Weitere serpentine Biotope, welche wie Serpentin-Rot-Föhrenwald, Serpentin-Trockenrasen und Serpentin-Felsspaltentfluren als dem Biotoptypus Serpentinstandort angehörende Subtypen kategorisiert und analysiert werden könnten, sind zum Beispiel Steinbrüche, Wegränder oder serpentine Tümpel und Lacken, an welchen zum Beispiel der stark gefährdete Serpentin-Endemit Balkan-Ehrenpreis (*Veronica scardica*) nachgewiesen werden kann (vgl. Dillinger, 2014, S. 6). Die bestehende Heterogenität des Biotoptypus Serpentinstandort über Serpentin wird wie anhand der Beispiele und der vorangestellten Erläuterungen dargestellt auch im Vergleich der österreichischen Serpentinstandorte evident. Als Vegetationsmosaik aus Rot-Föhrenwäldern, Zwergstraucharten, Trockenrasen und Felsspaltengesellschaften mit Reliktpflanzen und Lokalendemiten (vgl. Holzner u. a., 1989, S. 206) repräsentieren Serpentinstandorte vielfältige Lebensräume, welche unter anderem auch als Habitat für viele

seltene Pflanzenarten die Biodiversität in erheblichem Maße erhöhen. Daher muss es sich auch aus naturschutzkundlicher Perspektive um einen besonders erhaltens- und schützenswerten Biotoptypus handeln. Im folgenden Kapitel soll daher der naturschutzkundliche Status von Serpentinstandorten beleuchtet werden.

3.2. Schutz der Lebensräume

Serpentinstandorte kommen nur sehr selten vor und weisen aufgrund der extremen Standortsbedingungen seltene, hochangepasste, serpentinresistente Pflanzenarten auf. Forstwirtschaft, Steinbrüche, Bergbau, Beweidung, Aufforstung oder Verbuschung gefährden Serpentinstandorte und damit den Lebensraum der darin vorkommenden Taxa (vgl. Dillinger, 2014, S. 21). Obwohl Serpentinrasen dem FFH-Lebensraumtyp Schwermetallrasen (*Violetalia calaminariae*) mit dem FFH-Code 6130 entsprechen, wiesen Serpentinstandorte laut einer Publikation aus dem Jahr 1989 zu dieser Zeit vielfach keinen Schutzstatus auf (vgl. Holzner u. a., 1989, S. 206; s. auch Michalek u. a., 2015, S. 16). Unter FFH ist die Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (Pflanzen, Tiere und Lebensraum) zu verstehen, deren Vorgaben gemeinsam mit jener der Vogelschutzrichtlinie als Basis zur Etablierung und Sicherung von Europaschutzgebieten bzw. Natura 2000 Schutzgebieten innerhalb der Europäischen Union dienen. Als Natura 2000 Gebiete werden demnach europaweit Schutzgebiete bezeichnet, welche auf Maßnahmen der Europäischen Union mit dem Ziel, ein europaweites Schutzgebietsnetz zum Schutz natürlicher Lebensräume und zum Erhalt der biologischen Vielfalt, fundieren (vgl. Energie- & Umweltagentur NÖ, o. J.-c; vgl. Umweltbundesamt GmbH, o. J.). Im Folgenden soll der Schutzstatus der drei Gebiete Österreichs mit dem größten Serpentin-Vorkommen untersucht werden.

3.2.1. Serpentinstandorte im Bernsteiner und Günser Bergland im Burgenland

Das Bernsteiner und Günser Bergland im Südburgenland weist das größte Serpentin-Vorkommen Österreichs auf. Das Gebiet zeigt geologische Fenster der Rechnitzer Einheit, welche wie zum Beispiel auch die Hohen Tauern dem Penninikum⁵³ angehört, das, eigentlich kilometertief unter den Alpen liegend, im Zuge der Alpenaufspaltung an manchen

⁵³ **Penninikum:** Geologische Einheit der Alpen. Die Penninische Zone entspricht den zentralen Trögen der Alpen. Dies waren die tiefen Sedimentationsräume mit ozeanischer Kruste, die sich im Jura und in der Unterkreide zwischen der europäischen und der afrikanischen Platte entwickelt hatten. Im Zuge der Orogenese wurden die Sedimentgesteine eine zentrale Einheit der Alpen. Es handelt sich um mehrere Kilometer mächtige monotone Abfolgen von Tonen, Mergeln und feinsandigen Kalken, die durch die alpidische Metamorphose zu Kalkphylliten mit glimmer-glänzenden Schieferungsflächen umgewandelt wurden. Weitere typische Gesteine der Penninischen Zone sind unter anderem Ophiolithe, die als Reste der ozeanischen Kruste gedeutet werden (vgl. Lexikon der Geowissenschaften, o. J.).

Stellen an die Oberfläche rückte. Mit dem Rechnitzer Fenster und dem Bernsteiner Fenster wie auch mit den Serpentinorkommen bei Redlschag und am Kienberg durchbrechen an diesen Standorten alte, marine Ablagerungen das vergleichsweise junge Sedimentgestein (vgl. Michalek u. a., 2015, S. 8–9; vgl. Weinzettl, 2010, S. 50).

Serpentin-Gebiete und das Vorkommen von Serpentinpflanzen sind in den Gemeinden Bernstein, Unterkohlstätten und Weiden bei Rechnitz auf 74 Flächen von rund 216 ha bestätigt (vgl. Dillinger, 2014, S. 5). Die Serpentinstandorte im Gebiet rund um Bernstein gehören sowohl dem Natura 2000 Gebiet „Bernstein-Lockenhaus-Rechnitz“ als auch dem Landschaftsschutzgebiet „Bernstein, Lockenhaus, Rechnitz“ an. Als Landschaftsschutzgebiete werden Gebiete definiert, die sich durch besondere landschaftliche Vielfalt, Eigenart und Schönheit auszeichnen, die für die Erholung der Bevölkerung und dem Tourismus besondere Bedeutung haben oder die historisch oder archäologisch bedeutsame Landschaftsteile umfassen. Das ca. 25 000 ha umfassende Areal von Landschaftsschutzgebiet und Natura 2000-Gebiet entsprechen einander weitgehend. Weiters grenzt an Bernstein der staatsgrenzenüberschreitende Naturpark „Geschriebenstein – Irrotkö“ im Günser Gebirge an. Alle drei Schutzgebiete charakterisieren vegetationsarme Hügelkuppen, die von einem locker bestandenen Wald umgeben sind. Es handelt sich um hochgelegene Wärmeinseln, welche Serpentin als Ausgangsgestein haben. Infolge der sehr reichen Serpentinorkommen zeigt das Bernsteiner Bergland großflächig natürliche Rot-Föhrenwälder, die sich an steinig und flachgründigen Standorten zu Felsfluren und Trockenrasen auflichten (vgl. Amt der Burgenländischen Landesregierung, o. J.-a, vgl. o. J.-b, vgl. o. J.-c; vgl. Naturpark Geschriebenstein, o. J.; vgl. Naturschutzbund Burgenland, o. J.-h).

Ergebnisse von Untersuchungen, die im Jahr 2014 präsentiert wurden, weisen 41 fakultative und obligate Serpentin-Taxa im Serpentinebiet um Bernstein nach, von welchen 17 Arten burgenland- und österreichweit als gefährdet gelten. Es zeigte sich, dass jedoch keine der aufgelisteten Arten nach der Fauna-Flora-Habitatrichtlinie unter Schutz gestellt ist, wiewohl die Serpentinrasen dem FFH-Lebensraumtyp 6130 Schwermetallrasen entsprechen (vgl. Dillinger, 2014, S. 5). Als botanische Beispiele für an südburgenländischen Serpentinstandorten vorkommende Serpentin-taxa können exemplarisch Serpentin-Karthäuser-Nelke (*Dianthus carthusianorum* subsp. *capillifrons*), Serpentin-Crantz-Fingerkraut

(*Potentilla crantzii* var. *serpentina*), der in Felsspalten wurzelnde Serpentin-Streifenfarn (*Asplenium cuneifolium*), das Gösing-Täschelkraut (*Noccaea goesingensis*) oder das Serpentin-Steppen-Aschenkraut (*Tephroseris integrifolia* subsp. *serpentina*) angeführt werden (vgl. Weinzettl, 2010, S. 51).

Besondere Aufmerksamkeit zuteil wurde den Serpentinegebieten im Südburgenland im Rahmen des LEADER-Projekts „Serpentinstandorte im Südburgenland“, welches über den Naturschutzbund Burgenland durchgeführt wurde. Übergeordnetes Ziel des Projekts war die langfristige Sicherung der reichstrukturierten Kulturlandschaft, der Artenvielfalt bzw. Diversität der Serpentinstandorte im Burgenland durch Erarbeitung von Schutz und Erhaltungsmaßnahmen. Bewusstseinsbildung, Information und Sensibilisierung der Bevölkerung standen ebenso im Fokus. Erarbeitet wurden daher unterschiedliche Informationsangebote wie die Anbringung von Schautafeln entlang von Wanderwegen, die Produktion von Informationsfoldern, Wanderungen, Führungen und begleitete Touren für Erwachsene und Kinder zum Thema Serpentinstandort, die Veröffentlichung von Publikationen, die verstärkte Positionierung der Gemeinde Bernstein als Zentrum der Edelserpentinbearbeitung Europas, etc., welche die ökologische und naturschutzkundliche Bedeutung des Serpentinegebiets als öko- und naturtouristische Besonderheit der Region vermarkten (vgl. Michalek u. a., 2015; vgl. Naturschutzbund Burgenland, o. J.-e). Basierend auf diesen Maßnahmen und Angeboten können zum einen Wissen über die Besonderheit des Standorts und seiner naturschutzkundlichen Bedeutung einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden und zum anderen naturschutzfachliche Anliegen gestärkt und umgesetzt werden.

3.2.2. Serpentinstandorte im Gurhofgraben bei Melk in Niederösterreich

Der Gurhofgraben bei Melk liegt südlich der Donau in der Gemeinde Dunkelsteinerwald zwischen Aggsbach an der Donau und Kicking in 320 bis 500m Seehöhe. Er ist Teil des Dunkelsteiner Waldes, einem Höhenzug zwischen Melk und Krems, welcher von der Donau entlang eines Einbruchsbeckens durchschnitten der Böhmisches Masse, der ältesten

Gebirgslandschaft Österreichs, angehört und hauptsächlich aus feinkörnigem Granit⁵⁴ aufgebaut ist. Die Böhmisches Masse stellte ursprünglich das nördlichste Teilstück des ehemaligen Großkontinents Gondwana⁵⁵ dar, das sich von Gondwana löste, anschließend nach Norden driftete und sich im Zuge von Deckenüberschiebungen und regionalmetamorphen Überprägungen der variszischen Gebirgsbildung zu Österreichs ältestem Gebirge entfaltete. Die Böhmisches Masse erstreckt sich über das Wald- und Mühlviertel nach Bayern bis nach Sachsen und Schlesien. Südlich der Donau baut sie den Saualpe in Oberösterreich und den Dunkelsteiner Wald im Süden der Wachau auf. Die Böhmisches Masse repräsentiert einen tiefen, ursprünglich nicht an der Oberfläche sichtbaren Kern des variszischen Gebirges. Im Zuge der variszischen Entwicklungen wurden unter hohem Druck und unter hohen Temperaturen Granulite⁵⁶ gebildet (vgl. Geologische Bundesanstalt, 2002, S. 11–13 u. 35–37). Die zwei größten Vorkommen von Serpentin im Gurhofgraben befinden sich innerhalb des Dunkelsteiner Granulitmassives (vgl. Lanius, 2016).

Bereits 1979 wurde eine Fläche von 1,8 ha des Gurhofgrabens unter Naturschutz gestellt und 2008 um jene 5,5 ha erweitert, welche im Besitz des Vereins Lanius, der Forschungsgemeinschaft für regionale Faunistik und angewandten Naturschutz, ist. Neben dem Verein Lanius ist auch der Naturschutzbund Niederösterreich im Besitz von Serpentinflächen im Gurhofgraben. Aktuell umfasst die Größe des Naturschutzgebiets Gurhofgraben 7,3 ha auf süd-, südwest- und nordwestexponierten Serpentinrocken und Hangwaldflächen. Ausgewiesen wird der Gurhofgraben im österreichischen Trockenrasenkatalog als Standort sehr seltener Arten mit nationaler Bedeutung und seit 1991 auch als Biogenetisches Reservat⁵⁷ des Europarates. Der Gurhofgraben gehört dem Natura 2000 Gebiet „Wachau-Jauerling“ und dem Landschaftsschutzgebiet „Wachau und Umgebung“ an. Das Europaschutzgebiet Wachau-Jauerling wurden 2009 nach der Vogelschutz-Richtlinie

⁵⁴ **Granit:** saures, körniges Tiefengestein, Hauptgemengteile sind Quarz, Feldspat und Glimmer (Geologische Bundesanstalt, 2002, S. 55).

⁵⁵ **Gondwana:** ehemalige Großkontinent, in dem die alten Kerne des heutigen Südamerika, Afrika, Indien, Australien und der Antarktis vereinigt waren (Geologische Bundesanstalt, 2002, S. 55)

⁵⁶ **Granulit:** metamorphes Gestein, unter hohen Druck- und besonders hohen Temperaturbedingungen durch relativ „trockene“ (wasserarme) Mineralreaktionen gebildet (vgl. Geologische Bundesanstalt, 2002, S. 55)

⁵⁷ **Biogenetisches Reservat:** Das europaweite Netzwerk der Biogenetischen Reservate wurde 1976 vom Europarat geschaffen. In Österreich wurden 1988 die ersten Biogenetischen Reservate ausgewiesen. Das Netzwerk Biogenetischer Reservate dient zur Erhaltung einer repräsentativen Auswahl von Lebensräumen, Pflanzen- und Tierarten Europas. Es wurde keine eigene Schutzgebietskategorie geschaffen, die Gebiete wurden aus bereits bestehenden Schutzgebieten ausgewählt (Umweltbundesamt GmbH, o. J.).

und 2011 entsprechend den FFH Richtlinien gegründet. Lichter Rot-Föhrenwald an Felshängen mit Rasensteppen und Felsfluren im Unterwuchs charakterisieren dieses Gebiet über Serpentin. Vorderstes Schutzziel ist die Erhaltung der Serpentin-Trockenrasen, der Serpentin-Strichfarn-Fluren sowie des Serpentin-Rot-Föhrenwaldes. Um die Entwicklung naturnaher Waldbestände mit natürlichen, standortangepassten Baumartenmischungen zu fördern, mussten Maßnahmen wie Schlägerungen von Fichten und Robinien durchgeführt werden (vgl. ARGE Dunkelsteinerwald, o. J.; vgl. Energie- & Umweltagentur NÖ, o. J.-a, vgl. o. J.-b; vgl. Grabner, 2015, S. 14; vgl. Lanius, 2016; vgl. Naturschutzbund Niederösterreich, o. J.).

Von den bisher 136 Pflanzenarten, welche im Gurhofgraben zu finden sind, stehen 24 auf den Roten Listen. Darin begründet sich auch die Anführung des Gurhofgrabens im Österreichischen Trockenrasenkatalog als Standort sehr seltener Arten mit nationaler Bedeutung. Als besondere floristische Raritäten sind Serpentin-Streifenfarn (*Asplenium cuneifolium*, vgl. 3.3.2) mit Gefährdungsstufe 3 entsprechend Roter Liste (gefährdet), Europa-Pelzfarn (*Notholaena marantae*, vgl. 3.3.13) mit Gefährdungsstufe 2 laut Roter Liste (stark gefährdet), Schmalblatt-Vergissmeinnicht (*Myosotis stenophylla*) mit Gefährdungsstufe 3 laut Roter Liste, Kerner Brillenschötchen (*Biscutella laevigata* subsp. *kernerii*) mit Gefährdungsstufe 3 entsprechend Roter Liste und Tauben-Skabiose (*Scabiosa columbaria*) mit Gefährdungsstufe 3 entsprechend Roter Liste zu nennen. Während unter Geologen und Botanikern der Standort für seine floristischen und botanischen Besonderheiten einen Namen hat, zeigt er sich der breiten Öffentlichkeit wenig bekannt. Informationszentren, eine Gebietsbeschreibung oder Hinweise auf der Gemeindehomepage, Wanderwege, Schautafeln oder Einrichtungen, welche Bewusstseinsbildung, Sensibilisierungsarbeit oder sanften Ökotourismus fördern würden, fehlen (vgl. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, 2015; vgl. Lanius, 2016).

Nachdem das Serpentinegebiet im Gurhofgraben bei Melk mit dem Verein Lanius und dem Naturschutzbund Niederösterreich eine Betreuung durch zwei etablierte und anerkannte Naturschutzorganisationen aufweist und das Areal auf mehreren Ebenen (FFH, Biogenetisches Reservat, Österreichischer Trockenrasenkatalog, etc.) Schutzstatus genießt und daher entsprechenden Richtlinien und Managementplänen zum Schutz des Lebensraums unterliegt,

scheint das Gebiet als entsprechend umfassend, nachhaltig und von naturschutzfachlicher Expertise begleitet gesichert zu sein.

3.2.3. Serpentinstandorte bei Kraubath in der Steiermark

Die Marktgemeinde Kraubath an der Mur im Bezirk Murtal in der Steiermark hat Anteil an einem Serpentinzug, welcher mit einer Länge von 13 km und einer Breite von 2 km sich vom Raumberg bei Feistritz beginnend über den Gulsenberg, weiter über den Au-, Winter- und Sommergraben hin zum Nissenberg östlich des Tanzmeistergrabens erstreckt und im Bereich des Matzlerberges und Schrakogels in der Vorderlainsach endet (vgl. Marktgemeinde Kraubath, o. J.). Aus geologischer Perspektive gehören die Felshänge der Gulsen der unteren Gleinalpenschieferhülle an. Das Areal, welches mit dem Serpentingebiet am stärksten assoziiert wird, ist jenes der Gulsen. Die Gulsen am Gulsenberg, welcher nordöstlich von Knittelfeld und südlich von Kraubath an der Mur liegt, zeigt zur Mur abfallende, steile, schwer zugängliche Hänge auf Serpentinboden, deren oberen Hangbereiche als Standorte naturnahen Zustands erhalten sind. Im unteren Hangbereich befinden sich Rot-Föhrenwälder mit für Serpentinstandorte spezifischen Kraut- und Strauchschichten, während die oberen Hanglagen von Zwergsträuchern, Trockenrasen und Fels-(Spalten)-Vegetation charakterisiert sind (vgl. Amt der Steiermärkischen Landesregierung, o. J.-b; vgl. Marktgemeinde Kraubath, o. J.).

Am Gulsenberg wurden 1990 zwei abgetrennte Flächen auf 700 - 999 m Seehöhe als Naturschutzgebiete ausgewiesen (vgl. RIS Bundeskanzleramt Österreich, o. J.), welche folgendermaßen beschrieben wurden:

„[...] Das nährstoffarme, kalkarme Silikatgestein und der daraus entstehende flachgründige Boden sowie die Neigung und die Südexposition bewirken zusammen mit dem stark sonnenexponierten Lokalklima die Ausbildung einer Xerotherm-Vegetation. Dabei handelt es sich um Reliktgesellschaften mit einzelnen endemischen Arten, die in den wärmebegünstigten Trockenrasen und Kiefernwäldern vorkommen. Die 2 Pflanzen- und Tierschutzgebiete liegen am Mittelhang und Unterhang der Gulsen. [...]“ (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, o. J.-a)

Im Jahr 2006 wurden die beiden Naturschutzgebiete am Gulsen Teil des steiermärkischen Europaschutzgebiets Nr. 5 mit dem Namen „Ober- und Mittellauf der Mur mit Puxer Auwald,

Puxer Wand und Gulsen“. Das gesamte Natura 2000 Gebiet erstreckt sich über die Bezirke Murau, Murtal und Leoben und über zahlreiche Gemeinden hinweg auf einer Fläche von 1307,6 ha (vgl. Amt der Steiermärkischen Landesregierung, o. J.; vgl. Marktgemeinde Kraubath, o. J.). Als floristische Besonderheiten sind der Serpentin-Streifenfarn (*Asplenium cuneifolium*, vgl. 3.3.2), der Europa-Pelzfarn (*Notholaena marantae*, vgl. 3.3.13) die Sand-Grasnelke (*Armeria elongata*) und insbesondere der steiermärkische Serpentin-Endemit und daher nur an diesem Standort vorkommende Serpentin-Hauswurz (*Sempervivum pittonii*, vgl. 3.3.16) anzuführen. Weiters kennzeichnen unter anderem der Zwergstrauch Heide-Ginster (*Genista pilosa*, vgl. 3.3.10), Serpentin-Karthäuser-Nelke (*Dianthus carthusianorum* subsp. *capillifrons*, vgl. 3.3.6), Grünspeitz-Streifenfarn (*Asplenium adulterinum*), Seidenhaar-Backenkle (*Dorycnium germanicum*, vgl. 3.3.8) oder Schmalblatt-Vergissmeinnicht (*Myosotis stenophylla*) die serpentine Vegetation (vgl. Amt der Steiermärkischen Landesregierung, o. J.; vgl. Marktgemeinde Kraubath, o. J.).

Das Serpentinegebiet rund um Kraubath befindet sich aufgrund seiner Zugehörigkeit zum Europaschutzgebiet „Ober- und Mittellauf der Mur mit Puxer Auwald, Puxer Wand und Gulsen“ in entsprechender naturschutzfachkundiger Betreuung. In Bezug auf die Betreuung und Öffentlichkeitsarbeit liegt die Sensibilisierungsarbeit und Bewusstseinsbildung in den Händen der zuständigen öffentlichen Gebietskörperschaften wie Marktgemeinde Kraubath an der Mur und dem Amt der Steiermärkischen Landesregierung mit ihrer Fachabteilung 13C Naturschutz. Die Gemeinde Kraubath an der Mur widmet auf ihrer Homepage einen ausführlichen Bereich dem Serpentinivorkommen in der Gulsen. Ein Informationsfolder zum Europaschutzgebiet, herausgegeben vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung, präsentiert die Schwermetallrasen der Gulsen und der Puxer Wand und ihre charakteristischen Serpentinophyten (vgl. Amt der Steiermärkischen Landesregierung, o. J.). Während entsprechender Schutzstatus nachgewiesen werden konnte, lassen die Recherchen Rückschlüsse auf mögliche öko- oder naturtouristische Projekte nicht zu. Dies könnte unter anderem möglicherweise auch auf das mit seinen steilen Hängen als mehrfach sehr unwegsames Gelände beschriebene Gebiet zurückzuführen sein, in welchem sich der Serpentinstandort in der Gulsen befindet.

3.3. Serpentinophyten der Serpentin-Schaugruppe im Porträt

Lebensräume, welche auf Serpentin als Ausgangsgestein fundieren, weisen infolge spezifischer abiotischer Voraussetzungen ein Paradigma an außergewöhnlichen bzw. extremen Standortsbedingungen auf. Zusammengefasst werden die Bedingungen, welche sich an Serpentinstandorten summieren und diesen Sonderstandort charakterisieren, u.a. unter dem Begriff „Serpentinphänomen“ oder „Serpentinsyndrom“. Die Flora von Serpentinegebieten kennzeichnet eine hochangepasste Pflanzenwelt, die eine Vielzahl an evolutiv ausgebildeten Mechanismen aufweisen, anhand welcher die Taxa mit Faktoren wie einem niedrigen Ca:Mg-Quotienten, Nährstoffmangel, Wassermangel, Trockenheit und insbesondere mit den erhöhten Schwermetallgehalten im Boden umgehen können.

Der Botanische Garten der Universität Wien präsentiert mit der Gruppe 47 eine Auswahl an Serpentinophyten aus unterschiedlichsten Familien, die an österreichischen Serpentinstandorten vorkommen. Im Folgenden werden nun 20 von aktuell 30 in der Serpentin-Schaugruppe präsentierten Taxa in Form von Pflanzenporträts vorgestellt. Darunter befinden sich neben den diesen Biotoptypus fakultativ besiedelnden Arten auch jene, deren Lebensraum ausschließlich, somit obligat bzw. serpentin-endemisch, Serpentinstandorte darstellen. Intention hinter der Entwicklung der Pflanzenporträts ist deren Einsatz als Schautafeln im Botanischen Garten. Die getroffene Auswahl der 20 beschriebenen Taxa aus der Schaugruppe kann als willkürlich gewählt betrachtet werden. In Bezug auf die Auflistung werden diese unabhängig von Systematik, Vorkommen im Biotoptypus oder anderen weiteren möglichen Ordnungsprinzipien sondern entsprechend ihres lateinischen Namens in alphabetischer Reihenfolge angeführt.

In Bezug auf die in den Pflanzenporträts verwendeten lateinischen Artbezeichnungen und die deutschen Trivialnamen entsprechen diese, sofern das jeweilige Quellenverzeichnis je Porträt keine anderen Rückschlüsse zulässt, dem nomenklatorischen Konzept, welches in der aktuellen Auflage der österreichischen Standardflora zur Bestimmung und Beschreibung von Pflanzenarten, der Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol von Fischer, Oswald und Adler in der 3. Auflage aus dem Jahr 2008, präsentiert wird. Mit Verweis auf Kapitel „2.4.3 Taxonomische Herausforderungen“ möge darauf aufmerksam gemacht sein,

dass neuere Ergebnisse, die auf Forschungen (wie beispielsweise molekularbiologischen Untersuchungen) nach Publikation der aktuellen Ausgabe beruhen und folglich zu taxonomischen Überarbeitungen, Neustrukturierungen der Systematiken und Neubenennungen geführt haben könnten, sich in der 3. Auflage aus dem Jahr 2008 nicht widerspiegeln.

Die optische Gestaltung sowie die Formatierung der Pflanzenporträts orientieren sich an einer vom Botanischen Garten zur Verfügung gestellten Vorlage. In Orientierung am Muster und mit der Intention, den Einsatz im Botanischen Garten ohne weitere arbeitsaufwendige Korrekturen zu ermöglichen, begründet sich auch die in diesem Abschnitt fehlende Seitenzahl als auch die Integration eines Literatur- und Bildquellenverzeichnisses je Pflanzenporträt. Bildquellen werden mit Bezug auf Urheberrecht auch im Abbildungsverzeichnis angeführt. Die alphabetische Reihenfolge und die von der Vorlage abweichende ergänzte Nummerierung des jeweiligen Taxons soll ein am Inhaltsverzeichnis dieser Arbeit orientiertes, rasches Auffinden des jeweilig gewünschten Pflanzenporträts unterstützen.

Preissmann-Berg-Steinkraut

3.3.1. *Alyssum montanum* var. *preissmannii*

Als **Preissmann-Berg-Steinkraut** (*Alyssum montanum* var. *preissmannii*), benannt nach dem bedeutenden botanischen Sammler und steirischen Lokalfloristen Ernest Preissmann (1844-1928), werden die *Alyssum montanum*-Populationen der Serpentinstandorte bei Kraubath in der Steiermark bezeichnet. Systematisch betrachtet ist jedoch die Abgrenzung vom Gewöhnlichen Berg-Steinkraut (*Alyssum montanum* subsp. *montanum*) wie auch vom Sand-Berg-Steinkraut (*Alyssum montanum* subsp. *gmelinii*) nicht geklärt und daher als kritisch zu betrachten. Die Gattung Steinkraut ist ein Taxon aus der Familie der Kreuzblütler (Brassicaceae).

Standort im Garten: Gruppe 47.

Vorkommen

Über Serpentin bei Kraubath in der Steiermark.

Taxonomie

Die taxonomische Einordnung der Populationen auf Serpentin ist nicht geklärt. Das Taxon *Alyssum montanum* var. *preissmannii* (vgl. Fischer u. a., 2008, S. 645) wurde und wird tlw. auch als Unterart *subsp. preissmannii* behandelt (vgl. Wendelberger, 1974, S. 20–22). Es fehlen Nachweise, inwiefern das Taxon *A. m.* var. *preissmannii* von der Nominatart *A. m. subsp. montanum* abzugrenzen ist. Die taxonomisch kritische Stellung spiegeln auch Floren wie „Catalogue of Life“ und „The Plant List“: The Plant List führt *A. m.* var. *preissmannii* mit dem Vermerk „unresolved name“ an, der Catalogue of Life beschreibt *Alyssum preissmannii* entsprechend der Beschreibung nach Hayek auf Artrang als Synonym für eine weitere Berg-Steinkraut-Unterart, nämlich für das in NÖ und im osteurop. Raum verbreitete Sand-Berg-Steinkraut (*A. m.* subsp. *gmelinii*). Somit zeigt sich, dass die systematische Unterteilung der Art *Alyssum montanum* grundsätzlich überprüft werden muss. Mit der Benennung der Berg-Steinkraut-Vorkommen auf Serpentinstandorten als *Alyssum montanum* var. *preissmannii* werden die Populationen über Serpentinegestein vorerst von anderen *Alyssum montanum*-



Unterarten abgegrenzt. Für eine fundierte Systematisierung sind weitere Forschungsarbeiten notwendig.

Abbildung 5: Gewöhnliches Berg-Steinkraut (*Alyssum montanum* subsp. *montanum*) (Botanik im Bild, 2005c)

Botanische Merkmale

Es handelt sich um ausdauernde Stauden, die am Grund mehr oder weniger verholzen können. Die Pflanze wird (5)10 – 20 cm hoch und bevorzugt basische Böden. Laubblätter: Das Taxon besitzt graugrüne Laubblätter; auf der Laubblattunterseite und am Stängel Sternhaare mit mehr als 10 Strahlen, womit sternförmig ausgebildete Trichome (Haare) gemeint sind (selten verkahlend). Die Haare schützen vor Austrocknung. Blüte: Die Kronblätter erscheinen goldgelb. Blütezeit: (März) April bis Mai; Blütenstand: Traube; Früchte annähernd kreisrunde und mit dichten Sternhaaren besetzte Schötchen. P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; http://www.biographien.ac.at/oeb1/oeb1_P/Preissmann_Ernest_1844_1928.xml [05.05.2016]; WENDELBERGER, G. (1974). Die Serpentinpflanzenvorkommen des Burgenlandes in ihrer pflanzengeographischen Stellung. Naturwissenschaften 1974, Heft 53, 5–20.; <http://www.theplantlist.org> [05.05.2016]; <http://www.catalogueoflife.org/col/details/species/id/d1aa82145618ed47117f1cfba5bf8c39/synonym/826d62f5ecf07fbd8c6ad2b29fae5c15> [05.05.2016] **BILDER:** <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Alyssum-montanum-mon.htm> [12.04.2016] Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Sand-Schaumkresse

3.3.2. *Arabidopsis arenosa*

Die Sand-Schaumkresse ist eine zwei- oder mehrjährige (ausdauernde) Art aus der Familie der Kreuzblütler (Brassicaceae). Als Pionierpflanze besiedelt das Taxon auch vegetationsfreie Flächen wie Steinschutt-Fluren, Felsspalten oder Bahnanlagen.

Standort im Garten: Gruppe 47.

Taxonomie

Als Synonym für *Arabidopsis arenosa* führt Bestimmungsliteratur wie die Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (2008) die Artbezeichnung *Cardaminopsis arenosa* an. In der Gattung *Arabidopsis* werden Schaumkressen- und Schmalwand-Arten vereinigt.

Vorkommen

Häufig bis zerstreut ist die Sand-Schaumkresse in allen Bundesländern in Österreich anzutreffen. Als natürliche Habitate sind Forstwegböschungen, Dämme, Uferböschungen, Mauern, Waldschläge (Brandstellen) bis hin zu Bahnanlagen möglich. Sie stellt geringe Bodenansprüche: Zu finden auf mäßig frischen-trockenen, basenreichen, oft kalkhaltigen, humus- und feinerdearmen, lockeren Stein- und Sandböden. Außerdem ist sie als fakultativer Serpentinophyt über Serpentinittgestein zu finden. Das Vorkommen auf in der Regel schwermetallhaltigen, nährstoffarmen und trockenen Serpentinböden unterstreicht die Bandbreite an ökologischen Bedingungen, mit welchen das Taxon umgehen kann.

Botanische Merkmale

Kennzeichen der Sand-Schaumkresse ist ihre Variabilität und ihr Formenreichtum im Aussehen. Stängel behaart. Pflanze bildet im Unterschied zu nahen Verwandten keine Ausläufer.



Abbildung 6: Sand-Schaumkresse (*Arabidopsis arenosa*) (Botanik im Bild, 2005b)

Laubblätter: Stängelblätter lineal-lanzettlich, Grundblätter fiederspaltig bis fiederteilig (mit jederseits 1-6 Fliederblättchen oder Zähnen) und aufgrund von einfachen Gabelhaaren rau.

Blüte: Kronblätter weiß bis hell-purpurn und 6-8(9) mm lang. Die Bestäubung erfolgt durch Insekten. Blütezeit: IV – VIII; Frucht: bildet Schoten aus;

Die Pflanze erreicht eine Höhe von 15 – 40cm.

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; OBERDORFER, E. (2001). Pflanzensoziologische Exkursionsflora (8. Auflage). Stuttgart: Eugen Ulmer; <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Cardaminopsis-arenosa.htm> [18.04.2016]; <http://www.theplantlist.org/tpl1.1/record/kew-2645201> [18.04.2016]

BILDER: <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Cardaminopsis-arenosa.htm> [18.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Serpentin-Streifenfarn

3.3.3. *Asplenium cuneifolium*



Der Serpentin-Streifenfarn gehört zur Familie der Streifenfarngewächse (Aspleniaceae) und stellt die namensgebende Art und Charakterart für Serpentinfarngesellschaften dar, die auf Serpentin-Felsspalten und Felsfluren zu finden sind. Während zahlreiche Taxa der Serpentinfluren auch auf nicht-serpentinigen Böden wachsen können (fakultative Serpentinophyten), ist der Serpentin-Streifenfarn ausschließlich über Serpentin zu finden. Als eine der wenigen obligaten Serpentinophyten kann Serpentin-Streifenfarn als Serpentin-Zeigerpflanze bezeichnet werden.

Abbildung 7: Serpentin-Streifenfarn (*Asplenium cuneifolium*) (Naturschutzbund Burgenland, o. J.-c)

Standort im Garten: Gruppe 47.

Vorkommen

Kommt ausschließlich an Serpentinstandorten (NÖ, B, St., S.) vor. Zwar erscheint er lokal häufig, da es jedoch nur sehr wenige Serpentinstandorte gibt, gilt er als gefährdet.

Serpentinstandorte charakterisieren u.a. ihre erhöhten Temperaturbedingungen und die verringerte Wasserhaltekapazität. Durchaus erstaunlich scheint es, dass sich ein phylogenetisch sehr ursprüngliches Taxon wie ein Farngewächs, dessen Verwandte in der Regel schattige und feuchte Standorte bevorzugt und zum Beispiel auch im Zuge der sexuellen Fortpflanzung von Wasser abhängig sind, in diesem vergleichsweise trockenen, nährstoffarmen und schwermetallhaltigen Lebensraum etablieren konnte.

Botanische Merkmale

Die Blätter sind mehrfach fiederteilig und breitreieckig, der Blattstiel ist am Grund verdickt. Die Blattzähne sind stumpf oder spitz, selten zugespitzt, aber nicht stachelspitzig und in der

Regel gerade ausgerichtet (nicht eingekrümmt); die Wedel erscheinen meist glanzlos oder nur schwach glänzend;

Der Serpentin-Streifenfarn erreicht eine Höhe von 10-45 cm. Blütezeit: VII – X



Abbildung 8: Wedel des Serpentin-Streifenfarns (*Asplenium cuneifolium*) (Botanik im Bild, 2005a)

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; <http://burgenlandflora.at/pflanzengesellschaft/asplenion-serpentin/> [13.04.2016]; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/asplenium-cuneifolium/> [13.04.2016]

BILDER: <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Asplenium-cuneifolium.htm> [13.04.2016]; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/asplenium-cuneifolium/> [13.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Wald-Glockenblume / Pfirsichblatt-Glockenblume

3.3.4. *Campanula persicifolia*

Die Wald-Glockenblume kommt häufig bis zerstreut in allen Bundesländern Österreichs vor. Sie gehört zur Familie der Glockenblumengewächse (Campanulaceae). Als fakultativer Serpentinophyt wächst sie auch auf Serpentinböden.

Standort im Garten: Gruppe 47.

Vorkommen

Campanula persicifolia bevorzugt sonnige bis halbschattige Standorte. Neben den Serpentinstandorten findet man *Campanula persicifolia* in frischen bis trockenen Edellaubwäldern, an Waldrändern und Waldwiesen. Ihr großes Verbreitungsgebiet und insbesondere auch ihr Vorkommen am Sonderstandort Serpentinboden weisen darauf hin, dass die Art mit einem breiten Spektrum an ökologischen Bedingungen umgehen kann und niedrige Standortansprüche stellt. Die Art gilt als nicht gefährdet. Ein indigenes, also ureinheimisches zur ursprünglichen, natürlichen Flora gehörendes Taxon. Die Pflanze findet ihre Verwendung auch als Zierpflanze und als Schnittblume.



Abbildung 9: *Campanula persicifolia* (Botanik im Bild, 2002)

Botanische Merkmale

Als Hemikryptophyt bildet die Pflanze ihre Überdauerungsknospen in unmittelbarer Nähe
Rennweg 14, A-1030 Wien; www.botanik.univie.ac.at/hbv/

der Bodenoberfläche und kann bei günstigen Bedingungen rasch austreiben, sie bildet unterirdische Ausläufer. Die Pflanze erreicht eine Höhe von 30 – 80 cm.

Laubblätter: Die Pflanze erscheint fast kahl; Die Laubblätter sind derb gestaltet, oberseits dunkelgrün; Grundblatt wintergrün (wintergrün: nicht wesentlich länger als 1 Vegetationsperiode lang lebend aber grün überwintert); Grundblätter und untere Stängelblätter meist verkehrt-eilanzettlich (eilanzettlich = eiförmig lanzettlich: lanzettförmig aber unterhalb der Mitte am breitesten), in den Laubblattstiel verschmälert; die mittleren und oberen Stängelblätter erscheinen lineal-lanzettlich bis linealisch (linealisch: mit annähernd parallelen Rändern, jedoch mehr als etwa 6x so lang wie breit).

Blüte: Blütenstand: Traube mit 3 bis 8 Blüten (selten Blütenstand verzweigt und dann bis zu 15blütig); Blütezeit: VI – VIII(X); Krone 3-5 cm lang; Kronblätter breit-glockig bis schüsselförmig in (lila)blau;

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; FISCHER, M. A. & FALLY, J. (2006). Pflanzenführer Burgenland. Deutschkreutz: J. Fally Eigenverlag; JÄGER, E. J., EBEL, F., HANELT, P. & MÜLLER, G. (Hrsg.). (2008). Rothmaler Exkursionsflora von Deutschland. Krautige Zier- und Nutzpflanzen (Bd. 5). Berlin Heidelberg: Springer Spektrum; <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Campanula-persicifolia.htm> [15.04.2016]; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/campanula-persicifolia/> [15.04.2016]

BILDER: <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Campanula-persicifolia.htm> [15.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Alpen-Zyklame

3.3.5. *Cyclamen purpurascens*

Die Alpen-Zyklame, auch als Alpenveilchen, Erdscheibe oder Erdbrot bezeichnet, aus der Familie der Myrsinengewächse iwS (Myrsinaceae s. lat.), ist eine Knollenpflanze, die mit Ausnahme von Osttirol häufig bis zerstreut in ganz Österreich auftritt. Verwendung findet die Knolle der Pflanze als Heilpflanze in der Volksarzneimedin und in der Homöopathie.

Standort im Garten: Gruppe 47.

Vorkommen

Zu finden ist *Cyclamen purpurascens* vor allem im Unterwuchs, zwischen Felsspalten und Baumwurzeln basenreicher Edellaubwälder und in Föhrenwäldern auf montaner Höhenstufe, tlw. auch submontan oder subalpin verbreitet. Im westlichen Alpengebiet (Vorarlberg, Tirol, Salzburg) ist die Art als gefährdet eingestuft. Ein fakultativer Serpentinophyt, der mit den Bedingungen über Serpentinogestein umgehen kann. Als Zierpflanze wird das Taxon auch in Steingärten gepflanzt.

Botanische Merkmale

Es handelt sich um einen Dunkelkeimer und Geophyten. Bei Geophyten werden die Überdauerungsorgane während der Vegetationsruhe im Boden verborgen und dadurch besonders gut geschützt. Charakteristisch weist die Alpen-Zyklame eine rundum bewurzelte Knolle auf.

Laubblätter: Die kreis- bis herzförmigen Laubblätter zeigen obererseits eine weißliche Zeichnung und untererseits eine dunkelpurpurne Färbung. Es handelt sich um eine immergrüne Pflanze, bei der das Absterben und der Neutrieb der Laubblätter mehr oder weniger zeitgleich passieren. Die Laubblätter ähneln jenen der Haselwurz (*Asarum sp.*), jedoch sind deren Laubblätter unterseits grün und oberseits nicht gezeichnet.

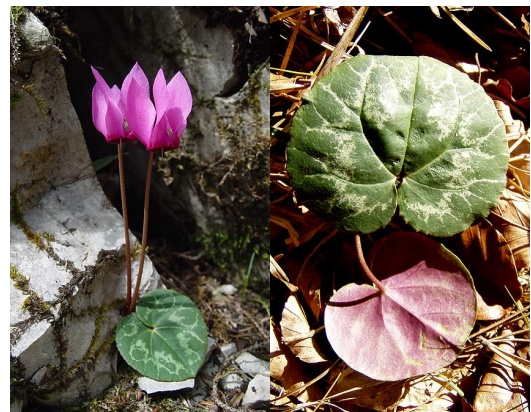


Abbildung 10: Alpen-Zyklame (*Cyclamen purpurascens*) und im Vergleich die Oberseite und Unterseite der Laubblätter (Botanik im Bild, 2008b)

Blüte: Die Blüten sind stark duftend und zeigen eine purpurne Farbe; Die Kronzipfel sind ca. 15-30 mm lang, der Kronschlund weist einen Durchmesser von 6-10 mm auf, die Griffel überragen die Krone um 1 mm. Ein Sommer- und Herbstblüher mit einer Blütezeit von VII-X.

Die Pflanze wird 5-15 cm hoch und ist giftig.

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; JÄGER, E. J., EBEL, F., HANELT, P. & MÜLLER, G. (Hrsg.). (2008). Rothmaler Exkursionsflora von Deutschland. Krautige Zier- und Nutzpflanzen (Bd. 5). Berlin Heidelberg: Springer Spektrum; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/cyclamen-purpurascens/> [18.04.2016];

BILDER: <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Cyclamen-purpurascens.htm> [18.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Serpentin-Karthäuser-Nelke

3.3.6. *Dianthus carthusianorum* subsp. *capillifrons*

Charakteristisches Kennzeichen vieler Taxa auf Serpentinböden ist die Ausbildung von Serpentinomorphosen, welche entweder genetisch oder modifikativ bedingt sind. Beispielhafte Serpentinomorphosen sind der Nanismus, worunter Zwergwuchs bis hin zu Kümmerwuchs zu verstehen ist und die Stenophyllie. Das Merkmal der Stenophyllie (griech. stenós = schmal, eng) bedeutet die Ausbildung von sehr schmalen, lanzettförmigen bis hin zu fadenförmigen Blättern. Die Serpentin-Karthäuser-Nelke aus der Familie der Nelkengewächse (Caryophyllaceae) weist im Vergleich mit anderen Karthäuser-Nelken-Sippen besonders schmale Laubblätter auf und erscheint zarter und kleiner.

Standort im Garten: Gruppe 47.

Blütenstand: 2-8 blütig, Blütezeit: V–IX.

Vorkommen

Die Serpentin-Karthäuser-Nelke ist als obligater Serpentinophyt auf Magerrasen (nährstoffarme, gehölzfreie Gesellschaften mit nicht allzu hoher Vegetation) über Serpentin zu finden.

Die Kronblätter, bestehend aus Platte und Nagel, haben die Farbe hellpurpur, die Außenkelchblätter sind ledrig und braun.



Abbildung 11: *Dianthus carthusianorum* subsp. *capillifrons*, Redtschlag-Wenzelanger (Bez. Oberwart) (Naturschutzbund Burgenland, o. J.-d).



Abbildung 12: Blütenstand einer Serpentin-Karthäuser-Nelke (Botanik im Bild, 2005f)

Botanische Merkmale

Diese Serpentinrasse der Karthäuser-Nelke hat besonders schmale, nur 1–1,5 mm breite Laubblätter (Serpentinomorphose Stenophyllie). Die Außenkelchblätter sind gestutzt bis ausgerandet (d. h. leicht eingekerbt) und lang begrannt. Wuchshöhe: 20–50 cm.

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/dianthus-carthusianorum-subsp-capillifrons/> [13.04.2016]

BILDER: <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/dianthus-carthusianorum-subsp-capillifrons/> [13.04.2016] <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Dianthus-carthusianorum-cap.htm> [13.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Großblütiger Fingerhut / Groß-Fingerhut

3.3.7. *Digitalis grandiflora*

Der Großblütige Fingerhut (*Digitalis grandiflora*) ist mit einer Höhe von 60 – 100 cm und mit seiner glockig-bauchigen Krone eine auffällig blühende ausdauernde Staude halbschattiger Standorte wie zum Beispiel nährstoff- und basenreiche lichte Wälder, Waldschläge und Waldränder. Ebenso ist die Art an sonnigen Böschungen und auf Steinhalden sowie als fakultativer Serpentinophyt über Serpentinittgestein zu finden.

Standort im Garten: Gruppe 47.

Taxonomie

Die systematische Einordnung von *Digitalis grandiflora* in die Familie der Wegerichgewächse im weiteren Sinn (Plantaginaceae sensu lato) mag mit Blick auf den Habitus bzw. phänetisch betrachtet ungewöhnlich erscheinen. Bis vor kurzem war das Taxon der Familie der Löwenmaulgewächse (Antirrhinaceae) zugeteilt. Seit der Entwicklung von molekulargenetischen Untersuchungsmethoden können die in den Systematiken sich spiegelnden Verwandtschaftsgrade auf genetischer Ebene überprüft werden. Dies führte und führt auch aktuell in zahlreichen Fällen dazu, dass Systematiken zur phylogenetischen Einteilung der Pflanzen auf unterschiedlichsten Hierarchieebenen neu strukturiert werden müssen. So wurden neuerdings auf Basis molekulargenetischer Ergebnisse phänetisch sehr unterschiedliche Familien wie die Antirrhinaceae (Löwenmaulgewächse), Globulariaceae (Kugelblumengewächse), Hippuridaceae (Tannenwedelgewächse), Callitrichaceae (Wassersterngewächse) und Plantaginaceae (Wegerichgewächse i.e.S.) in der Familie der Wegerichgewächse i.w.S. (Plantaginaceae s. lat.) vereinigt. Nach aktueller Systematik gehört *Digitalis grandiflora* somit zur Tribus der Fingerhutförmigen (Digitalideae) aus der Unterfamilie der Fingerhutähnlichen (Digitalidoideae), welche der Familie der Wegerichgewächse i.w.S. (Plantaginaceae) angehört.

Vorkommen

Kommt häufig bis selten in allen Bundesländern vor, in den Kalkalpen häufig. Ihre Verwendung findet die mäßig giftige Pflanze als Rarität auch in Naturgärten und Staudenbeeten. Eine im nördlichen Alpenvorland und im Pannonikum als gefährdet (Gefährdungsstufe 3 der Roten Liste) eingestufte Art.



Abbildung 13: *Digitalis grandiflora* (Botanik im Bild, 2006a)

Botanische Merkmale

Ein Hemikryptophyt; Blüte: Krone glockig-bauchig in hellgelb, 30-40 mm lang und mit einem Durchmesser von 15-20 mm, innen braun geädert und nicht bärtig; Kronunterlippe viel kürzer als die Kronröhre; in Blüte: VI-VII(VIII).

Laubblätter: Laubblätter sind wie der Stängel unterseits behaart

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; JÄGER, E. J., EBEL, F., HANELT, P. & MÜLLER, G. (Hrsg.). (2008). Rothmaler Exkursionsflora von Deutschland. Krautige Zier- und Nutzpflanzen (Bd. 5). Berlin Heidelberg: Springer
<http://burgenlandflora.at/pflanzenart/digitalis-grandiflora/> [17.04.2016]; **BILDER:** <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Digitalis-grandiflora.htm> [17.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Seidenhaar-Backenkee

3.3.8. *Dorycnium germanicum*

Beim Seidenhaar-Backenkee handelt es sich um einen fakultativen Serpentinophyten aus der Familie der Schmetterlingsblütler (Fabaceae), welcher auf (Halb-) Trockenrasen und in Föhrenwäldern vorkommt. Der Trivialname weist auf die seidig behaarten Fiederblättchen hin.

Standort im Garten: Gruppe 47.

Vorkommen

Der Seidenhaar-Backenkee ist besonders häufig in pannonischen Rasensteppen des nördlichen Burgenlands anzutreffen, während die Art im Rest Österreichs nur selten vorkommt. Im Rheintal, im nördlichen Alpenvorland und im Voral südöstlich der Alpen als gefährdet eingestuft.

Taxonomie

Die Gattung *Dorycnium* (Backenkee) ist mit der Gattung *Lotus* (Hornkee) so nahe verwandt, dass sie manchmal nur als deren Untergattung oder Sektion eingestuft wird.

Botanische Merkmale

Die Gattung Backenkee (*Dorycnium sp.*) kennzeichnen u.a. eine sehr lange, verholzte Pfahlwurzel und Flügel (vgl. Blüten), die eine Aufwölbung aufweisen. Diese Aufwölbung wird auch als „Backe“ bezeichnet und verleiht der Gattung ihren Trivialnamen. Stängel am Grund mehr oder weniger verholzt.

Laubblätter: 5-zählige Fiederblätter; die Blättchen der Fiederblätter erscheinen anliegend, kurz und seidig behaart, grau (oft verkahlend). Die mittleren Blättchen haben eine schmallanzettliche Form.



Abbildung 15: Blüte des Seidenhaar-Backenkees (Botanik im Bild, 2011b)

Blüte: Blütenmorphologisch zeigen alle Fabaceae die für diese Gattung typische fünfzählige Schmetterlingsblüte. Diese besteht aus Fahne (oberstes, größtes Kronblatt), den beiden kleineren seitlichen Flügeln (gebildet von den beiden seitlichen Kronblättern) und dem Schiffchen (bezeichnet die beiden unteren, meist miteinander zusammenhängenden Kronblätter), das die Staubblätter und den Stempel umhüllt. Krone ist weiß bis rosa mit einem 6-14blütigen Blütenstand, jedoch nicht oder nur kaum duftend. Die Spitze der Schiffchen sind violett-schwarz, Kelch lang anliegend und seidenhaarig. Blütezeit: VII-VIII.

Das Taxon wird durchschnittlich 10-30 cm hoch. Es handelt sich um einen ausdauernden Hemikryptophyten.

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; FISCHER, M. A. & FALLY, J. (2006). Pflanzenführer Burgenland. Deutschkreutz: J. Fally Eigenverlag; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/dorycnium-germanicum/> [19.04.2016]

BILDER: <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Dorycnium-germanicum.htm> [19.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.



Abbildung 14: *Dorycnium germanicum* (Botanik im Bild, 2011b)

Österreich-Labkraut

3.3.9. *Galium austriacum*

Das Österreich-Labkraut ist eine Pflanzenart aus der Familie der Kaffeeengewächse (Rubiaceae), die als fakultativer Serpentinophyt über Serpentin, aber auch über Kalk und Dolomit vorkommt. Taxa aus der sehr großen Familie der Kaffeeengewächse sind weltweit verbreitet. Ihren ursprünglichen Verbreitungsschwerpunkt haben Rubiaceae in tropischen bis warm-temperierten Gebieten. In Österreich kommen ausschließlich Taxa der Tribus Krappförmige (Rubieae) vor. Als Tribus wird die Rangstufe zwischen Unterfamilie und Gattung bezeichnet. Der Tribus Rubieae gehören weltweit 12 Gattungen und 800-1000 Arten an. Die globale Expansion der Rubieae, dessen Taxa im Zuge evolutiver Prozesse unterschiedlichste Habitate von Gewässern bis Wüsten in Tiefland bis über die Schneegrenze erfolgreich besiedelten, verleiht der Tribus der Krappförmigen das Potential, als Modell für Evolution bzw. Diversität und Diversifikation zu dienen.

Standort im Garten: Gruppe 47.

Blütenstand mit langen Seitenästen; Blütezeit: VI-VIII.

Vorkommen

Das Österreich-Labkraut (*Galium austriacum*) wächst über Kalk, Dolomit und Serpentin auf Trockenrasen, in Schwarz-Föhrenwäldern und über Felsschutt. Zerstreut bis selten verteilt kommt es auf collin bis montaner Höhenstufe ausschließlich im ostalpisch-karpatischen Raum (Burgenland, Wien, Niederösterreich, Unterkärnten) vor.

Botanische Merkmale

Ein ausdauernder Hemikryptophyt. Die Pflanze erreicht eine Höhe von 12-30 cm. Der Stängel weist am Grund oft eine rote Färbung auf.

Laubblätter: spitze, linealische Laubblätter, die quirlständig angeordnet sind (an jedem Knoten entspringen mehrere Laubblätter, die Blätter des nächsten Knotens stehen auf Lücke)

Blüte: Krone mehr oder weniger flach bzw. radförmig, weiße Kronblätter; kurzer, breit-pyramidenförmiger bzw. schirmförmiger



Abbildung 16: Österreich-Labkraut (*Galium austriacum*) (Botanik im Bild, 2011a)

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; <http://www.oeaw.ac.at/kioes/prob/200709.htm> [19.04.2016];

BILDER: <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Galium-austriacum.htm> [19.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Heide-Ginster / Sand-Ginster / Haar-Ginster

3.3.10. *Genista pilosa*

Bei *Genista pilosa* handelt es sich um einen niederliegenden, verholzenden Zwergstrauch aus der Familie der Schmetterlingsblütler (Fabaceae). Als Magerzeiger markiert er nährstoffarme Standorte. Blütenmorphologisch kennzeichnet den Heide-Ginster die Krümmung der beiden Flügel der Fabaceenblüte, wodurch das für die Art charakteristische „Nasenloch“ entsteht.

Standort im Garten: Gruppe 47.

Vorkommen

Genista pilosa ist collin bis subalpin auf trockenen Magerwiesen, Trockenrasen und Felssteppen, in Föhrenwäldern und mageren und bodensauren Wäldern zu finden. Als fakultativer Serpentinophyt auch über schwermetallhaltigem, zur Austrocknung neigendem und nährstoffarmem Serpentin-Gestein. Im pannonischen Gebiet tritt das Taxon häufig auf, ansonsten zerstreut bis selten in Wien, Burgenland, Niederösterreich, Oberösterreich, in der Steiermark und in Unterkärnten.

Botanische Merkmale

Ein ausdauernder, verholzender, Chameophyt, der eine Höhe von nur 5-20(30) cm erreicht.



Abbildung 17: *Genista pilosa* (Botanik im Bild, 2011)

Laubblätter: Das Taxon weist einfache (aus nur einem Blättchen bestehende), (4)6-13(15) mm lange, schmal-elliptische bis schmal-verkehrteiförmige Laubblätter auf. In der Jugend sind die Laubblätter seidenhaarig bedeckt, obererseits verkahlen die Laubblätter später und sind dunkelgrün.

Blüte: Die gelbe Krone ist außen seidig behaart und hat 8-10 mm lange Flügel, die sich bogig krümmen und dem Schiffchen nicht anliegen. Folglich entsteht beiderseits des Schiffchens je ein Loch, das auch als „Nasenloch“ bezeichnet wird. Ein gutes Erkennungsmerkmal für die Art. Blütezeit: IV-V.



Abbildung 18: Blüte *Genista pilosa* (Botanik im Bild, 2011)

Die Frucht ist wie die jungen Laubblätter und Kronblätter mit Seidenhaaren besetzt. Als „seidig behaart“ wird eine dichte Behaarung bezeichnet, die aus feinen, oft in einer Richtung anliegenden, mehr oder weniger silbrig glänzenden Trichomen besteht.

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/genista-pilosa/> [22.04.2016]

BILDER: <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Genista-pilosa.htm> [22.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich

Kurzhaar-Donarsbart / Kurzhaarige Kugel-Fransenhauswurz

3.3.11. *Jovibarba globifera* subsp. *hirta*

Benannt nach dem germanischen Gewittergott Donar, handelt es sich beim Kurzhaar-Donarsbart um eine blattsukkulente, ausdauernde Rosetten-Pflanze aus der Familie der Dickblattgewächse (Crassulaceae). Sukkulenz ist für die Pflanzen an Serpentinstandorten von Vorteil, um die für diese Standorte charakteristischen längeren, trockenen, heißen Perioden und den daraus resultierenden Wassermangel zu überstehen.

Standort im Garten: Gruppe 47

Vorkommen

Der in Österreich zerstreut bis selten vorkommende Kurzhaar-Donarsbart bevorzugt trockene Felsfluren und lückige, u.a. auch kalkreiche, Trockenrasen. An Serpentin-Standorten ist er daher ein Vertreter der serpentin Felsspaltenvegetationen.

Taxonomie

Die Gattung *Jovibarba* wird von manchen Systematikern als Sektion (sectio, taxonomische Einordnung zwischen Gattung und Art) der Gattung Hauswurz (*Sempervivum*) eingeordnet und daher als *Sempervivum* sect. *Jovibarba* bezeichnet. Der taxonomische Status von *Jovibarba globifera* subsp. *hirta* ist nicht eindeutig geklärt. In Bezug auf die Benennung bestehen neben *Jovibarba globifera* subsp. *hirta* mehrere Synonyme, die auf die wechselnden Zuordnungen auf Art- und Gattungsebene hinweisen: *Jovibarba hirta*, *Jovibarba hirta* subsp. *hirta*, *Sempervivum hirtum*, *Sempervivum adenophorum*, *Diopogon hirtus*. Die zahlreichen taxonomischen Korrekturen spiegeln sich zum Beispiel in Floren wie dem „Catalogue of Life“, welcher 29 Synonyme für *Jovibarba globifera* subsp. *hirta* anführt, wider.



Abbildung 19: *Jovibarba globifera* subsp. *hirta* in Kultur (Botanik im Bild, 2010a)



Abbildung 20: Drüsenhaare an den Blüten von *Jovibarba globifera* subsp. *hirta* (Botanik im Bild, 2010a)

Botanische Merkmale

Jovibarba globifera subsp. *hirta* erreicht eine Höhe von 10-30 cm. **Laubblätter:** Die fleischigen Rosettenblätter, oft mit rötlicher Spitze, sind in oder unter der Mitte am breitesten, die oberen Stängelblätter sind an den Flächen mit Drüsenhaaren besetzt;

Blüte: Sternförmig ausgebreitete Kronblätter; Kelch, Krone, Staubfäden (Filamente) und Fruchtknoten drüsenhaarig. Jede Rosette blüht nur ein einziges Mal.

P. Pumpler 2016

LITERATUR:

FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; JÄGER, E. J., EBEL, F., HANELT, P. & MÜLLER, G. (Hrsg.). (2008). Rothmaler Exkursionsflora von Deutschland. Krautige Zier- und Nutzpflanzen (Bd. Band 5). Berlin Heidelberg: Springer Spektrum; FISCHER, M. A. & FALLY, J. (2006). Pflanzenführer Burgenland. Deutschkreutz: J. Fally Eigenverlag; MICHALEK, K., DILLINGER, B., HÖTTINGER, H. & STAUFER, M. (2015). Serpentinstandorte im Südburgenland - Erhebung, Management, Schutz und Öffentlichkeitsarbeit. Eisenstadt: Naturschutzbund Burgenland; http://www.botanik.univie.ac.at/hbv/download/ib_sempervivum_aberglaube.pdf [14.04.2016]; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/jovibarba-globifera-subsp-hirta-2/> [14.04.2016]; www.sagen.at [14.04.2016]; <http://www.catalogueoflife.org> [14.04.2016]

BILDER: <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Jovibarba-globifera-hirta.htm> [14.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Gösing-Täschelkraut

3.3.12. *Noccaea goesingensis*

Benannt wurde das Gösing-Täschelkraut nach dem Berg Gösing bei Ternitz. Es handelt sich um ausdauernde Halbrosettenpflanzen aus der Familie der Kreuzblütler (Brassicaceae). Ein besonders charakteristisches Merkmal von Serpentinböden sind deren erhöhte Schwermetallgehalte. Während Schwermetalle als Spurenelemente für die optimale Entwicklung benötigt werden, wirken diese ab bestimmten Konzentrationen toxisch. Serpentinophyten kennzeichnen verschiedene physiologische Mechanismen wie zum Beispiel Akkumulation (Schwermetallanreicherung in Pflanzenteilen), Hyperakkumulation (speichern mehr als die 100fache Menge als andere Pflanzen) oder Exklusion (vermindert die Innenaufnahme bzw. unterbindet den Transport von der Wurzel zu den Trieben). Als Hyperakkumulator ist das Gösing-Täschelkraut in der Lage, Zink und Kupfer in den Zellen der Blattepidermis anzureichern und so an schwermetallbelasteten Serpentinstandorten zu überleben.

Standort im Garten: Gruppe 47.

Vorkommen

Ein fakultativer Serpentinophyt, zu finden an Serpentinstandorten im Burgenland und in der Steiermark und über Dolomitgestein (z.B. am Berg Gösing in NÖ). Dolomit enthält Magnesium, das auch für Serpentin charakteristisch ist. Häufig in lichten Föhrenwäldern oder an steinigem Abhängen. Hauptverbreitung auf Balkanhalbinsel (illyrische Art).



Abbildung 21: *Noccaea goesingensis* (Naturschutzbund Burgenland, o. J.-f)

Hyperakkumulation

Die Anreicherung von Schwermetallen in den Zellen von Trieben und Blättern bietet auch evolutive Vorteile. Schwermetalle unterstützen z.B. die osmotische Regulation und erhöhen somit die Toleranz gegenüber Trockenheit.

Weiters werden durch die Schwermetallanreicherung Resistenzen gegenüber Krankheitserregern gestärkt und der Schutz vor Herbivoren (Fraßschutz) erhöht.

Botanische Merkmale

20-50 cm hoch, Blüte mit weißer Krone, Kelch grünlich bis weißlich; Blütezeit: IV-V; bildet Schötchen-Früchte, die im Unterschied zum Hirtentäschel einen dünnen, leicht aufgebogenen Rand haben, der keine Samen enthält. Die löffelförmige Gestalt dieser geflügelten Schötchen bewirkt, dass sie wie Turbinenschaufeln Regentropfen auffangen, wodurch beim Aufprall die Samen weggeschleudert werden („Regentropfenballisten“).

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; FISCHER, M. A. (2010). Lebensraum Serpentinfluren. In Naturjuwelen im Burgenland: Steppen, Salz und Streuobstwiesen (S. 212–216). Eisenstadt: Amt der Burgenländ. Landesregierung; WENZEL, W. & JOCKWER, F. (1999). Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralised soils of the Austrian Alps. Environmental Pollution, 1999, Vol. 104(1), pp.145-155.

BILDER: <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/noccaea-goesingense/> [15.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Europa-Pelzfarn

3.3.13. *Notholaena marantae*

Der Europa-Pelzfarn (*Notholaena marantae*) aus der Familie der Saumfarngewächse (Pteridaceae) ist in Österreich der einzige Vertreter seiner Gattung und ausschließlich auf den seltenen Standorten über Serpentinegestein zu finden. Als besonders charakteristisch erweist sich das Taxon in Bezug auf die Widerstandsfähigkeit gegen Austrocknung, welche an trockenen Serpentinstandorten von Vorteil ist.

Standort im Garten: Gruppe 47.

Vorkommen

Tritt an sonnigen Standorten meist auf steilen Felsspalten und auf Felsfluren auf. Während sich sein Verbreitungsgebiet in Österreich (Niederösterreich – Gurhofgraben im Dunkelsteinerwald bei Melk, Steiermark – Gulsen bei Kraubath) auf Serpentinergestein beschränkt, gibt es in Südtirol zerstreute Bestände über Porphyry und auf Silikatgestein. Die Vorkommen im Gurhofgraben bei Melk sind als nördlichste Vorposten des ansonsten südeuropäisch verbreiteten Farns zu betrachten. Die Vorkommen im Südburgenland (im Gebiet von Glashütten) sind infolge einer Steinbruch-Erweiterung vollkommen erloschen. Die Gattung Pelzfarn ist in Mitteleuropa eine besondere Rarität und kommt ansonsten im äthiopischen Bergland und im Himalaya vor. Aufgrund der selten vorkommenden Serpentinstandorte eine stark gefährdete Art.



Abbildung 22: Europa-Pelzfarn (*Notholaena marantae*) (Botanik im Bild, 2009)

Botanische Merkmale

Es handelt sich um einen kleinwüchsigen, kalkmeidenden, ausdauernden

Hemikryptophyten, der eine Höhe von 4-35 cm erreicht. Die Blattspreite ist im Umriss länglich bis eiförmig. Die Fiedern sind flach ausgebildet, aber zeigen einen zurückgerollten Rand. Die Blattunterseite des Europa-Pelzfarns ist dicht ziegeldachig mit hellbraunen Schuppen besetzt. Die Sori und die Sporangien werden erst zur Reifezeit zw. den Spreuschuppen sichtbar. Die letzten Blattabschnitte sind länglich-rechteckig und abgerundet.

Blütezeit: VI – VII. Die Art ist gegenüber Austrocknung sehr widerstandsfähig.



Abbildung 23: Blattunterseite des Europa-Pelzfarns (Botanik im Bild, 2009)

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; BRAUN-BLANQUET, J. (1964). Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde (3. neubearb. Auflage). Wien: Springer Verlag; GRABNER, B. (2015). Naturschutzgebiet Gurhofgraben. Serpentinflora und Böhmischer Granat. Natur & Land, Heft 3, S. 14; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/notholaena-marantae/> [21.04.2016]; <http://noe-naturschutzbund.at/PDF/Nbunt/NB%20Gurhofgraben%2003%202015.pdf> [21.04.2016]; <http://www.kraubath.at/die-gulsen/> [21.04.2016]; **BILDER:** <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Notholaena-marantae.htm> [21.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Serpentin-Crantz-Fingerkraut

3.3.14. *Potentilla crantzii* var. *serpentina*

Das Serpentin-Crantz-Fingerkraut aus der Familie der Rosengewächse (Rosaceae) kommt über Serpentinegestein im montanen Bereich rund um Bernstein im Burgenland vor. Nachdem bis dato keine Vorkommen des Crantz-Fingerkrauts in anderen Serpentinegebieten wie in Niederösterreich und in der Steiermark nachgewiesen wurden, handelt es sich entsprechend aktueller Kenntnisse um einen seltenen, aus naturschutzkundlicher Perspektive besonders erhaltens- und schützenswerten burgenländischen Endemiten. Jedoch ist die systematische Stellung der Sippe nicht sicher geklärt, wodurch der Status als Burgenland-Endemit wieder verloren gehen könnte.

Standort im Garten: Gruppe 47

Vorkommen

Das Serpentin-Crantz-Fingerkraut tritt im südburgenländischen Serpentinegebiet um Bernstein über Felsen, Magerrasen und Gesteinsfluren auf. Stark gefährdet.

Taxonomie

Die Rangstufe der Varietät (varietas) wird oft zur Bezeichnung von Populationen verwendet, die sich durch sehr wenige, zwar oft auffallende, aber taxonomisch minderwertige Merkmale hervortun. Der taxonomische Wert für *Potentilla crantzii* var. *serpentina* wird aktuell als „problematisch“ bezeichnet, da unzureichend bewiesen ist, ob die spezifischen botanischen Merkmale der Pflanzen über Serpentinität genetisch fixiert sind oder ob diese lediglich Modifikationen/Varianten/Morphotypen der Nominatart *Potentilla crantzii* var. *crantzii* darstellen. Diese ist in den Kalkalpen verbreitet. Von weiteren Erkenntnissen zur Biologie und zu den Verwandtschaftsverhältnissen der Serpentinpflanze ist es auch abhängig, ob es sich um einen obligaten oder fakultativen Serpentinophyten handelt.

Botanische Merkmale

Es handelt sich um einen ausdauernden Hemikryptophyten, welcher eine Höhe von 5-15 cm erreicht. Stängel aufrecht-abstehend behaart

bzw. zottig. Charakteristisches Unterscheidungsmerkmal zu *Potentilla crantzii* var. *crantzii* sind die dichten Drüsenhaare mit sitzenden Drüsen.



Abbildung 24: *Potentilla crantzii* var. *serpentina* (Serpentin-Crantz-Fingerkraut) (Naturschutzbund Burgenland, o. J.-g)

Laubblätter: nichtblühende Triebe sind am Grund 2-zeilig beblättert; die Nebenblätter der Grundblätter sind eiförmig oder breitlanzettlich, Laubblattbasen fächerartig; Endzahn der Blättchen nur wenig kleiner als die übrigen;
Blüte: Kronblätter ein bis zwei Mal so lang wie die Kelchblätter, ausgerandet, goldgelb, am Grund dunkelgelb bis orange. Blütezeit: V-VI.

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; FISCHER, M. A. & FALLY, J. (2006). Pflanzenführer Burgenland. Deutschkreutz: J. Fally Eigenverlag; <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Potentilla-crantzii.htm> [22.04.2016]

BILDER: <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/potentilla-crantzii-var-serpentina/> [22.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Scharf-Mauerpfeffer

3.3.15. *Sedum acre*

Der Scharf-Mauerpfeffer (*Sedum acre*) gehört zur Familie der Dickblattgewächse (Crassulaceae). Es handelt sich um eine Sukkulente, die ihren Namen deshalb erhalten hat, weil nach einigen Minuten bzw. nach mehrmaligem Kauen der Laubblätter ein sehr scharfer Geschmack wahrgenommen werden kann. Diese Art hat der ganzen Gattung den deutschen Namen „Mauerpfeffer“ gegeben, auch wenn die anderen Arten der Gattung nicht scharf schmecken. Eingesetzt wird das Taxon auch als Heilpflanze und in der Homöopathie.

Standort im Garten: Gruppe 47

Vorkommen

Der Scharf-Mauerpfeffer ist an sandigen Ruderalfluren, lückigen Sandtrockenrasen und auf trockenen Felsen, Mauern oder entlang von Dämmen auf colliner bis montaner Höhenstufe in allen Bundesländern zu finden. Die Art ist nicht gefährdet. Als fakultativer Serpentinophyt kann die Art mit den Bedingungen auf trockenen, nährstoffarmen und schwermetallhaltigen Serpentinböden umgehen.



Abbildung 25: *Sedum acre* (Schwarzer Mauerpfeffer) (Botanik im Bild, 2010b)

Botanische Merkmale

Sedum acre erreicht eine Höhe von 5–12 cm. Es handelt sich um einen ausdauernden, krautigen und rasenbildenden Chameophyten mit einer reich verzweigten Grundachse und meist kriechenden Trieben.

Laubblätter: Charakteristisch sind die 2–4 mm breiten, eiförmigen, sitzenden, stumpfen (ohne

Stachelspitzen), wechselständigen, sukkulenten Laubblätter, die unter der Mitte am breitesten sind.

Unterscheidungsmerkmal zum im Habitus sehr ähnlichen Mild-Mauerpfeffer (*Sedum sexangulare*) ist das Fehlen von spornartig abstehenden Höckern am Blattgrund. Der Mild-Mauerpfeffer zeigt auch eher walzliche Laubblätter und keinen scharfen Geschmack.



Abbildung 26: Schwarzer Mauerpfeffer in Blüte (Botanik im Bild, 2010b)

Blüte: Das Taxon hat spitze, leuchtend gelbe Kronblätter in einem mehr- bis vielblütigen thyrsischen Blütenstand. Blütezeit: VI–VIII.; Frucht: Sammelbalg („Balgkapsel“)

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/sedum-acre/> [21.04.2016];

BILDER: <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Sedum-acre.htm> [21.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Serpentin-Hauswurz

3.3.16. *Sempervivum pittonii*



Hauswurz sind mehrjährige, in der Regel behaarte, sukkulente, immergrüne Rosettenpflanzen aus der Familie der Dickblattgewächse (Crassulaceae). Bei *Sempervivum pittonii* handelt es sich um einen obligaten Serpentinophyten (kommt ausschließlich über Serpentinogestein vor) und seltenen Endemiten des Serpentinegebietes um Kraubath im mittleren Murtal in der Steiermark.

Abbildung 27: Serpentin-Hauswurz am Gelsen bei Kraubath (Botanik im Bild, 2010)

Standort im Garten: Gruppe 47

Vorkommen

Die Serpentin-Hauswurz ist an steilen Serpentin-Fels-Fluren in montanen Höhenstufen zu finden. Es handelt sich um eine sehr seltene Art, die vom Aussterben bedroht ist. Ihre Verwendung findet die Serpentin-Hauswurz auch als Zierpflanze in Steingärten.

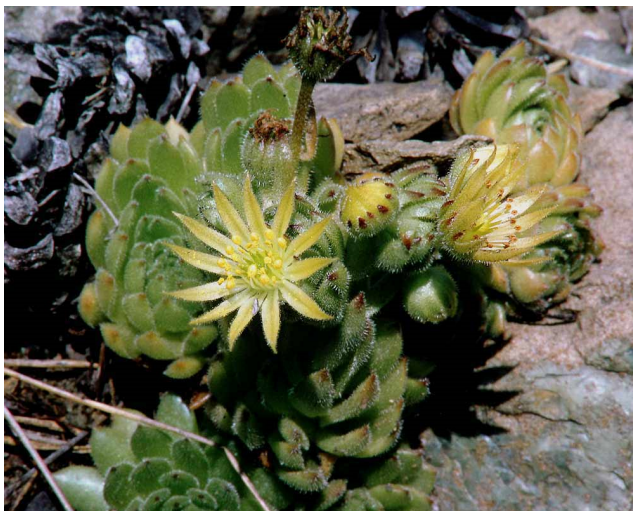


Abbildung 28: Serpentin-Hauswurz (*Sempervivum pittonii*) (Botanik im Bild, 2010)

Botanische Merkmale

Hauswurz bilden Horste aus Laubblatt-Rosetten. Die Serpentin-Hauswurz breitet sich über kurze oberirdische Ausläufer aus. Im

Unterschied zu anderen morphologisch sehr ähnlichen Hauswurz-Taxa wie die Großblütige Hauswurz (*Sempervivum grandiflorum*) weist die Serpentin-Hauswurz keinen Harzgeruch auf.

Laubblätter: Rosette mit einem Durchschnitt von 2-4 cm, Rosettenblätter verkehrt-eilänglich, meist 4-6 mm breit, auf den Flächen (besonders gegen die Spitze zu) mit langen Drüsenhaaren versehen. Auch Stängel und Kelch dicht drüsenhaarig.

Blüte: Krone in blassgelb bestehend aus meist 12 Kronblättern, etwa 10 mm lang, besonders außen drüsenhaarig; die Staubbeutel und Staubfäden erscheinen weißlich, fast kahl und nur am Grund manchmal etwas drüsenhaarig; Antheren gelb

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; JÄGER, E. J., EBEL, F., HANELT, P. & MÜLLER, G. (Hrsg.). (2008). Rothmaler Exkursionsflora von Deutschland. Krautige Zier- und Nutzpflanzen (Bd. 5). Berlin Heidelberg: Springer Spektrum; http://www.botanik.univie.ac.at/hbv/download/ib_sempervivum_botanik.pdf [18.04.2016]

BILDER: <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Sempervivum-pittonii.htm> [18.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Blasen-Leimkraut

3.3.17. *Silene vulgaris*

Das Blasen-Leimkraut (*Silene vulgaris*), auch unter dem Trivialnamen Klatschnelke bekannt, ist eine weitverbreitete Pionierpflanze aus der Unterfamilie der Nelkenähnlichen (Caryophylloideae), zugehörig zur Familie der Nelkengewächse (Caryophyllaceae). Es handelt sich um einen im Erscheinungsbild meist kahlen und bläulich bereiften, ausdauernden Chameophyten. Den Trivialnamen erhielt die Art aufgrund des deutlich aufgeblasenen Kelchs, welcher (wie für alle Taxa der Nelkenähnlichen kennzeichnend) aus miteinander verwachsenen Kelchblättern besteht. Der Kelch zeigt deutlich eine stark netzartige, aus 20 Nerven bestehende Nervatur. Kronblätter in weiß und 2-spaltig angeordnet, je Blüte 3 Griffel. Der Art *Silene vulgaris* gehören mehrere Unterarten (Subspezies) an. Die Unterarten unterscheiden sich in ihrer Morphologie und Ökologie. Zwei der Unterarten sollen nun einander gegenüber gestellt werden.

Schutt-Blasen-Leimkraut
(*Silene vulgaris* subsp. *glareosa*)



Abbildung 29: *Silene vulgaris* subsp. *glareosa* (Botanik im Bild, 2005e)

Vorkommen: Das Schutt-Blasen-Leimkraut wächst ausschließlich auf kalkreichen Standorten. Zu finden auf Kalkschutt und auf Geröllfluren auf subalpiner Höhenstufe. Ein mit Ausnahme von Wien und Burgenland zerstreut vorkommender Metallophyt (schwermetalltolerant).

Botanische Merkmale: Stängel niederliegend bis aufsteigend; Grundblatt 1-1,5 cm lang und 0,3-0,5 cm breit. Stängelblätter (1)1,5-3 cm lang und (0,2)0,4-0,7(1) cm breit. Erreicht eine Höhe von 10-30(40) cm; Blüten: Blütenstand 1-5(7)blütig; Blütezeit: VII-VIII.

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; **BILDER:** <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Silene-vulgaris-vulgaris.htm> [21.04.2016]; <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Silene-vulgaris-glareosa.htm> [21.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Rennweg 14, A-1030 Wien; www.botanik.univie.ac.at/hbv/

Gewöhnliches-Blasen-Leimkraut
(*Silene vulgaris* subsp. *vulgaris*)



Abbildung 30: *Silene vulgaris* subsp. *vulgaris* (Botanik im Bild, 2005d)

Vorkommen: Ein in ganz Österreich sehr häufig von der collinen bis subalpinen, teilw. auch auf alpiner Höhenstufe auf trockenen Wiesen, üppig bewachsenen Lägerfluren, Felsschutthalden, Ruderalstellen oder an Waldschlägen.

Botanische Merkmale: Stängel aufsteigend bis aufrecht; Grundblatt 1,5-4 cm lang und 0,5-1,2 cm breit. Stängelblätter rund (2,5)3-7(13) cm lang und (0,7)1-2,5(4) cm breit. Erreicht eine Höhe von (20)30-50(100) cm; Blüten: Blütenstand 5-15(30)blütig; Blütezeit: VI-X.

P. Pumpler 2016

Tel. 0043 (0)1 4277-54100, Fax 9541

Serpentin-Steppen-Aschenkraut

3.3.18. *Tephroseris integrifolia* subsp. *serpentina*

Einziges Unterscheidungsmerkmal des Serpentin-Steppen-Aschenkrauts von anderen *Tephroseris*-Taxa sind die purpurfarbenen Verfärbungen der Korbhüllblätter. Pflanzen auf Serpentin zeigen häufig bestimmte Merkmale wie etwa stärkere Rottöne. Derartige serpentinspezifische Merkmale wie zum Beispiel Verfärbungen werden als Serpentinomorphosen bezeichnet. Diese können genetisch fixiert oder auch modifikativ bedingt sein. Die Tendenz zu purpurnen Farbtönen ist jedoch auch ein klassisches Kennzeichen für ökophysiologische Stresssituationen.

Standort im Garten: Gruppe 47.

Vorkommen

Falls taxonomisch anerkannt, handelt es sich um einen burgenländischen Endemiten (stark gefährdet). Er gedeiht als obligatorischer Serpentinophyt auf Halbtrockenrasen und in lichten Rot-Föhrenwäldern über Serpentin im Grenzgebiet Mittel- und Süd-Burgenland.



Abbildung 31: *Tephroseris integrifolia* subsp. *serpentina*. Merkmal zur Identifizierung sind die purpurbraun gefärbten Korbhüllblätter (Naturschutzbund Burgenland, o. J.-i).

Taxonomie

Familie: Das Serpentin-Steppen-Aschenkraut gehört zur Familie der Korbblütler (Asteraceae).

Gattung: *Tephroseris* wurde aufgrund der Ähnlichkeit der Korbhülle lange Zeit als Sektion (sectio) zur Gattung *Senecio* (Greiskraut) gerechnet. Mittlerweile steht fest, dass keine Verwandtschaft zwischen *Senecio* und *Tephroseris* vorliegt, weshalb *Tephroseris* Gattungsrang erhalten hat.

Art: Ob die Serpentinrasse *Tephroseris integrifolia* subsp. *serpentina* tatsächlich eine genetisch fixierte eigenständige Sippe oder doch

nur eine modifikative Serpentinomorphose einer anderen *Tephroseris*-Art darstellt, ist gegenwärtig ungeklärt und bedarf weiterer Untersuchungen.

Botanische Merkmale

Laubblätter: obererseits mehr oder weniger kräftig spinnwebig-flockig und kurz rauhaarig. **Wuchshöhe:** 20–60 cm. **Blüte:** Korbstand: 2–10zählig; Strahlblüten selten leicht orange überlaufen; Als Unterscheidungsmerkmal zu den nächsten Verwandten werden die purpurbraun gefärbten oberen Hälften bzw. zumindest purpurbraun gefärbt vorhandenen Spitzen der Korbhüllblätter herangezogen. **Blütezeit:** V–VI. **Frucht** behaart.



Abbildung 32: Serpentin-Steppen-Aschenkraut in Blüte (Botanik im Bild, 2008a)

P. Pumpler 2016
LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; FISCHER, M. A. & FALLY, J. (2006). Pflanzenführer Burgenland. Deutschkreutz: J. Fally Eigenverlag; <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Tephroseris-integrifolia-ser.htm> [14.04.2016]; **BILDER:** <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Tephroseris-integrifolia-ser.htm> [14.04.2016]; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/tephroseris-integrifolia-subsp-serpentina/> [14.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Österreich-Ehrenpreis

3.3.19. *Veronica austriaca*

Die systematische Benennung des Österreich-Ehrenpreises (*Veronica austriaca*) aus der Familie der Wegerichgewächse iwS (Plantaginaceae s. lat.) erfolgte durch Carl von Linné (1707-1778), dem Begründer der binären Nomenklatur und einer der wichtigsten Reformierer der biologischen Systematik. Das Verbreitungsgebiet des Österreich-Ehrenpreises reicht über die heutigen Staatsgrenzen der Republik Österreich weit hinaus von Zentral- und Süd-Ost-Europa über Russland, den Kaukasus und bis in die Türkei.

Standort im Garten: Gruppe 47.

Vorkommen

Veronica austriaca besiedelt Lebensräume wie Eichenwäldsäume, Schwarz-Föhrenwälder und Trockenrasen auf colliner bis submontaner Höhenstufe. Als fakultativer Serpentinophyt kommt das Taxon auch auf Serpentinböden vor. Es handelt sich um eine kalkholde Art (bevorzugt kalkreiche Böden ohne an diese gebunden zu sein), die im pannonischen Gebiet zerstreut bis selten vorkommt. In anderen Regionen Österreichs (B, W, N, St, SO-K) tritt sie nur sehr selten auf und ist daher als gefährdet eingestuft. In Oberösterreich gilt sie als ausgestorben. Im Alpenraum ist sie stark gefährdet.



Abbildung 33: Österreich-Ehrenpreis (*Veronica austriaca*)
(Botanik im Bild, 2006b; Naturschutzbund Burgenland, o. J.-j)

Botanische Merkmale

Im Gegensatz zum fakultativen Serpentinophyten Echter Ehrenpreis (*Veronica officinalis*) zeigt *Veronica austriaca* keinen kriechenden Wuchs sondern aufrechte Stängel bzw. einen aufrechten Wuchs. Das Taxon wird 15-40 cm hoch. Sie wächst als ausdauernder, krautiger Hemikryptophyt (Überdauerungsknospen nahe der Bodenoberfläche). Die Pflanze zeigt angedrückte Krummhaare; Stängel ringsum gleichmäßig behaart; Pflanze drüsenlos und ohne Ausläufer.

Laubblätter: Die meisten Stängelblätter oberhalb der Blütenstände sind linealisch, meist ganzrandig, mit deutlich nach unten umgerolltem Blattrand. Die mittleren und unteren Laubblätter erscheinen breit-lineal-lanzettlich, sind 3-10(15) mm breit und haben oft nur einen etwas umgerollten Rand.

Blüte: Große und sattblaue Kronblätter, die Krone hat einen Durchmesser von 9-12 mm. Blütezeit: V.

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/linne-carl-von/39482> [20.04.2016]; <http://www.catalogueoflife.org/col/details/species/id/ee767d6b277381a2acfb1fc5f0c1978c> [20.04.2016]; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/veronica-austriaca/> [20.04.2016]; **BILDER:** <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Veronica-austriaca.htm> [20.04.2016]; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/veronica-austriaca/> [20.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

Arznei-Ehrenpreis

3.3.20. *Veronica officinalis*

Beim Arznei-Ehrenpreis (*Veronica officinalis*), ebenso mit den Trivialnamen Echter Ehrenpreis oder Wald-Ehrenpreis bezeichnet, handelt es sich um eine häufig verbreitete, ausdauernde, kriechende Art aus der Sektion *Veronica*, zugehörig der Tribus der Ehrenpreisförmigen (Veroniceae), welche systematisch zur Unterfamilie der Fingerhutähnlichen (Digitalidoideae) und der Familie der Wegerichgewächse iwS (Plantaginaceae s. lat.) angehört. Verwendung findet die Pflanze auch als Tee- und Volksarzneipflanze. Charakteristisch sind die dichten Haare an Laubblättern, Blütenstand und Frucht.

Standort im Garten: Gruppe 47.

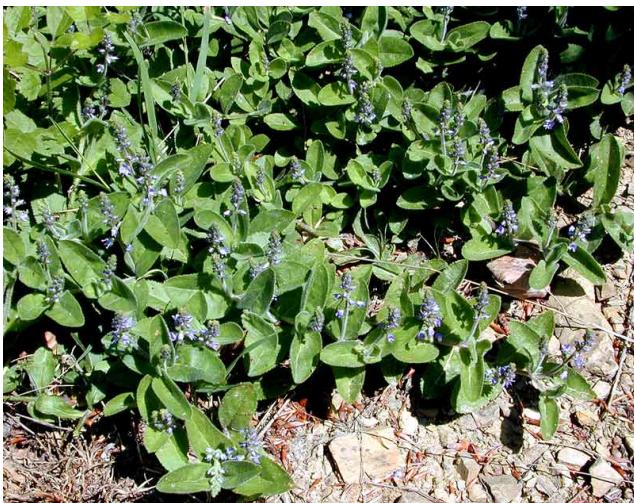


Abbildung 34: Arznei-Ehrenpreis (*Veronica officinalis*) (Botanik im Bild, 2006)

Vorkommen

Das Taxon kommt in mäßig trockenen, mageren, bodensauren Wäldern, an Waldschlägen und auf Weiderasen in allen Bundesländern Österreichs auf colliner bis subalpiner Höhenstufe vor. Ein Säurezeiger und kalkfeindliches Taxon. Als fakultativer Serpentinophyt kommt die Pflanze auch auf trockenen, schwermetallhaltigen und nährstoffarmen Serpentinböden vor.

Botanische Merkmale

Veronica officinalis kennzeichnet als kriechende Pflanze ein kriechender Stängel. Sie erreicht eine Höhe von lediglich 3-5(10) cm, aber bildet 10 bis 50 cm lange Triebe aus.

Laubblätter: eine wintergrüne Art, Laubblätter erscheinen eiförmig bis elliptisch und sind dicht behaart. Die Haare sind mindestens 0,5 mm lang.

Blüte: Die Art bildet 1-3 aufrechte und ährenartige seitliche Blühtriebe aus, die mit Laubblättern enden. An jedem Blühtrieb entstehen 15-30blütige Trauben. Die Krone ist helllila bis purpurviolett; die Traube ist mit dichten Drüsenhaaren besetzt, Blüten sind fast sitzend (ohne Stiel) ausgebildet und von 4 drüsenhaarigen Kelchblättern umgeben; Blütezeit: VI-VIII. Die verkehrt-dreieckige Frucht ist ebenso mit Drüsenhaaren besetzt.



Abbildung 35: Blütenstand einer *Veronica officinalis* (Botanik im Bild, 2006)

P. Pumpler 2016

LITERATUR: FISCHER, M. A., OSWALD, K. & ADLER, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., verb. Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum; <http://burgenlandflora.at/pflanzenfamilie/plantaginaceae-s-str-inkl-antirrhinaceae-globulariaceae/> [20.04.2016]; <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/veronica-officinalis/> [20.04.2016]; **BILDER:** <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Veronica-officinalis.htm> [20.04.2016]

Information erstellt im Rahmen der GSPC-Umsetzung in Österreich.

4. Diskussion, Conclusio und Ausblick

Diese Diplomarbeit mit dem Titel „Die Serpentinegruppe im Botanischen Garten der Universität Wien - Geobotanische und pflanzenökologische Aspekte von Lebensräumen über Serpentin“ steht wie eingangs begründet im Dienste des Botanischen Gartens der Universität Wien und stellt zugleich einen Beitrag zur Umsetzung der GSPC, der im Rahmen der Biodiversitätskonvention entwickelten globalen Strategie zum Schutz und Erhalt der Pflanzen, dar. Ziel dieser Arbeit war es, ökologische Zusammenhänge zwischen Ausgangsgestein, Bodenbedingungen und der Morphologie und Physiologie von Pflanzen an Serpentinstandorten zu untersuchen und mögliche Kausalitäten zwischen Ausgangsgestein und floristischen Manifestationen, welche auf den für Serpentinstandorte kennzeichnenden abiotischen und biotischen Faktoren fundieren, aufzuzeigen.

Um derartige Zusammenhänge herstellen zu können und kausalanalytische Rückschlüsse zu ermöglichen, wurden im Kapitel, welches die geobotanischen Grundlagen erarbeitet, entsprechend der Kausalkette „Ausgangsgestein – Boden – Vegetation“ zunächst die petrologischen und pedologischen Aspekte und anschließend die pflanzenphysiologischen und – morphologischen sowie die evolutiven Aspekte von Serpentinstandorten erarbeitet.

Das Kapitel der Petrologie widmet sich dem Erscheinungsbild, der chemischen Beschaffenheit und dem Entstehungsprozess des Gesteins Serpentin und legt dessen spezifische mineralische Konstitution, welche die Orogenese des Gesteins bedingt, dar. Dargelegt werden konnte auf diese Weise u.a. auch die erdgeschichtliche Bedeutung von Serpentinstandorten und das hohe Alter der metamorphen, ultramafischen Serpentin-Gesteine. So begründet sich das Auftreten von Serpentinflächen, die ursprünglich ozeanischen Krusten entstammen, am zentralkontinentalen Festland im Zusammenhang mit plattentektonischen Bewegungen der Erdkruste.

Auf den petrologischen Ergebnissen aufbauend konnte anschließend die Betrachtung der pedologischen Aspekte erfolgen. Neben der allgemeinen Bedeutung des Bodens für die Vegetation wurde den Themen Schwermetallböden, deren Einfluss auf die Vegetation sowie

den mit Chalkophyten in Zusammenhang stehenden Methoden der Phytoremediation besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Ausführungen zu den Zielen und Methoden der Phytoremediation bzw. Phytosanierung lassen im Zusammenhang mit den Erläuterungen zu den schwermetallhyperakkumulierenden Serpentinophyten Rückschlüsse darauf zu, dass Serpentin taxa wie das Gösing-Täschelkraut (*Noccaea goesingensis*) möglicherweise auch zur Dekontaminierung von schwermetallbelasteten Böden eingesetzt werden könnten. Die Prüfung dieses möglicherweise vorhandenen Potentials könnte im Rahmen von weiteren Forschungsarbeiten erfolgen.

Die chemischen, physikalischen und biologischen Parameter von Serpentinböden, welche in Summe das Serpentinphänomen generieren, wurden erläutert und mit den Eigenschaften des bodenbildenden serpentinigen Ausgangsgesteins in Verbindung gesetzt. Es erfolgte eine Zusammenstellung der wichtigsten ökologischen, edaphisch bedingten Deskriptoren an Serpentinstandorten. Festgestellt wurden unter anderem ein niedriger Ca-Mg-Quotient, Nährstoffmangel, Trockenheit und insbesondere erhöhte Schwermetallkonzentrationen, welche einzeln als auch in Summe die Pflanzen in diesem Lebensraum vor physiologische Herausforderungen stellen. Basierend auf den spezifischen biotischen und abiotischen bzw. edaphisch geprägten Faktoren an Serpentinstandorten konnten pflanzenphysiologische und –morphologische Anpassungsmechanismen, welche die hochspezialisierte Flora über Serpentin kennzeichnen, festgestellt und beschrieben werden.

Das Kapitel über die geobotanischen Grundlagen schließt mit der Identifizierung von an Serpentinstandorten evolutiv wirkenden Faktoren wie natürliche Selektion, Konkurrenz-Ausschluss-Prinzip, Gründereffekt, Verinselung, Genfluss und die mit diesen einhergehende Ausbildung von Ökotypen und Varianten ab, welchen die serpentine Flora infolge der extremen edaphischen Verhältnisse unterliegt. Im Kontext von ökologischen Faktoren und nachweisbaren evolutiven Entwicklungen über Serpentin konnten sowohl die Ausbildung spezifischer pflanzenphysiologischer Anpassungsmechanismen und Serpentinomorphosen als auch die Entstehung neuer Arten bzw. die erhöhte Endemitenzahl als Folge der edaphischen Bedingungen begründet werden. Festgestellt werden kann, dass Serpentinstandorte dazu beitragen, die Pflanzendiversität, das Artenspektrum und die Betadiversität einer Landschaft zu erweitern. Zurückzuführen auf meist kleine Populationen mit engen

Verwandtschaftsgraden und dezimierten Genpools konnte auch das durchaus interessante Phänomen belegt werden, dass sich an Serpentinstandorten nicht nur positive, sondern auch negative Diversifizierungsprozesse nachweisen lassen. Mit Blick auf die taxonomischen und systematischen Herausforderungen, welche erläutert und in der Auseinandersetzung mit Serpentinophyten evident werden, scheinen die als kritisch bewerteten Nomenklaturen von einigen Serpentinophyten nicht nur Folge unzureichender Genomanalysen, sondern auch Ergebnis der Ökotypen- und Variantenausbildung bestimmter Serpentinflora und Produkt phylogenetischer Diversifizierungsprozesse der Pflanzen über Serpentin zu sein.

Schlussfolgernd lassen es die Ausführungen über die nachgewiesenen evolutiv wirksamen Prozesse zu, Lebensräume über Serpentin als Standorte zu charakterisieren, deren Flora von höchst aktiven evolutiven Prozessen geprägt wurde und fortwährend wird. Serpentinstandorte können daher auch als evolutive Hotspots betrachtet und bezeichnet werden, welche die für diese Sonderstandorte charakteristischen floristischen, ökologischen und evolutiven Dynamiken widerspiegeln.

Zur Erarbeitung und Darstellung der geobotanischen Grundlagen und pflanzenökologischen Aspekte bzw. der Deskriptoren von Serpentinstandorten wurde versucht, aktuelle wissenschaftliche Publikationen heranzuziehen. Der Großteil der wissenschaftlich fundierten Erkenntnisse zu Serpentinstandorten stammt aus Forschungen zu Serpentinvegetationen aus verschiedenen außereuropäischen Serpentinregionen. Insbesondere zu den Serpentinebenen Kaliforniens, Kubas und Neukaledoniens liegen vermehrt Untersuchungen und Publikationen aus den letzten Jahren vor, welche u.a. die Ökologie von Serpentinstandorten auch im Kontext moderner evolutionsbiologischer Auffassungen betrachten. Hingegen erweist sich die Zahl der Serpentinregionen thematisierenden wissenschaftlichen Publikationen aus dem europäischen oder aus dem deutschsprachigen Raum vergleichsweise limitiert und reduziert. Dies lässt den Eindruck entstehen, dass den Serpentinebenen im deutschsprachigen bzw. österreichischen Raum im Rahmen von wissenschaftlichen Untersuchungen zurzeit nur wenig Aufmerksamkeit gewidmet bzw. möglicherweise kaum Ressourcen wie Forschungsgelder zur Verfügung gestellt werden. Nachdem sich wie dargestellt Serpentinstandorte in Bezug auf ihre biotischen und abiotischen Bedingungen im weltweiten Vergleich als äußerst heterogen erweisen, bieten die

Forschungsergebnisse und Erkenntnisse, welche im Laufe der letzten Jahre in Bezug auf Serpentinregionen im außereuropäischen Bereich gewonnen und publiziert wurden, einen reichhaltigen Fundus an wissenschaftlichen Fragestellungen und Datenerhebungen, welche in Bezug auf die österreichischen Serpentinstandorte noch zu überprüfen und zu fundieren wären. Es konnte im Rahmen der Literaturanalyse, welche im Zuge der Erstellung dieser Arbeit durchgeführt wurde, zwar kein Widerspruch zwischen den Ausführungen über außereuropäische und europäische Serpentinegebiete festgestellt werden, dennoch soll festgehalten werden, dass in diesem Sinne die Serpentinstandorte betreffenden Erkenntnisse der letzten Jahre, insbesondere hinsichtlich der evolutiven Prozesse, an österreichischen Serpentinstandorten noch zu überprüfen wären. Während die Inhalte dieser Diplomarbeit somit auf Erkenntnissen aus aktuellen wissenschaftlichen Publikationen fundieren, besteht bezüglich der Ökologie österreichischer Serpentinstandorte und den in dieser Diplomarbeit präsentierten Erkenntnissen weiterhin Forschungs- und Überprüfungsbedarf. Es wird daher darauf hingewiesen, dass infolge von noch ausstehenden Untersuchungen, welche außereuropäisch erhobene Daten betreffend der Ökologie serpentinier Lebensräume an österreichischen Serpentinstandorte überprüfen, durchaus noch Relativierungen in Bezug auf die in dieser Arbeit präsentierten Zusammenhänge zwischen abiotischen und biotischen Faktoren folgen könnten.

In der Auseinandersetzung mit den unterschiedlichsten Facetten der Flora des Lebensraums über Serpentinitt eröffnen sich somit noch zahlreiche zu klärende wissenschaftliche Fragestellungen. Aus diesen Überlegungen schlussfolgernd beweisen der soeben geforderte Forschungsbedarf in Bezug auf die Serpentinstandorte in Österreich ebenso wie die erwiesene Notwendigkeit, taxonomische Unklarheiten hinsichtlich der Systematik bestimmter Serpentinophyten unter anderem anhand von Genomanalysen zu bereinigen, die Nähe zu aktuellen fachwissenschaftlichen Forschungsbereichen.

Neben der Erarbeitung und Darstellung der allgemeinen geobotanischen und pflanzenökologischen Aspekte wurde im zweiten Hauptteil (Kapitel 3) dieser Diplomarbeit der Fokus auf die Charakterisierung und Beschreibung österreichischer Serpentinstandorte gelegt. Im Vergleich mit den großen Serpentinegebieten der Erde kennzeichnen österreichische Serpentinareale zwar eine nur relativ überschaubare Zahl an Endemiten, aber zweifelsfrei

konnte festgestellt werden, dass die serpentinen Lebensräume Österreichs eine Vielzahl hochangepasster Pflanzensippen beherbergen. Besonders gefährdete obligate Serpentinophyten, welche ausschließlich über Serpentin vorkommen, erweisen sich als Zeiger- und Charakterarten für österreichische Serpentinstandorte. Außerdem zeigen die Ausführungen, dass die österreichische Serpentinflora auch zahlreiche fakultative Serpentinophytenarten aufweist, deren breite ökologische Amplitude ein Überleben an Serpentinstandorten zulässt, obwohl Standorte über Serpentin aufgrund der edaphisch extremen Bedingungen dem ökologischen Optimum kaum eines Taxons entsprechen. Primär stellen Serpentinstandorte Rückzugsgebiete für jene Arten dar, welche dem Konkurrenzdruck an Standorten mit günstigeren Bedingungen nicht standhalten können. Als anschauliches Beispiel für eine solche im natürlichen Verbreitungsgebiet auf Extremstandorte verdrängte Gebietsart kann zum Beispiel die an Serpentinstandorten dominierende Baumart Rot-Föhre (*Pinus sylvestris*) dienen.

Aufgezeigt werden konnte, dass der Lebensraum über Serpentin im Vergleich mit anderen Lebensräumen aufgrund der spezifischen Bedingungen einerseits zwar eine verminderte pflanzliche Produktivität aufweist, aber andererseits von biodiversitätsfördernder Heterogenität geprägt ist und unterschiedliche Biotope wie Serpentin-Rot-Föhrenwälder, Serpentin-Trockenrasen oder Serpentin-Felsspaltenfluren aufweist, welche einer Vielzahl an seltenen und gefährdeten Pflanzenarten, die auch auf Roten Listen aufscheinen, Lebensraum bieten.

Um die Populationen der seltenen und gefährdeten Pflanzenarten über Serpentin, insbesondere jener Arten, welche obligat an Serpentinstandorte gebunden sind, zu gewährleisten, bedarf es des nachhaltigen Schutzes der serpentinen Lebensräume. An welchem Faden die Erhaltung dieser seltenen Serpentinarten und wie rasch eine gefährdete Art aufgrund defizitärer Maßnahmenpakete zum Schutz des Lebensraums ausgelöscht werden kann, konnte am Beispiel des Europa-Pelzfarns (*Notholaena marantae*) veranschaulicht werden: Während die Art früher an allen drei Hauptgebieten über Serpentin nachzuweisen war, ist *Notholaena marantae* am Standort im Burgenland als Folge einer Steinbrucherweiterung vollständig verschwunden. Dieser Verlust wäre durch entsprechende naturschutzfachliche Maßnahmen möglicherweise zu verhindern gewesen.

Mit dem Ziel, den Schutzstatus der drei Gebiete Österreichs, welche die Hauptverkommen an Serpentin aufweisen, zu überprüfen, konnten für die Serpentinegebiete rund um Bernstein im Burgenland, im Gurhofgraben bei Melk in Niederösterreich und bei Kraubath in der Steiermark umfassende Maßnahmen festgestellt werden, die dem Erhalt und der langfristigen Sicherung dienen sollten. Nachdem für alle Serpentinegebiete eine Anteilhabe an öffentlich legitimierten Schutzgebieten wie Natura 2000-Gebieten, Landschaftsschutzgebieten und Naturschutzgebieten aufgezeigt werden konnte, kann von entsprechenden Naturschutzmanagement-Maßnahmen, die den natürlichen Zustand des Lebensraums über Serpentin erhalten, ausgegangen werden. Weiters wurde aufgezeigt, dass anerkannte Naturschutzorganisationen wie der Naturschutzbund oder die Forschungsgemeinschaft Lanius sich um den Erhalt der selten vorkommenden Serpentinegebiete bemühen. Nachdem wie zu Beginn von Kapitel 3.2. ausgeführt eine Publikation aus dem Jahr 1989, in welchem Österreich noch kein Mitglied der Europäischen Union war, den österreichischen Serpentinstandorten einen mangelhaften Schutzstatus zuschrieb und heutzutage alle drei Serpentinegebiete entsprechend FFH-Richtlinien Teil von Europaschutzgebieten sind, scheinen die Serpentinstandorte Österreichs insbesondere auch von den Bemühungen der Europäischen Union, ein Schutzgebietsnetz in ganz Europa zu etablieren, profitiert zu haben.

Neben den drei Gebieten mit den Hauptvorkommen an Serpentin existieren österreichweit eine Vielzahl an weiteren sehr kleinräumigen Serpentinarealen (vgl. Anhang C: Liste Serpentinstandorte im Ostalpenraum), deren Schutzstatuts im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht überprüft wurde. Um aus naturschutzkundlicher Perspektive einen umfassenden Schutz der serpentin Flora Österreichs feststellen, gewährleisten und etwaigen zusätzlichen Bedarf an naturschutzkundlichen Maßnahmen fordern und setzen zu können, scheint ein weiteres Bemühen um die Erfassung der Artenzusammensetzung, Bestandskontrollen sowie die Prüfung der Schutzbedingungen der kleineren Serpentinstandorte voraussetzend und zweckdienlich zu sein. Weitere Untersuchungen mit dem Ziel, eine umfassende Erhaltung der seltenen und gefährdeten Serpentinpflanzen Österreichs zu gewährleisten und etwaige Defizite im Schutzstatus kleinerer Serpentinegebiete aufzuzeigen, sollen hiermit empfohlen werden.

Nachdem Serpentinstandorte wie bereits eingangs angeführt als Modell zur Darstellung und Veranschaulichung unterschiedlichster botanische Prozesse dienen können, sollen diese Arbeit abschließend auch Überlegungen präsentiert werden, welche das didaktische Potential der Serpentinegruppe im Botanischen Garten beleuchten. Die Vorschläge sind als Anregungen für zukünftige Didaktisierungen zu werten, bedürfen jedoch natürlich noch umfassenderer Untersuchungen in Bezug auf ihre Praktikabilität und Umsetzbarkeit und der fundierten Auslotung zur methodischen Herangehensweise.

Die Vermutung, dass bei der Mehrheit der Gartensbesucherinnen und Gartenbesuchern wie auch bei den Kindern und Jugendlichen, welche den Botanischen Garten im Rahmen von Führungen der Grünen Schule kennenlernen, wenig Wissen über das Gestein Serpentin, seiner chemischen Konstitution und die Charakteristika der Serpentinflora vorhanden ist, könnte qualitativ als auch quantitativ in Form einer Befragung erhoben werden.

Ein potentieller, auch Vorwissen aktivierender Anknüpfungspunkt stellt möglicherweise die Bezeichnung Schlangenstein und die Verwendung des Edelserpentins als Schmuck- und Dekorstein dar. Ausgehend von seinem Einsatz als Schmuckstein würde eine solche Annäherung, Menschen mit Affinität zu Schmuck und Dekorutensilien für das Thema gewinnen und zugleich eine Basis zur Überleitung zur Entstehungsgeschichte des Gesteins bieten. Auf diese Weise würde es sich anbieten, zentrale geologische und landschaftsformende Prozesse wie Plattentektonik, Subduktion, Ozeanische Spreizung bis hin zur Gebirgsbildung zu erarbeiten, den Zusammenhang zwischen petrologischer Zusammensetzung des Ausgangsgesteins und den Eigenschaften des Gesteins darzustellen, und die Bedeutung der Serpentinstandorte als geologische Fenster zu positionieren, welche den Seltenheitswert der Serpentinvorkommen begründen. Zu empfehlen wäre die Installierung einer Schautafel, welche die gesteinsbildenden tektonischen Prozesse illustrieren.

In Bezug auf die charakteristischen pedologischen Merkmale von Serpentinböden könnte es sich als sinnvoll erweisen, Vergleiche mit anderen Bodentypen anzustellen. Im Zuge dieser Gegenüberstellungen von Bodentypen würde es sich anbieten, zum Beispiel Wasserspeicherkapazitäten, Nährstoffgehalte, Aufbau der Bodenstruktur oder die

Konzentrationen an Schwermetallionen in den Böden vergleichend zu erheben. Als Ergebnis der Vergleiche würde ein Eindruck über die wichtigsten chemischen und physikalischen Merkmale von Serpentinböden entstehen.

Zur Erarbeitung der pflanzenmorphologischen und pflanzenphysiologischen evolutiv bedingten Anpassungsmechanismen, welche Kennzeichen der serpentin Flora sind, scheinen wie in Bezug auf den Bodentypus vergleichende Untersuchungen zweckdienlich zu sein. Phänetisch erkennbare Serpentinomorphosen wie Nanismus, Stenophyllie, Glabreszenz, Glaukeszenz und Xeromorphie können in der Gegenüberstellung mit nichtserpentinischen Arten sichtbar gemacht werden. Mit Blick auf die Arten der Serpentin-Gruppe würde es sich zum Beispiel anbieten, den Habitus der schmalblättrigen Serpentin-Karthäuser-Nelke (*Dianthus carthusianorum* subsp. *capillifrons*) mit einer nichtserpentinischen Nelken-Art vergleichend zu analysieren. Weiters könnten die spezifischen Merkmale von serpentinischen Zeigerarten wie Europa-Pelzfarn (*Notholaena marantae*) und Serpentin-Streifenfan (*Asplenium cuneifolium*) nichtserpentinischen Arten gegenübergestellt werden. Nachdem Merkmale, welche in Anpassung an die erhöhten Schwermetallkonzentrationen, für Serpentinpflanzen besonders charakteristisch sind, soll empfohlen sein, diese im Rahmen von Didaktisierungen zu betonen. So könnten vergleichende Zellanalysen und Messungen von Schwermetallkonzentrationen in den schwermetall(hyper)akkumulierenden Pflanzenteilen durchgeführt werden. Eine Art aus der Serpentin-Gruppe, welche im Zusammenhang mit Anpassungsmechanismen im Umgang mit den erhöhten Schwermetallkonzentrationen besondere Bedeutung erlangt und für vergleichende Studien herangezogen werden könnte, stellt das Zink und Kupfer hyperakkumulierende Gösing-Täschelkraut (*Noccaea goesingensis*) dar.

Als erkenntnisgewinnend erweist sich auch die Thematisierung der taxonomischen Herausforderungen und der Systematik der Serpentinpflanzen. In der Taxonomie der Serpentinophyten spiegeln sich sowohl die Dynamik als auch die Grenzen des biologischen Artkonzeptes wider. Didaktisches Potential haben die Serpentinophyten demnach als Element oder „Werkzeug“ zur nomenklatorischen, taxonomischen und systematischen Bewusstseinsbildung, da sowohl die Dynamik systematischer Zuordnungen als auch die Bedeutung der Rangstufen wie Unterart und Varietät, welche der Rangstufe der Art ungeordnet sind, veranschaulicht und vermittelt werden können. Zur taxonomischen

Sensibilisierung können exemplarisch Taxa der Serpentinegruppe wie das Preissmann-Berg-Steinkraut (*Alyssum montanum* var. *preissmannii*), das Serpentin-Steppen-Aschenkraut (*Tephrosia integrifolia* subsp. *serpentina*) oder der Kurzhaar-Donarsbart (*Jovibarba globifera* subsp. *hirta*) herangezogen werden.

Im Zusammenhang mit dem Vorkommen von seltenen und gefährdeten Arten an Serpentinfluren, dem Thema Biodiversität und naturschutzkundlichen Aspekten bietet die Auseinandersetzung mit Serpentinstandorten außerdem das didaktische Potential, die Bedeutung von Maßnahmen zum Arten- und Lebensraumschutz mit dem Ziel des Erhalts der Pflanzenvielfalt zu vermitteln. Unterschiedliche Schutzgebietstypen wie Europaschutzgebiete, Landschaftsschutzgebiete, Naturschutzgebiete, Naturparks, Biogenetische Reservate, etc. könnten genauso vermittelt und veranschaulicht werden wie die Rolle der Roten Listen und der Gefährdungsgrad einzelner Taxa. Exemplarisch könnte in diesem Zusammenhang der Europa-Pelzfarn (*Notholaena marantae*) und das Faktum seines Verschwindens im Serpentinegebiet rund um Bernstein, welches sich in der Erweiterung eines Steinbruches begründet, präsentiert werden. Demnach obliegt den Serpentinstandorten das Potential, im Sinne des Naturschutzes Bewusstsein und Sensibilisierung für die Notwendigkeit von Arten- und Lebensraumschutzmaßnahmen zum Erhalt der Biodiversität zu schaffen.

In Bezug auf die verschiedenen didaktischen Potentiale, welchen Serpentinstandorte inhärent sind, scheinen zusammenfassend die evolutiven Prozesse, welchen die Flora an Serpentinstandorten unterliegt, am bedeutendsten und charakteristischsten zu sein. Die an diesen Standorten nachgewiesenen evolutiv wirksamen Parameter wie natürliche Selektion, Konkurrenz, das Prinzip der Verinselung, die Ausbildung von post- und präzygotischen Barrieren, welche den Genfluss zwischen serpentininen und angrenzenden nichtserpentininen Populationen unterbinden, und innerartliche Variationen und die Ausbildung von Ökotypen, welche als Vorstufen von Artbildungsprozessen betrachtet werden können, ermöglichen es, grundlegende Konzepte der Evolution am Modell der Serpentinstandorte zu erklären und zu veranschaulichen. Am Beispiel der Serpentinstandorte kann die Entstehung neuer Arten im Kontext ökologischer bzw. edaphischer Bedingungen wie anhand kaum eines anderen Lebensraums nachvollziehbar gemacht werden. Mit den Lebensraum charakterisierenden zentralen Konzepten der Evolution wie Artbildung, die Ausbildung von

Anpassungsmechanismen, Konkurrenzausschlussprinzip, Allee-Effekt oder Gründereffekt steht den Didaktikern in Auseinandersetzung mit dem Lebensraum über Serpentin ein umfangreiches Repertoire zur Verfügung, um das Verständnis für natürliche Prozesse der Evolution nachvollziehbar zu machen, zu skizzieren und zu verdeutlichen. In diesem Sinne soll hinsichtlich ihres didaktischen Potentials die wesentlichste Bedeutung von Serpentinstandorten darin gesehen werden, als Modell zur Veranschaulichung evolutiver Prozesse dienen zu können.

Um diese Arbeit nun abzuschließen, kann mit Verweis auf die einleitend formulierte, dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungsfrage „Welche abiotischen Faktoren charakterisieren Serpentinstandorte und welche evolutiv bedingten pflanzenphysiologischen Anpassungen resultieren aus diesen petrologischen und pedologischen Gegebenheiten?“ zusammenfassend erwiesen werden, dass die intendierten zu erarbeitenden Inhalte umfassend behandelt und präsentiert wurden. Darüber hinaus wurden Recherchen und Zusammenhänge präsentiert, welche zum Beispiel naturschutzkundliche Facetten zum Lebensraum über Serpentin beleuchten oder die Physiognomie österreichischer Serpentinstandorte charakterisieren. Weiters wurden 20 Pflanzenporträts für Serpentinophyten aus der Serpentin-Schaugruppe des Botanischen Gartens der Universität Wien entworfen, welche zukünftig im Botanischen Garten den Besucherinnen und Besuchern als Informationsquelle dienen können. Außerdem wurde abschließend das didaktische Potential von Serpentinstandorten anhand der Ergebnisse, welche diese Arbeit präsentiert, umrissen, welche als Anregungen zur Entwicklung von Projekten und Führungen im Botanischen Garten zum Thema Serpentinophyten fungieren können.

Quellenverzeichnis

- Alexiou-Puljer, A., Zoli-Sudbrock, R. & Puljer, A. A.- (Hrsg.). (2008). Langenscheidt, Euro-Wörterbuch Griechisch: Griechisch-Deutsch; Deutsch-Griechisch ; [mit griechischer Grammatik] (Völlige Neubearb). Berlin, München, Wien, Zürich, New York: Langenscheidt.
- Amir, H., Perrier, N., Rigault, F. & Jaffré, T. (2007). Relationships between Ni-hyperaccumulation and mycorrhizal status of different endemic plant species from New Caledonian ultramafic soils. *Plant and Soil*, 293(1–2), 23–35. <http://doi.org/10.1007/s11104-007-9238-0>
- Amt der Burgenländischen Landesregierung. (o. J.-a). Landschaftsschutzgebiet Bernstein, Lockenhaus, Rechnitz. Abgerufen 29. April 2016, von <http://www.burgenland.at/natur-umwelt-agrar/natur/geschuetzte-gebiete/landschaftsschutzgebiete/landschaftsschutzgebiet-bernstein-lockenhaus-rechnitz/>
- Amt der Burgenländischen Landesregierung. (o. J.-b). Landschaftsschutzgebiete. Abgerufen 29. April 2016, von <http://www.burgenland.at/natur-umwelt-agrar/natur/geschuetzte-gebiete/landschaftsschutzgebiete/>
- Amt der Burgenländischen Landesregierung. (o. J.-c). Natura 2000 Gebiet Bernstein-Lockenhaus-Rechnitz. Abgerufen 29. April 2016, von <http://www.burgenland.at/natur-umwelt-agrar/natur/geschuetzte-gebiete/natura-2000-gebiete/bernstein-lockenhaus-rechnitz/>
- Amt der Niederösterreichischen Landesregierung. (2015). Serpentschätze. Niederösterreich Perspektiven, 4/2015, 30–31.
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung. (o. J.). Infofolder Europaschutzgebiet Ober- und Mittellauf der Mur mit Puxer Auwald, Puxer Wand und Gulsen. Abgerufen 30. April 2016, von <http://www.verwaltung.steiermark.at/cms/beitrag/11680588/74838132/>
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung. (o. J.). Natura 2000 - Ober- und Mittellauf der Mur mit Puxer Auwald, Puxer Wand und Gulsen. Abgerufen 30. April 2016, von <http://www.verwaltung.steiermark.at/cms/beitrag/11680780/74835791/>
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung. (o. J.). Nr. 5 Ober- und Mittellauf der Mur mit Puxer Auwald, Puxer Wand und Gulsen. Abgerufen 30. April 2016, von <http://www.natura2000.at/steirische-schutzgebiete/gebietsliste/nr-5-ober-und-mittellauf-der-mur-mit-puxer-auwald-puxer-wand-und-gulsen/>
- Anacker, B. L. (2011). Phylogenetic Patterns of Endemism and Diversity. In S. Harrison & N. Rajakaruna (Hrsg.), *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System*. Berkeley: University of California Press.

- ARGE Dunkelsteinerwald. (o. J.). Region Dunkelsteinerwald. Abgerufen 29. April 2016, von <http://www.arge-dunkelsteinerwald.at/region.html>
- Botanic Gardens Conservation International. (o. J.). About the GSPC. Abgerufen 1. Mai 2016, von <http://www.plants2020.net/>
- Botanik im Bild. (2002, Dezember 29). *Campanula persicifolia*. Abgerufen 15. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Campanula-persicifolia.htm>
- Botanik im Bild. (2005a, Jänner 17). *Asplenium cuneifolium*. Abgerufen 13. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Asplenium-cuneifolium.htm>
- Botanik im Bild. (2005b, Februar 26). *Cardaminopsis arenosa*. Abgerufen 18. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Cardaminopsis-arenosa.htm>
- Botanik im Bild. (2005c, März 5). *Alyssum montanum* ssp. *montanum*. Abgerufen 12. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Alyssum-montanum-mon.htm>
- Botanik im Bild. (2005d, November 17). *Silene vulgaris* subsp. *vulgaris*. Abgerufen 21. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Silene-vulgaris-vulgaris.htm>
- Botanik im Bild. (2005e, November 18). *Silene vulgaris* subsp. *glareosa*. Abgerufen 21. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Silene-vulgaris-glareosa.htm>
- Botanik im Bild. (2005f, November 27). *Dianthus carthusianorum* subsp. *capillifrons*. Abgerufen 5. Mai 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Dianthus-carthusianorum-cap.htm>
- Botanik im Bild. (2006, November 24). *Digitalis grandiflora*. Abgerufen 17. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Digitalis-grandiflora.htm>
- Botanik im Bild. (2006, Dezember 16). *Veronica officinalis*. Abgerufen 20. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Veronica-officinalis.htm>
- Botanik im Bild. (2006, Dezember 18). *Veronica austriaca*. Abgerufen 20. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Veronica-austriaca.htm>
- Botanik im Bild. (2008a, April 2). *Tephroseris integrifolia* subsp. *serpentini*. Abgerufen 15. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Tephroseris-integrifol-ser.htm>
- Botanik im Bild. (2008b, September 20). *Cyclamen purpurascens*. Abgerufen 18. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Cyclamen-purpurascens.htm>
- Botanik im Bild. (2009, Dezember 27). *Notholaena marantae*. Abgerufen 21. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Notholaena-marantae.htm>
- Botanik im Bild. (2010, November 14). *Jovibarba globifera* subsp. *hirta*. Abgerufen 14. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Jovibarba-globifera-hirta.htm>
- Botanik im Bild. (2010, November 16). *Sempervivum pittonii*. Abgerufen 18. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Sempervivum-pittonii.htm>

- Botanik im Bild. (2010, November 22). *Sedum acre*. Abgerufen 21. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Sedum-acre.htm>
- Botanik im Bild. (2011, März 13). *Galium austriacum*. Abgerufen 19. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Galium-austriacum.htm>
- Botanik im Bild. (2011, Juni 10). *Genista pilosa*. Abgerufen 22. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Genista-pilosa.htm>
- Botanik im Bild. (2011, Oktober 30). *Dorycnium germanicum*. Abgerufen 19. April 2016, von <http://flora.nhm-wien.ac.at/Seiten-Arten/Dorycnium-germanicum.htm>
- Botanischer Garten der Universität Wien. (2016a, März 3). Fakten & Pläne. Abgerufen 11. März 2016, von <http://www.botanik.univie.ac.at/hbv/index.php?nav=fp4>
- Botanischer Garten der Universität Wien. (2016b, März 3). Schaugruppen. Abgerufen 11. März 2016, von <http://www.botanik.univie.ac.at/hbv/index.php?nav=73>
- Brady, K. U., Kruckeberg, A. R. & Bradshaw Jr., H. D. (2005). Evolutionary ecology of plant adaptation to serpentine soils. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 36, 243–266.
- Braun-Blanquet, J. (1964). *Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde* (3. Neubearb. Auflage). Wien: Springer-Verlag.
- Bresinsky, A., Körner, C., Kadereit, J. W., Neuhaus, G. & Sonnewald, U. (2008). *Strasburger Lehrbuch der Botanik* (36. Auflage). Heidelberg: Spektrum, Akad. Verl.
- Brooks, R. R. (1987). *Serpentine and its vegetation. A multidisciplinary approach*. London: Croom Helm.
- Brunold, C., Rügsegger, A. & Brändle, R. (Hrsg.). (1996). *Stress bei Pflanzen: Ökologie, Physiologie, Biochemie, Molekularbiologie*. Bern: Verlag Paul Haupt.
- Campbell, N. A., Reece, J. B., Held, A. & Markl, J. (2008). *Biologie* (6., aktualisierte Auflage, [Nachdr.] [2. Ausg. der amerikan.]). München: Pearson Studium.
- Campbell, N. A., Reece, J. B. & Kratochwil, A. (2011). *Biologie* (8., aktualisierte Auflage). München: Pearson Studium.
- Catalogue of Life. (2016, April 28). *Alyssum preissmannii* Hayek. Abgerufen 5. Mai 2016, von <http://www.catalogueoflife.org/col/details/species/id/d1aa82145618ed47117f1cfba5bf8c39/synonym/826d62f5ecf07fbd8c6ad2b29fae5c15>
- Coleman, R. G. & Jove, C. (1992). Geological Origin of Serpentinities. In A. J. M. Baker, J. Proctor & R. D. Reeves (Hrsg.), *The vegetation of ultramafic (serpentine) soils: proceedings of the First International Conference on Serpentine Ecology*, University of California, Davis, 19-22 June 1991 (S. 1–17). Andover, Hampshire, England: Intercept.

- Davies, K. F. (2011). Community Invasibility. In S. Harrison & N. Rajakaruna (Hrsg.), *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System* (S. 237–248). Berkeley: University of California Press.
- Dillinger, B. (2014). Endbericht zum Projekt „Serpentinstandorte im Südburgenland - Erhebung, Management, Schutz und Öffentlichkeitsarbeit“. Fachbereich Botanik. Eisenstadt: Naturschutzbund Burgenland. Abgerufen von http://burgenlandflora.at/wp-content/uploads/Endbericht_Serpentinstandorte_Botanik_Dillinger.pdf
- Duden online. (2015). Tetraeder. Abgerufen 6. November 2015, von <http://www.duden.de/suchen/dudenonline/tetraeder>
- Duden online. (o. J.). Oktaeder. Abgerufen 6. November 2015, von <http://www.duden.de/suchen/dudenonline/Oktaeder>
- Ellmauer, T. & Essl, F. (2005). Entwicklung von Kriterien, Indikatoren und Schwellenwerten zur Beurteilung des Erhaltungszustandes der Natura 2000-Schutzgüter. Band 3: Lebensraumtypen des Anhangs I der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie. Im Auftrag der neun österreichischen Bundesländer, des Bundesministerium f. Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Umweltbundesamt GmbH (S. 616). Wien. Abgerufen von http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/naturschutz/Berichte_GEZ/Band_3_FFH-Lebensraumtypen.pdf
- Energie- & Umweltagentur NÖ. (o. J.-a). Landschaftsschutzgebiet Wachau und Umgebung. Abgerufen 29. April 2016, von <http://www.naturland-noe.at/landschaftsschutzgebiet-wachau-und-umgebung>
- Energie- & Umweltagentur NÖ. (o. J.-b). Naturschutzgebiet Gurhofgraben [Die Naturland Niederösterreich Website der NÖ Energie- und Umweltagentur GmbH bietet Informationen zu allen niederösterreichischen Naturräumen.]. Abgerufen 13. April 2016, von <http://www.naturland-noe.at/naturschutzgebiet-gurhofgraben>
- Energie- & Umweltagentur NÖ. (o. J.-c). Was ist ein Europaschutzgebiet? Abgerufen 29. April 2016, von <http://www.naturland-noe.at/europaschutzgebiet>
- Essl, F., Egger, G. & Ellmauer, T. (2002). Rote Liste gefährdeter Biotoptypen Österreichs. Konzept. (Umweltbundesamt GmbH, Hrsg.) (Bd. Band 155). Wien: NWV - Neuer Wiss. Verl. Abgerufen von <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/M155.pdf>
- Fischer, M. A. (2010a). Lebensraum Serpentinfluren. In *Naturjuwelen im Burgenland: Steppen, Salz und Streuobstwiesen* (S. 212–216). Eisenstadt: Amt der Burgenländ. Landesregierung.
- Fischer, M. A. (2010b). Überblick über Vegetation und Flora. In *Naturjuwelen im Burgenland: Steppen, Salz und Streuobstwiesen*. Eisenstadt: Amt der Burgenländ. Landesregierung.

- Fischer, M. A. & Fally, J. (2006). Pflanzenführer Burgenland. Naturraum, Pflanzengesellschaften und Flora des Burgenlandes. Deutschkreutz: J. Fally Eigenverlag.
- Fischer, M. A., Oswald, K. & Adler, W. (2008). Exkursionsflora für Österreich, Liechtenstein und Südtirol (3., Auflage). Linz: OÖ Landesmuseum.
- Frey, W. & Lösch, R. (2014). Geobotanik: Pflanze und Vegetation in Raum und Zeit (3. Auflage 2010, Nachdr). Berlin: Springer Spektrum.
- Geologische Bundesanstalt (Hrsg.). (2002). Rocky Austria. Eine bunte Erdgeschichte von Österreich (2. verb. Aufl). Wien.
- Ghaderian, S. M., Fattahi, H., Khosravi, A. R. & Noghreian, M. (2009). Geobotany and Biogeochemistry of Serpentine Soils of Neyriz, Iran. *Northeastern Naturalist*, 16(5), 8–20.
- Gisi, U. (Hrsg.). (1997). Bodenökologie (2., neu bearb. Auflage). Stuttgart: Thieme.
- Grabherr, G. & Mucina, L. (Hrsg.). (1993). Die Pflanzengesellschaften Österreichs. Teil II. Jena: Gustav Fischer Verlag.
- Grabner, B. (2015). Naturschutzgebiet Gurhofgraben. Serpentinflora und Böhmischer Granat. *Natur & Land*, Heft 3, S. 14.
- Harrison, S. (2011). Spatial Ecology. In S. Harrison & N. Rajakaruna (Hrsg.), *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System* (S. 297–308). Berkeley: University of California Press.
- Harrison, S. & Rajakaruna, N. (Hrsg.). (2011a). *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System*. Berkeley: University of California Press.
- Harrison, S. & Rajakaruna, N. (2011b). What Have We Learned from Serpentine in Evolution, Ecology, and Other Sciences? In S. Harrison & N. Rajakaruna (Hrsg.), *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System* (S. 417–427). Berkeley: University of California Press.
- Holzner, W., Böhmer, K., Buresch, W., Frank, K., Kriechbaum, M., Kutzenberger, H., ... Zukrigl, K. (1989). Biotoptypen in Österreich. Vorarbeiten zu einem Katalog. (Umweltbundesamt GmbH, Hrsg.) (Bd. Band 12). Wien. Abgerufen von <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/M012.pdf>
- International Commission on Stratigraphy. (o. J.). International Chronostratigraphic Chart. Abgerufen 24. November 2015, von <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2015-01.jpg>
- Jäger, E. J., Ebel, F., Hanelt, P. & Müller, G. (Hrsg.). (2008). Rothmaler Exkursionsflora von Deutschland. Krautige Zier- und Nutzpflanzen (Bd. 5). Berlin Heidelberg: Springer Spektrum.

- Justin, C. (1993). Über bemerkenswerte Vorkommen ausgewählter Pflanzensippen auf Serpentinstandorten Österreichs, Sloweniens sowie der Tschechischen Republik. Linzer biologische Beiträge, 25_2, 1033–1091.
- Kadereit, J. W., Körner, C., Kost, B. & Sonnewald, U. (2014). Strasburger Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften (37. Auflage). Berlin Heidelberg: Springer Spektrum.
- Kay, K. M., Ward, K. L., Watt, L. R. & Schemske, D. W. (2011). Plant Speciation. In S. Harrison & N. Rajakaruna (Hrsg.), *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System* (S. 71–95). Berkeley: University of California Press.
- Kazakou, E., Dimitrakopoulos, P. G., Baker, A. J. M., Reeves, R. D. & Troumbis, A. Y. (2008). Hypotheses, mechanisms and trade-offs of tolerance and adaptation to serpentine soils: from species to ecosystem level. *Biological Reviews*, 83(4), 495–508.
- Kiehn, M. (2011). Globale Strategie zur Erhaltung der Pflanzen (GSPC). Umsetzung in Österreich. „Roadmap 2011-2020“ (S. 16). Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Abgerufen von http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/inhalte/chm/pdf-files/GSPC-Roadmap_Vorschlaege_fuer_Massnahmen_in_Oesterreich_2011-2020.pdf
- Kiehn, M. & Knickmann, B. (Hrsg.). (2015). *Der Botanische Garten*. Wien: Core Facility Botanischer Garten, Univ. Wien.
- Kompaktlexikon der Biologie. (o.J.). Modifikation. Abgerufen 25. Februar 2016, von <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/modifikation/7707>
- Kruckeberg, A. R. (2002). *Geology and plant life: the effects of landforms and rock types on plants*. Seattle: University of Washington Press.
- Lanius. (2016, Jänner 18). Gebietsbeschreibung Gurhofgraben. Abgerufen 21. März 2016, von <http://www.lanius.at/cms2/index.php?id=231>
- Lexikon der Biologie. (o.J.-a). Disruptive Selektion. Abgerufen 20. Jänner 2016, von <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/disruptive-selektion/18708>
- Lexikon der Biologie. (o.J.-b). Glaukeszenz. Abgerufen 26. Februar 2016, von <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/glaukeszenz/28227>
- Lexikon der Biologie. (o.J.-c). Plagiotropismus. Abgerufen 25. Februar 2016, von <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/plagiotropismus/52086>
- Lexikon der Biologie. (o.J.-d). Zwergwuchs. Abgerufen 25. Februar 2016, von <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/zwergwuchs/72190>
- Lexikon der Geowissenschaften. (o.J.). Alpen. Abgerufen 29. April 2016, von <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/alpen/536>
- Lombini, A., Dinelli, E., Ferrari, C. & Simoni, A. (1998). Plant–soil relationships in the serpentinite screes of Mt. Prinzera (Northern Apennines, Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 64(1), 19–33.

- Lüttge, U., Kluge, M., Thiel, G. & Lüttge-Kluge-Thiel. (2010). Botanik: die umfassende Biologie der Pflanzen ; [Botanik vom Bachelor bis zum Master - komplett, kompakt, kursorientiert!] (1. Auflage). Weinheim: Wiley-VCH.
- MagentaGreen. (2014). English: Plate tectonics Diagram — showing convergence of an oceanic plate and a continental plate. Abgerufen von https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oceanic-continental_convergence.svg
- Maresch, W., Medenbach, O., Trochim, H. D. & Steinbach, G. (1987). Gesteine. München: Mosaik-Verlag.
- Marktgemeinde Kraubath. (o. J.). Die Gulsen. Abgerufen 30. April 2016, von <http://www.kraubath.at/die-gulsen/>
- Michalek, K., Dillinger, B., Höttinger, H. & Staufer, M. (2015). Serpentinstandorte im Südburgenland - Erhebung, Management, Schutz und Öffentlichkeitsarbeit. Eisenstadt: Naturschutzbund Burgenland.
- Mineralienatlas - Fossilienatlas. (o. J.). Typlokalität. Abgerufen 4. November 2015, von <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Typlokalit%C3%A4ten>
- Moore, K. A. & Elmendorf, S. C. (2011). Plant Competition and Facilitation in Systems with Strong Environmental Gradients. In S. Harrison & N. Rajakaruna (Hrsg.), *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System* (S. 223–236). Berkeley: University of California Press.
- Moore, E. M. (2011). Serpentinites and other Ultramafic Rocks. Why They Are Important for Earth's History and Possibly for Its Future. In S. Harrison & N. Rajakaruna (Hrsg.), *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System* (S. 3–28). Berkeley: University of California Press.
- Mortimer, C. E. & Müller, U. (2007). Chemie. Das Basiswissen der Chemie (9., überarb. Auflage). Stuttgart: Thieme.
- Naturpark Geschriebenstein. (o. J.). Naturpark Geschriebenstein Irottkö. Abgerufen 29. April 2016, von <http://www.naturpark-geschriebenstein.at/>
- Naturschutzbund Burgenland. (o. J.-a). *Alyssum montanum* subsp. *gmelinii*. Abgerufen 5. Mai 2016, von <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/alyssum-gemelinii/>
- Naturschutzbund Burgenland. (o. J.-b). *Asplenio septentrionalis*-*Festucion pallentis*. Abgerufen 28. April 2016, von <http://burgenlandflora.at/pflanzengesellschaft/asplenio-septentrionalis-festucion-pallentis/>
- Naturschutzbund Burgenland. (o. J.-c). *Asplenium cuneifolium*. Abgerufen 13. April 2016, von <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/asplenium-cuneifolium/>
- Naturschutzbund Burgenland. (o. J.-d). *Dianthus carthusianorum* subsp. *capillifrons*. Abgerufen 13. April 2016, von <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/dianthus-carthusianorum-subsp-capillifrons/>

- Naturschutzbund Burgenland. (o. J.-e). Lebensraumschutz. Abgerufen 30. April 2016, von <http://www.naturschutzbund-burgenland.at/de/projekte/lebensraumschutz.html>
- Naturschutzbund Burgenland. (o. J.-f). *Noccaea goesingensis*. Abgerufen 15. April 2016, von <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/noccaea-goesingense/>
- Naturschutzbund Burgenland. (o. J.-g). *Potentilla crantzii* var. *serpentina*. Abgerufen 18. Februar 2016, von <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/potentilla-crantzii-var-serpentina/>
- Naturschutzbund Burgenland. (o. J.-h). Serpentinegebiet um Redlschlag und Bernstein (Wenzelanger–Steinstückl–Ochsenriegel). Abgerufen 30. April 2016, von <http://burgenlandflora.at/wandertouren/tour-1/>
- Naturschutzbund Burgenland. (o. J.-i). *Tephrosia integrifolia* subsp. *serpentina*. Abgerufen 7. März 2016, von <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/tephrosia-integrifolia-subsp-serpentina/>
- Naturschutzbund Burgenland. (o. J.-j). *Veronica austriaca*. Abgerufen 20. April 2016, von <http://burgenlandflora.at/pflanzenart/veronica-austriaca/>
- Naturschutzbund Niederösterreich. (o. J.). Gebiete im Besitz des Naturschutzbund NÖ. Abgerufen 2. Mai 2016, von <http://noe-naturschutzbund.at/html/Projekte/eigengruende1.htm#gur>
- Nultsch, W. (2001). Allgemeine Botanik: Glossarium mit 803 Stichworten (11., völlig Neubearb. und Auflage). Stuttgart: Thieme.
- O'Dell, R. E. & Rajakaruna, N. (2011). Intraspecific Variation, Adaptation, and Evolution. In S. Harrison & N. Rajakaruna (Hrsg.), *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System* (S. 97–127). Berkeley: University of California Press.
- Oberdorfer, E. (2001). Pflanzensoziologische Exkursionsflora für Deutschland und angrenzende Gebiete (8., stark überarb. erg. Aufl). Stuttgart: Ulmer.
- O'Dell, R. E., James, J. J. & Richards, J. H. (2006). Congeneric serpentine and nonserpentine shrubs differ more in leaf Ca:Mg than in tolerance of low N, low P, or heavy metals. *Plant and Soil*, 280(1–2), 49–64. <http://doi.org/10.1007/s11104-005-3502-y>
- O'Hanley, D. S. (1996). *Serpentinities: records of tectonic and petrological history*. New York: Oxford University Press.
- Okrusch, M. & Matthes, S. (2014). Mineralogie: eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde (9. Auflage). Berlin: Springer Spektrum.
- Oxford University Press. (o. J.). osmoticum. Abgerufen 26. April 2016, von http://www.oxforddictionaries.com/de/definition/englisch_usa/osmoticum
- Oze, C., Skinner, C., Schroth, A. W. & Coleman, R. G. (2008). Growing up green on serpentine soils: Biogeochemistry of serpentine vegetation in the Central Coast Range of California. *Applied Geochemistry*, 23(12), 3391–3403.

- Paule, J., Kolar, F. & Dobes, C. (2015). Arctic-alpine and serpentine differentiation in polyploid *Potentilla crantzii*. *Preslia*, 87, 195–215.
- Pott, R. (1996). Biotoptypen. Schützenswerte Lebensräume Deutschlands und angrenzender Regionen. Stuttgart (Hohenheim): Eugen Ulmer GmbH & Co.
- Pott, R. (2005). Allgemeine Geobotanik. Biogeosysteme und Biodiversität. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Pott, R. & Hüppe, J. (2007). Spezielle Geobotanik. Pflanze - Klima - Boden. Berlin: Springer.
- Press, F., Siever, R., Grotzinger, J. & Jordan, T. H. (Hrsg.). (2011). Allgemeine Geologie (5. Auflage, Nachdr). Berlin: Spektrum, Akad. Verl.
- Punz, W. (2001). Von den Erzpflanzen zu den Metallophyten. In Geschichte der Erdwissenschaften in Österreich (S. 87–89). Wien: Geolog. Bundesanst. Abgerufen von http://opac.geologie.ac.at/wwwopacx/wwwopac.ashx?command=getcontent&server=images&value=BR0056_001_A.pdf
- Punz, W. (2014). „Erbe des Bergbaus“ - zur Vegetation ostalpiner Schwermetallstandorte. *Geo.Alp*, 11, 239–250.
- Punz, W., Aigner, B., Sieghardt, H., Justin, C. & Zechmeister, H. (2010). Serpentinophyten im Burgenland. In Zoologisch-Botanische Gesellschaft in Österreich (Hrsg.), Verhandlungen der Zoologisch- Botanischen Gesellschaft in Österreich (Bd. 147, S. 83–92). Wien: Verlag der Zoologisch-Botanischen Gesellschaft in Österreich. Abgerufen von http://www.landesmuseum.at/pdf_frei_remote/VZBG_147_0083-0092.pdf
- Rajakaruna, N. (2004). The edaphic factor in the origin of plant species. In W. G. Ernst (Hrsg.), Serpentine and serpentinites: mineralogy, petrology, geochemistry, ecology, geophysics, and tectonics. A tribute to Robert G. Coleman. Columbia, MD: Bellwether Pub. for the Geological Society of America.
- RIS Bundeskanzleramt Österreich. (o. J.). Verordnung der Bezirkshauptmannschaft Knittelfeld vom 2. Februar 1990 über die Erklärung von Teilbereichen des Gulsenberges zum Naturschutzgebiet (Pflanzen- und Tierschutzgebiet). Abgerufen 30. April 2016, von <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/LrStmk/20000675/BHMT%20-%20Naturschutzgebiet%20Feistritz%20bei%20Knittelfeld%20-%20Teilbereiche%20des%20Gulsenbergs%20%28Pflanzen-%20und%20Tierschutzgebiet%29%2c%20Fassung%20vom%2030.04.2016.pdf>
- Ritter-Studnicka, H. (1967). Über die Glaukeszenz an Serpentinpflanzen. *Österreichische Botanische Zeitschrift*, 114, 102–114.
- Ritter-Studnicka, H. (1972). Die erhöhte Sukkulenz bei Serpentinpflanzen. *Phyton. Annales Rei Botanicae*, 14, 239–249.
- Roberts, B. A. & Proctor, J. (Hrsg.). (1992). The Ecology of areas with serpentinized rocks: a world view. Dordrecht ; Boston: Kluwer Academic.

- Safford, H. D. & Mallek, C. R. (2011). Disturbance and Diversity in Low-Productivity Ecosystems. In S. Harrison & N. Rajakaruna (Hrsg.), *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System* (S. 249–274). Berkeley: University of California Press.
- Saier, M. H. & Trevors, J. T. (2010). Phytoremediation. *Water, Air, and Soil Pollution*, 205(S1), 61–63. <http://doi.org/10.1007/s11270-008-9673-4>
- Schechter, S. P. & Bruns, T. D. (2008). Serpentine and non-serpentine ecotypes of *Collinsia sparsiflora* associate with distinct arbuscular mycorrhizal fungal assemblages. *Molecular Ecology*, 17(13), 3198–3210.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.-P. & Thiele, S. (2010). *Lehrbuch der Bodenkunde* (16. Auflage). Heidelberg: Spektrum, Akad.-Verl.
- Schopfer, P. & Brennicke, A. (2010). *Pflanzenphysiologie* (7. Auflage). Heidelberg: Spektrum, Akad. Verl.
- Schulze, E.-D., Beck, E. & Müller-Hohenstein, K. (2002). *Pflanzenökologie*. Heidelberg: Spektrum, Akademischer Verlag.
- Sekretariat des Übereinkommens über die Biologische Vielfalt & Botanic Gardens Conservation International (Hrsg.). (2007). *Globale Strategie zur Erhaltung der Pflanzen*. Übersetzung der englischen Originalfassung von April 2002. (C. Arnfield, H. Fink & M. von den Driesch, Übers.). Bonn, Montreal. Abgerufen von http://www.landesmuseum.at/pdf_frei_remote/VZBG_147_0083-0092.pdf
- Sharrock, S. L. & Botanic Gardens Conservation International. (2012). *GSPC. Global Strategy for Plant Conservation. A guide to the GSPC. All the targets, objectives and facts*. Richmond [England]: Botanic Gardens Conservation International.
- Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L. & Streck, T. (Hrsg.). (2012). *Bodenkunde und Standortlehre. Grundwissen Bachelor* (2., Auflage). Stuttgart: Ulmer.
- Stowasser, J. M., Petschenig, M. & Skutsch, F. (2006). *Stowasser: lateinisch-deutsches Schulwörterbuch* (Auflage 2006). München: Oldenbourg Schulbuchverlag.
- Strauss, S. Y. & Boyd, R. S. (2011). Herbivory and Other Cross-Kingdom Interactions on Harsh Soils. In S. Harrison & N. Rajakaruna (Hrsg.), *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System* (S. 181–199). Berkeley: University of California Press.
- The Plant List. (o. J.). *Alyssum preissmannii* Hayek. Abgerufen 5. Mai 2016, von <http://www.theplantlist.org/tpl1.1/record/kew-2632424>
- Thomson, D. M., Baythavong, B. & Rice. (2011). Invasions and the Evolution of Range Limits. In S. Harrison & N. Rajakaruna (Hrsg.), *Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System*. Berkeley: University of California Press.
- Umweltbundesamt GmbH. (o. J.). *Biogenetische Reservate*. Abgerufen 29. April 2016, von <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/naturschutz/sg/biogenres/>

- Umweltbundesamt GmbH. (o. J.). Important Plant Areas. Abgerufen 8. März 2016, von <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/naturschutz/sg/ipa/>
- Umweltbundesamt GmbH. (o. J.). Natura 2000. Abgerufen 29. April 2016, von http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/naturschutz/natura_2000/
- Wagenitz, G. (2003). Wörterbuch der Botanik. Die Termini in ihrem historischen Zusammenhang (Zweite, Auflage). Heidelberg ;Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Weiler, E. W. & Nover, L. (2008). Allgemeine und molekulare Botanik. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Weinzettl, J. (2010). Natura-2000-Gebiete Burgenland und Grünes Band. Informations- und Arbeitsmappe. Eisenstadt: Naturschutzbund Burgenland.
- Wendelberger, G. (1974). Die Serpentinpflanzenvorkommen des Burgenlandes in ihrer pflanzengeographischen Stellung. Naturwissenschaften 1974, Heft 53, S. 5-20.
- Wenzel, W. & Jockwer, F. (1999). Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralised soils of the Austrian Alps. Environmental Pollution, 1999, Vol.104(1), pp.145-155, 145.
- Wettberg, E. J. von & Wright, J. (2011). Genomic Approaches to Understanding Adaptation. In S. Harrison & N. Rajakaruna (Hrsg.), Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System (S. 139–153). Berkeley: University of California Press.
- Wolf, A. T. & Thorp, R. (2011). Plant-Pollinator Interactions in Naturally Fragmented Habitats. In S. Harrison & N. Rajakaruna (Hrsg.), Serpentine: The Evolution and Ecology of a Model System (S. 275–296). Berkeley: University of California Press.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zur Klassifizierung ultramafischer Magmatite wird das Dreieck Ol-Opx-Cpx verwendet (Okrusch & Matthes, 2014, S. 219).....	17
Abbildung 2: Schematische Darstellung der (a) Krümmung der Chrysotil-Struktur, der (b) Einrollung der Chrysotil-Struktur, der (c) Antigorit-Struktur (Okrusch & Matthes, 2014, S. 175)	19
Abbildung 3: Schema einer Subduktionszone an einem aktiven Kontinentalrand, dem Bildungsort der Serpentine (MagentaGreen, 2014)	21
Abbildung 4: Karte, welche an 18 Serpentinstandorten weltweit die Zahl der Serpentin-Endemiten auf Ebene der Arten vergleicht. Pfeile zeigen die sechs Regionen an, welche eine hohe Artenzahl an Endemiten aufweisen: von links nach rechts: Kalifornien, Kuba, der Great Dyke in Simbabwe, Japan, Neukaledonien und Neuseeland (vgl. Anacker, 2011, S. 50).	66
Abbildung 5: Gewöhnliches Berg-Steinkraut (<i>Alyssum montanum</i> subsp. <i>montanum</i>) (Botanik im Bild, 2005c)	97
Abbildung 6: Sand-Schaumkresse (<i>Arabidopsis arenosa</i>) (Botanik im Bild, 2005b).....	98
Abbildung 7: Serpentin-Streifenfarn (<i>Asplenium cuneifolium</i>) (Naturschutzbund Burgenland, o. J.-c)	99
Abbildung 8: Wedel des Serpentin-Streifenfarns (<i>Asplenium cuneifolium</i>) (Botanik im Bild, 2005a).....	99
Abbildung 9: <i>Campanula persicifolia</i> (Botanik im Bild, 2002)	100
Abbildung 10: Alpen-Zyklame (<i>Cyclamen purpurascens</i>) und im Vergleich die Oberseite und Unterseite der Laubblätter (Botanik im Bild, 2008b).....	101
Abbildung 11: <i>Dianthus carthusianorum</i> subsp. <i>capillifrons</i> , Redlschlag-Wenzelanger (Bez. Oberwart) (Naturschutzbund Burgenland, o. J.-d)	102
Abbildung 12: Blütenstand einer Serpentin-Karthäuser-Nelke (Botanik im Bild, 2005f).....	102
Abbildung 13: <i>Digitalis grandiflora</i> (Botanik im Bild, 2006a).....	103
Abbildung 14: <i>Dorycnium germanicum</i> (Botanik im Bild, 2011b)	104

Abbildung 15: Blüte des Seidenhaar-Backenklee (Botanik im Bild, 2011b).....	104
Abbildung 16: Österreich-Labkraut (<i>Galium austriacum</i>) (Botanik im Bild, 2011a).....	105
Abbildung 17: <i>Genista pilosa</i> (Botanik im Bild, 2011)	106
Abbildung 18: Blüte <i>Genista pilosa</i> (Botanik im Bild, 2011).....	106
Abbildung 19: <i>Jovibarba globifera</i> subsp. <i>hirta</i> in Kultur (Botanik im Bild, 2010a).....	107
Abbildung 20: Drüsenhaare an den Blüten von <i>Jovibarba globifera</i> subsp. <i>hirta</i> (Botanik im Bild, 2010a).....	107
Abbildung 21: <i>Noccaea goesingensis</i> (Naturschutzbund Burgenland, o. J.-f).....	108
Abbildung 22: Europa-Pelzfarn (<i>Notholaena marantae</i>) (Botanik im Bild, 2009)	109
Abbildung 23: Blattunterseite des Europa-Pelzfarns (Botanik im Bild, 2009).....	109
Abbildung 24: <i>Potentilla crantzii</i> var. <i>serpentini</i> (Serpentin-Crantz-Fingerkraut) (Naturschutzbund Burgenland, o. J.-g)	110
Abbildung 25: <i>Sedum acre</i> (Schwarzer Mauerpfeffer) (Botanik im Bild, 2010b)	111
Abbildung 26: Schwarzer Mauerpfeffer in Blüte (Botanik im Bild, 2010b)	111
Abbildung 27: Serpentin-Hauswurz am Gelsen bei Kraubath (Botanik im Bild, 2010)	112
Abbildung 28: Serpentin-Hauswurz (<i>Sempervivum pittonii</i>) (Botanik im Bild, 2010).....	112
Abbildung 29: <i>Silene vulgaris</i> subsp. <i>glareosa</i> (Botanik im Bild, 2005e)	113
Abbildung 30: <i>Silene vulgaris</i> subsp. <i>vulgaris</i> (Botanik im Bild, 2005d)	113
Abbildung 31: <i>Tephrosia integrifolia</i> subsp. <i>serpentini</i> . Merkmal zur Identifizierung sind die purpurbraun gefärbten Korbhüllblätter (Naturschutzbund Burgenland, o. J.-i).	114
Abbildung 32: <i>Serpentin-Steppen-Aschenkraut in Blüte</i> (Botanik im Bild, 2008a).....	114
Abbildung 33: Österreich-Ehrenpreis (<i>Veronica austriaca</i>) (Botanik im Bild, 2006b; Naturschutzbund Burgenland, o. J.-j).....	115
Abbildung 34: Arznei-Ehrenpreis (<i>Veronica officinalis</i>) (Botanik im Bild, 2006)	116

Abbildung 35: Blütenstand einer <i>Veronica officinalis</i> (Botanik im Bild, 2006).....	116
Abbildung 36: Gartenplan mit den Schaugruppen des Botanischen Gartens der Universität Wien (Botanischer Garten der Universität Wien, 2016a)	143
Abbildung 37: Legende zum Gartenplan mit einer Übersicht zu den Schaugruppen im Botanischen Garten der Universität Wien (Botanischer Garten der Universität Wien, 2016b)	144
Abbildung 38: Zeigt eine Liste mit Standorten im Ostalpenraum, auf welchen Serpentin und Chrom als vorherrschende Schwermetalle vorkommen. Angegeben sind: Name des Standorts, Koordinaten (lat N x long E in Grad und Minuten) und Quellen (in Auswahl). Die Standorte sind alphabetisch geordnet (Punz, 2014, S. 27–248).	146
Abbildung 39: Schwermetallstandorte in Österreich und dem angrenzenden Ostalpenraum, zu welchen floristische Befunde vorliegen, sowie die Fundorte des Kupfermooses <i>Mielichhoferia</i> . Aus Maßstabsgründen sind nicht alle Standorte punktgenau wiedergegeben (Punz, 2014, S. 241)	147
Abbildung 40: Flächen in Österreich mit Schwermetallrasen entsprechend FFH-Code 6130 (Ellmauer & Essl, 2005).....	147

Anhang A: Gartenplan und Legende



Abbildung 36: Gartenplan mit den Schaugruppen des Botanischen Gartens der Universität Wien (Botanischer Garten der Universität Wien, 2016a)

	Eingänge
	Gehölzsammlung (Bedecktsamer): ca. 600 Arten und Sorten in Kultur, insgesamt über 1500 Pflanzen, davon ca. 900 Bäume; wunderschöne Altbäume wie die Jacquin-Platane (zeithistorisches lebendes Dokument) am Rennweg.
	Die "Flora von Österreich" mit dem Schwerpunkt Pannonische Gruppe (Gruppen 38, 40, 41, 42): Präsentation und Erhaltungskulturen von Arten der Trockenstandorte Ostösterreichs wie Wald- und Felssteppen sowie Trockenrasen über sauren bzw. basischen Böden, Salzstandorten oder Sanddünen, Pflanzengesellschaften, die in der Natur heute nur noch in Fragmenten erhalten sind. Die Serpentingruppe .
	Koniferen: ca. 100 Arten naktsamiger (Nadel-)Bäume aus Europa, Asien und Nordamerika; Coniferetum in den Gruppen 20 bis 28; großteils gegen Ende des 19. Jahrhunderts gepflanzt
	Bambushain (<i>Phyllostachys viridiglaucescens</i> – Meergrüner Blattbambus): Bereits seit mindestens 1893 an dieser Stelle, bedeckt heute eine Fläche von ca. 300 m ²
	Wasserbecken und Teiche: z.T. aus der Gründungszeit des Gartens stammend. Mit interessanten Wasserpflanzen wie der Lotusblume
	Heil-, Nutz- und Giftpflanzen: ca. 300 Arten zur Ausbildung von Studentinnen und Studenten und zur Information der Besucherinnen und Besucher
	Systematische Gruppe (Anordnung der Pflanzen nach ihrer Verwandtschaft): in den Schaugruppen 1 bis 18 im Stil eines Englischen Landschaftsgartens die "Zweikeimblättrigen Blütenpflanzen"; in Gruppe 19 die "Einkeimblättrigen Blütenpflanzen"; Pflanzenarten und Familien soweit wie möglich nach ihrer natürlichen Verwandtschaft angeordnet: Arten einer Gattung unmittelbar nebeneinander, nahe verwandte Gattungen im selben oder in einem benachbarten Beet
	Kalthausgruppe und Kanarengruppe: Nicht winterharte Pflanzen der Subtropen und mediterraner Klimate, nur im Sommer im Freiland zu sehen, ca. 150 Arten
	Blüten- und fruchtbiologische, morphologische und genetische Gruppen (Biologie der Pflanzen)
	Alpinum: ca. 500 Arten vor allem aus den europäischen alpinen Gebieten (Alpen, dinarisch-illyrisches Gebiet, Pyrenäen)
	Kakteen- und Sukkulentengruppe: ca.150 Arten; abgesehen von wenigen winterharten Opuntien nur im Sommer in der Gruppe ausgestellt. Gliederung in Neue und Alte Welt, zudem zwei Spezialgruppen: Südafrika und Madagaskar. Zwischen den Wasser speichernden Pflanzen einjährige Arten aus den jeweiligen Trockengebieten der Alten und Neuen Welt (Wüstenblüte)
	Tropenhaus, Victoriabecken und Vitrinen (Tropische Nutz- und Zierpflanzen)
	Kalthaus (im Sommer Sonderschauen)
	Gewächshäuser für Forschungs- und Lehrsammlung (nicht zugänglich)
	Reserve-, Betriebs- und Lagerflächen (nicht öffentlich)
	Fakultätszentrum für Biodiversität (Institut für Botanik)
	Jacquin-Platane (links) und Jacquin-Ginkgo (rechts)

Abbildung 37: Legende zum Gartenplan mit einer Übersicht zu den Schaugruppen im Botanischen Garten der Universität Wien (Botanischer Garten der Universität Wien, 2016b)

Anhang B: Objectives & Targets der GSPC

Objective I: Plant diversity is well understood, documented and recognized

Target 1: An online Flora of all known plants

Target 2: An assessment of the conservation status of all known plant species, as far as possible, to guide conservation action

Target 3: Information, research and associated outputs, and methods necessary to implement the Strategy developed and shared

Objective II: Plant diversity is urgently and effectively conserved

Target 4: At least 15 per cent of each ecological region or vegetation type secured through effective management and/or restoration

Target 5: At least 75 per cent of the most important areas for plant diversity of each ecological region protected, with effective management in place for conserving plants and their genetic diversity

Target 6: At least 75 per cent of production lands in each sector managed sustainably, consistent with the conservation of plant diversity

Target 7: At least 75 per cent of known threatened plant species conserved in situ

Target 8: At least 75 per cent of threatened plant species in ex situ collections, preferably in the country of origin, and at least 20 per cent available for recovery and restoration programmes

Target 9: 70 per cent of the genetic diversity of crops including their wild relatives and other socio-economically valuable plant species conserved, while respecting, preserving and maintaining associated indigenous and local knowledge

Target 10: Effective management plans in place to prevent new biological invasions and to manage important areas for plant diversity that are invaded

Objective III: Plant diversity is used in a sustainable and equitable manner

Target 11: No species of wild flora endangered by international trade

Target 12: All wild-harvested plant-based products sourced sustainably

Target 13: Indigenous and local knowledge, innovations and practices associated with plant resources, maintained or increased, as appropriate, to support customary use, sustainable livelihoods, local food security and health care

Objective IV: Education and awareness about plant diversity, its role in sustainable livelihoods and importance to all life on earth is promote

Target 14: The importance of plant diversity and the need for its conservation incorporated into communication, education and public awareness programmes

Objective V: The capacities and public engagement necessary to implement the Strategy have been developed

Target 15: The number of trained people working with appropriate facilities sufficient according to national needs, to achieve the targets of this Strategy

Target 16: Institutions, networks and partnerships for plant conservation established or strengthened at national, regional and international levels to achieve the targets of this Strategy

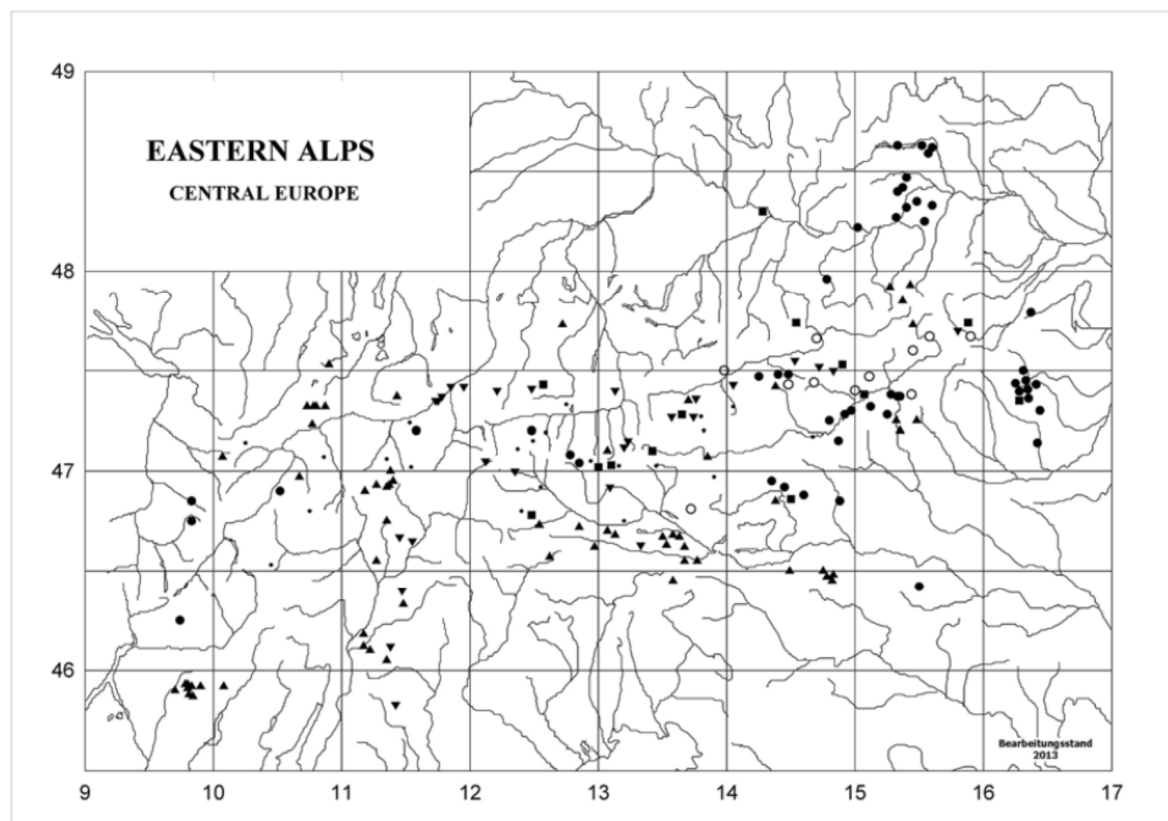
(Sharrock & Botanic Gardens Conservation International, 2012)

Anhang C: Liste Serpentinstandorte im Ostalpenraum

Abbildung 38: Zeigt eine Liste mit Standorten im Ostalpenraum, auf welchen Serpentin und Chrom als vorherrschende Schwermetalle vorkommen. Angegeben sind: Name des Standorts, Koordinaten (lat N x long E in Grad und Minuten) und Quellen (in Auswahl). Die Standorte sind alphabetisch geordnet (Punz, 2014, S. 27–248).

Serpentin/Chrom		
Bernstein	4724 1616	Justin 1993
Bründlberg	4838 1531	Pober 1985, Justin 1993
Bründlleiten	4837 1536	Pober 1985, Justin 1993
Eisenberg	4711 1624	Justin 1993
Eitenthal	4816 1519	Justin 1993
Elsenu/Friedberg	4728 1607	Lämmermayer 1926, Muntean 1977
Gabraungraben	4722 1521	Lämmermayer 1928, Muntean 1977
Gamskogel	4723 1517	Lämmermayer 1942
Gföhl	4832 1526	Justin 1993
Große Plischa	4720 1621	Justin 1993
Groszglockner	4705 1247	Zollitsch 1927, Gams 1936
Gurhofgraben	4819 1524	Kretschmer 1930, Justin 1993
Hausenbach	4815 1532	Justin 1993
Heiligenblut	4702 1251	Justin 1993
Hirt	4655 1427	Lämmermayer 1928
Hochgrößen	4728 1415	Hasl 1925, Lämmermayer 1926
Hochneukirchen	4728 1612	Justin 1993
Ispertal	4813 1501	Pober 1985, Justin 1993
Kanitzriegel	4725 1617	Justin 1993
Kienberg/Steinstückl	4725 1616	Eggler 1954, Justin 1993
Kirchkogel	4722 1520	Maurer 1966, Niklfeld 1979
Klein-Heinrichschlag	4825 1522	Pober 1985, Justin 1993
Kleine Plischa	4725 1623	Maurer 1966
Knittelfeld	4709 1452	Justin 1993
Kraubath	4717 1455	Braun-Blanquet 1961, Niklfeld 1979, Justin 1993
Lärchkogel/Trieben	4729 1429	Lämmermayer 1930, Justin 1993
Meidling im Tale	4820 1536	Pober 1985, Justin 1993
Mühlradl	4838 1533	Pober 1985, Justin 1993
Nauders	4654 1031	Justin 1993
Ochsenkogel	4719 1507	Hasl 1925, Justin 1993
Ochsenkopf/Parpan	4645 0950	Braun-Blanquet 1964
Paltmühl	4821 1529	Justin 1993
Petalgraben	4729 1426	Lämmermayer 1926
Pilgersdorf	4728 1619	Holzner 1986
Pirkerkogel	4657 1421	Justin 1993
Plankogel	4653 1436	Justin 1993
Purtschall	4700 1253	Justin 1993
Rechnitz	4718 1626	Justin 1993
Redlschlag	4724 1620	Eggler 1954, Justin 1993
Rumpersdorf	4718 1620	Justin 1993
Seckau	4715 1448	Justin 1993
Sieggraben	4748 1622	Justin 1993
Sommergraben	4718 1458	Hasl 1925, Ulrich unveröff.
Steinbach	4730 1619	Justin 1993
Steinegg	4837 1534	Pober 1985, Justin 1993
Totalp/Davos	4651 0950	Gigon 1983, Egger 1994
Trastallberg	4824 1520	Pober 1985, Justin 1993
Unterfelben	4712 1229	Justin 1993
Val Malenco	4615 0944	Vergnano Gambi 1992
Waldkogel	4717 1515	Lämmermayer 1930
Wattental	4712 1135	Gams 1958
Windischfeistritz	4625 1530	Hasl 1925, Lämmermayer 1926
Wolfsberg	4651 1453	Justin 1993
Zell/Waidhofen	4758 1447	Justin 1993
Zwettler Leiten	4828 1524	Pober 1985, Justin 1993

Anhang D: Karten Schwermetallstandorte in Österreich



▲ Galmei, ▼ Kupfer, ● Serpentin/Chrom, ○ Magnesit, ■ Arsen/ Antimon/Andere ▪ *Mieliichhoferia*.

Abbildung 39: Schwermetallstandorte in Österreich und dem angrenzenden Ostalpenraum, zu welchen floristische Befunde vorliegen, sowie die Fundorte des Kupfermooses *Mieliichhoferia*. Aus Maßstabsgründen sind nicht alle Standorte punktgenau wiedergegeben (Punz, 2014, S. 241)

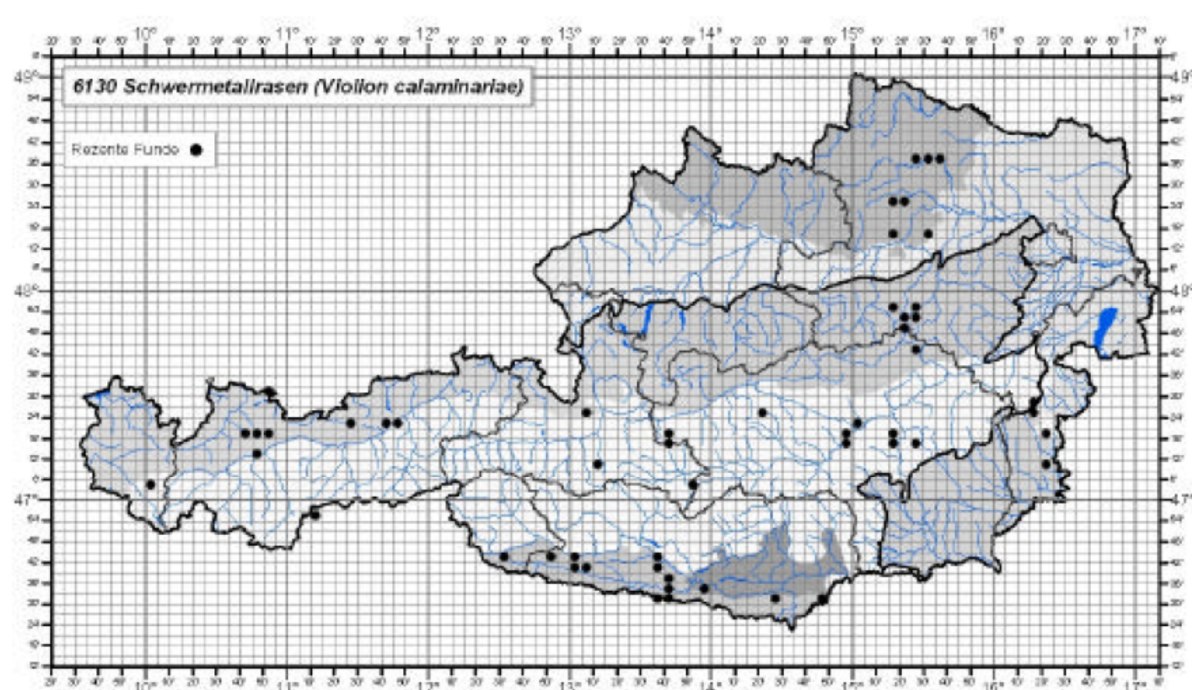


Abbildung 40: Flächen in Österreich mit Schwermetallrasen entsprechend FFH-Code 6130 (Ellmayer & Essl, 2005)

Anhang E: Wichtige taxonomische Rangstufen

Die Rangstufen der biologischen Systematik dargestellt am Beispiel der taxonomischen Stellung der Bachkresse (*Cardamine amara*) AUS: Fischer u. a. (2008) S. 36 und Kadereit u. a. (2014) S. 540:

Rangstufen (lateinisch)	Übliche Endungen	Taxa am Beispiel der taxonomischen Stellung der Bachkresse
Großreich (superregnum)		Organismen mit Zellkern / Eukaryota
Reich (regnum)		Embryopflanzen / Embryophyta / Archegoniatae
Überabteilung (superadvisio)		Gefäßpflanzen / Tracheophyta / Kormophyten
Abteilung (divisio)		Samenpflanzen / Spermatophyta
Unterabteilung (subdivisio)		Bedecktsamige / Angiospermae
Klasse (classis)	-phyceae, -mycetes bzw. -opsida	Dreifurchenpollen-Zweikeimblättrige / Rosopsida
Unterklasse (subclassis)	-idae	Rosenpflanzen / Rosidae (s. lat.)
Überordnung (supraordo)	-anae	Kapernblütige / Capparidanae
Ordnung (ordo)	-ales	Kapernartige / Capparidales
Familie (familia)	-aceae	-gewächse; Kreuzblütler / Brassicaceae
Unterfamilie (subfamilia)	-oideae	-ähnliche
Tribus (tribus)	-eae	Gänsekressenförmige / Arabideae
Untertribus (subtribus)		-verwandte (Endung: -inae)
Gattung (genus)		Schaumkraut / <i>Cardamine</i>
Untergattung (subgenus)		(Abkürzung: subgen. oder subg.)
Sektion (sectio)		<i>Cardamine</i> sect. <i>Cardamine</i>
Untersektion (subsectio)		<i>Cardamine</i> sect. <i>Cardamine</i> subsect. <i>Dolichopetalae</i>
Serie (series)		(Abkürzung: ser.)
Art (=Spezies, species)		Bitter-Schaumkraut, Bachkresse / <i>Cardamine amara</i>
Unterart (subspecies)		Österreichisches Bitter-Schaumkraut / <i>Cardamine amara</i> subsp. <i>austriaca</i>
Varietät (varietas)		(Abkürzung var.)
Forma (forma)		(Abkürzung f./fo./fa.)

Anhang F: Zusammenfassung

Aus Anlass der Eröffnung der Serpentin-Schaugruppe im Botanischen Garten der Universität Wien wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit die geobotanischen und pflanzenökologischen Faktoren des Sonderstandorts über dem Gestein Serpentin erhoben, um anschließend Kausalitäten zwischen Ausgangsgestein, Bodenökologie und den Charakteristika der serpentin Flora herzustellen und abzuleiten. Neben der Erarbeitung der abiotischen und biotischen Bedingungen an Serpentinstandorten konnten pflanzenmorphologische und pflanzenphysiologische Charakteristika sowie Phänomene wie edaphisch bedingter Endemismus als Ergebnis hoch aktiver evolutiver Prozesse ausgemacht werden. Im Kontext von edaphischen, evolutiven und floristischen Zusammenhängen bietet diese Arbeit somit einen Überblick über die Ökologie und die Vielfalt der hochangepassten Pflanzenwelt an Serpentinstandorten. Weiters werden die Beschaffenheit und das Erscheinungsbild serpentin Lebensräume charakterisiert und die drei österreichischen Gebiete mit den Hauptvorkommen an Serpentiniten bezüglich ihres Schutzstatus überprüft. Außerdem wurden für 20 Serpentinophyten aus der Serpentin-Schaugruppe des Botanischen Gartens Pflanzenporträts entwickelt. Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit schließt diese mit Überlegungen hinsichtlich des didaktischen Potentials von Serpentinstandorten. Diese Diplomarbeit steht zum einen im Dienste des Botanischen Gartens der Universität Wien, zum anderen stellt sie einen Beitrag zur Umsetzung der GSPC (Global Strategy for Plant Conservation) in Österreich dar.

Schlagworte:

Serpentin, Serpentin, Serpentinböden, Schwermetallböden, Serpentinophyten, Serpentinpflanzen, Serpentinomorphosen, Evolution, Taxonomie, Anpassungsmechanismen, Endemismus, Arten- und Lebensraumschutz, Botanischer Garten der Universität Wien, Global Strategy for Plant Conservation (GSPC)