Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz	Heft 18 (2019)	S. 15–30	7 Fig., 1 Tab.	urn:nbn:de:0041-afsv-01855

Scopus Indexed Journal

Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz – *Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation*

www.afsv.de/index.php/waldoekologie-landschaftsforschung-und-naturschutz

Eine Substratklassifizierung für die Nördlichen Kalkalpen als Grundlage für eine forstliche Standortsbewertung

A substrate classification for the Northern Limestone Alps as a basis for a forest site assessment

Eckart Kolb & Axel Göttlein

Abstract

Site maps for land use, especially for forestry, are complex compilations of pedological, topographical, climatic and vegetation information. Here, the pedological information is usually the limiting factor and often not available in sufficient spatial and content resolution. In none of the alpine countries soil maps are countrywide available. Where no pedological information is available, no site-specific maps can be created. Where pedological maps are available, they are not always comparable in their information, which makes cross-regional evaluation and use more difficult.

The substrate classification presented here uses the comprehensive geological maps as a proxy in order to partially compensate for the lack of pedological information in this way. In addition to the presentation of the classification, their uses are presented.

In this substrate classification, three parameters are evaluated, which are of great importance for potential plant growth. The geogenetic parameter describes the processing of the parent rock material, differing in particle sizes and sorting. The substrate chemical parameter characterizes the parent material, according to its carbonate content for carbonate rocks respectively to its base content for siliciclastic rocks. The class limits for carbonate levels of the individual classes do not always follow the geologically defined limit, but are based on the soil development series according to Rehfuess (1990), since the target is a proxy for the missing pedological data. The substrate physical parameter assesses the water holding capacity, evaluating mineral soil thickness, skeletal content and nFK on a rough scale.

All rocks that are classified by the same three-parameter combinations represent a substrate type. The advantage of this substrate classification is that it is not hierarchical, which simplifies query capabilities and map display.

The interpretation of the map and its possible uses are also shown in intersecting with other information such as terrain or vegetation information. Also, the limitations of the classification are discussed. As no information on an inventory level can be derived, the system is useful for regional and transnational planning.

Keywords: *substrate classification, forest stand sites, parent rock material, soil map, geological map, Northern Limestone Alps*

Zusammenfassung

Standortskundliche Karten für die Landnutzung, insbesondere für die Forstwirtschaft, sind komplexe Zusammenstellungen bodenkundlicher, topografischer, klimatischer und vegetationskundlicher Informationen. Hierbei sind die bodenkundlichen Informationen meist die begrenzende Größe, da diese oft nicht in ausreichender räumlicher und inhaltlicher Auflösung vorliegen. In keinem der Alpenländer liegen sie flächendeckend vor. Wo keine bodenkundlichen Informationen vorliegen, können keine standortskundlichen Karten erstellt werden. Dort wo bodenkundliche Karten vorliegen, sind sie in ihrer Aussage nicht immer vergleichbar, was eine überregionale Bewertung und Nutzung erschwert.

Die hier vorgestellte Substratklassifikation verwendet die flächendeckend vorliegenden geologischen Karten als Proxy, um auf diese Weise den Mangel an bodenkundlichen Informationen teilweise auszugleichen. Neben der Darstellung der Klassifikation werden auch deren Nutzungsmöglichkeiten vorgestellt.

In dieser Substratklassifizierung werden drei Parameter bewertet, die für das potentielle Pflanzenwachstum eine hohe Bedeutung haben. Die geogenetische Ziffer beschreibt vor allem die Aufbereitung der Ausgangsgesteine, die sich in den Partikelgrößen und deren Sortierung unterscheiden. Die substratchemische Ziffer charakterisiert die Ausgangsgesteine nach ihrem Carbonatgehalt bei den Carbonatgesteinen und

nach dem Basenreichtum bei den siliziklastischen Gesteinen. Die Grenzen nach Carbonatgehalten der einzelnen Klassen folgen dabei nicht immer den geologisch üblichen Grenzwerten, sondern orientieren sich an den Bodenentwicklungsreihen nach Rehfuess (1990), da das Ziel ja ein Proxy für die fehlenden bodenkundlichen Daten ist. Die substratphysikalische Ziffer bewertet vor allem die Wasserhaltekraft, in dem sie die Mineralbodenmächtigkeit, Skelettgehalt und die nFK in einer groben Skala bewertet.

Alle Gesteine, die durch die gleiche dreistellige Ziffernkombination klassifiziert werden, stellen einen Substrattyp dar. Der Vorteil dieser Substratklassifikation ist, dass sie nicht hierarisch ist, was unter anderem Abfragemöglichkeiten und Kartendarstellungen vereinfacht.

Es werden die Interpretation der Karte und ihre Nutzungsmöglichkeiten auch im Verschnitt mit weiteren Informationen wie Gelände oder Vegetationsinformationen, aber auch die Begrenzungen der Klassifikation dargestellt. Es können zwar keine Informationen auf Bestandesebene abgeleitet werden, aber es können regionale und länderübergreifende Planungen und Aussagen unterstützt werden.

Schlüsselwörter: Substratklassifizierung, Forstliche Standorte, Ausgangsgestein, Bodenkarte, Geologische Karte, Nördliche Kalkalpen

1 Einleitung

Standortskundliche Charakterisierungen werden in der Regel mit Hilfe bodenkundlicher, topografischer, klimatischer und vegetationskundlicher Informationen erstellt. Klimatische und topografische Informationen liegen flächendeckend meist in ausreichender Genauigkeit und Zuverlässigkeit für diese Aufgabenstellung vor. Vegetations- und bodenkundliche Informationen sind dagegen in der Regel nicht flächendeckend vorhanden. Sofern verfügbar, haben diese Informationen oft eine unterschiedliche räumliche Auflösung und liegen in verschiedenen klassifizierten Systemen vor. Zur Ableitung bodenkundlicher und standortskundlicher Informationen im Alpenraum muss daher aus geologischen Karten ein Substratklassifikationssystem und eine Substratkarte entwickelt werden.

Die Grundidee einer Substratklassifizierung stammt von der tiroler Forstbehörde und wurde durch das Büro „Wald Landschaft Mensch“ (VLM) in Innsbruck entwickelt. Das Ziel dieser tiroler Klassifikation war, standortskundliche Informationen auf Bestandesebene zu liefern. Die notwendigen Vorinformationen waren dementsprechend aufwändig, konnten nur teilweise den vorhandenen geologischen Karten entnommen werden und mussten daher durch Kartierungen im Gelände sowie Analysen im Labor ergänzt werden.

Der Fokus des hier vorgestellten Klassifikationssystems zielt dagegen auf eine Synthese unterschiedlich aufgelöster und interpretierter geologischer Karten ab, mit dem Ziel, länderübergreifend standortskundliche Ergebnisse vergleichbar darzustellen. Dies geht zwangsläufig auf Kosten einer hohen räumlichen Auflösung. Die abzurufenden Vorinformationen liegen länderweise sehr unterschiedlich aufbereitet vor und können oft in einer für die Bestandesebene ausreichenden Informationsdichte nicht abgerufen werden. Der angestrebte Maßstab ist 1 : 25.000.

2 Herleitung und Beschreibung der Substratkarte

2.1 Konzept

2.1.1 Beziehung zwischen Geologie, Substrat und Standort

Standorte werden durch Klima, Geologie, Boden, Relief und Vegetation bestimmt. Hierbei steht die Bodenentwicklung in Wechselwirkung mit Klima, Relief und Vegetation (Abb. 1). Das Substrat, welches aus der Geologie abgeleitet wird und als Ausgangsmaterial der Bodenbildung zu verstehen ist

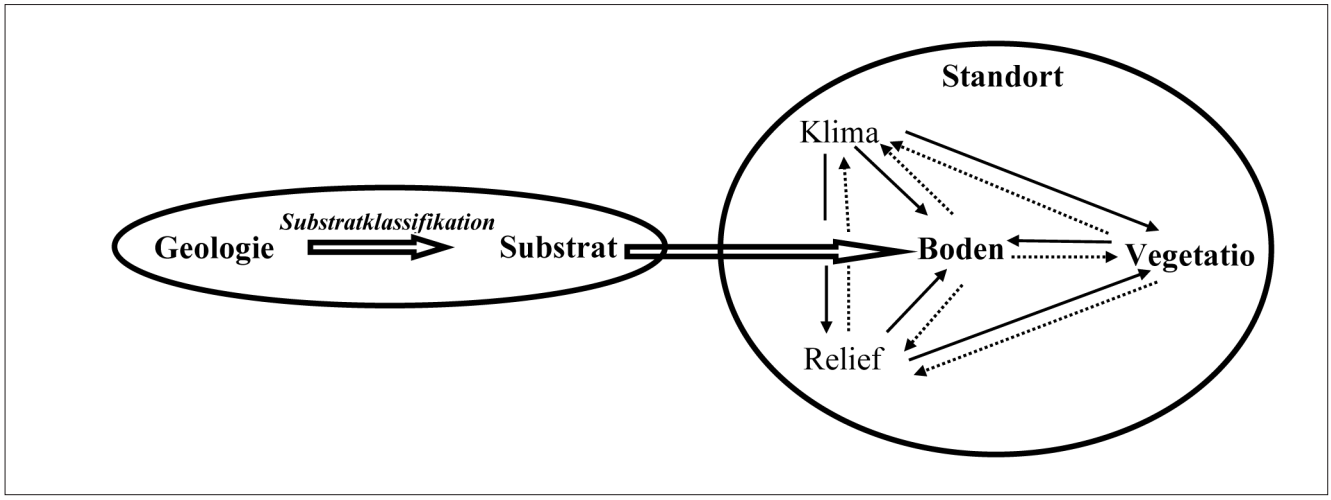

Abb. 1: Zusammenhang zwischen Geologie, Substrat und Standort. Bodeninformationen als wesentlicher Bestandteil der Standortscharakterisierung sind oft nicht oder nicht ausreichend aufgelöst vorhanden. Der Ansatz über die Substratkarte nutzt geologische Informationen als Proxy für Entwicklungspotentiale von Böden.

Fig. 1: Relationship between geology, substrate and site conditions. Soil information as an essential component of site characterization is often not or not sufficiently available. The substrate map approach uses geological information as a proxy for soil development potential.

(Hintermaier-Erhard & Zech, 1997), ist dagegen relativ unabhängig von diesen Faktoren, mit Ausnahme der Moore, die durch abgestorbene organische Pflanzenreste entstanden sind. Für die Lockergesteine gibt es Ausnahmen bezüglich der Reliefposition. So sind gravitative Sedimente zusätzlich an steile Reliefpositionen, Murentätigkeiten an zusätzlich höhere Niederschläge, fluviatile Sedimente an Tiefenlinien und Täler einer Landschaft und limnische Sedimente an Verebnungen gebunden.

Da ein Substrattyp mehrere geologische Einheiten zusammenfassen kann, wird die Substratkarte einfacher, bzw. „weniger bunt" als die ursprüngliche geologische Karte, mithin also übersichtlicher (n : 1-Relationen in Abb.2). So werden beispielsweise alle rückstandsarm verwitternde Kalke hier als „Hartkalke" zusammengefasst. Das ist sinnvoll, da es aus „Sicht der Pflanzenwurzel" unbedeutend ist, ob ein Boden durch Wetterstein- oder Dachsteinkalke gebildet wurde. Die Bodenentwicklung führt in beiden Fällen zu einem flachgründigen, skelettreichen Boden, dessen Bodenlösung chemisch vor allem durch Calcium und Hydrogencarbonat geprägt ist. Bei geringer physikalischer Aufbereitung neigen diese Standorte zur Tangelhumusbildung. Obwohl es für die geologische Interpretation wichtig ist, dass es sich beim Wettersteinkalk um einen ladinischen, lagunären Kalk, beim Dachsteinkalk dagegen um einen norisch-rätischen Riffschutt- bis Massenkalk handelt, kann diese Information aus standortskundlicher Sicht weggelassen werden, was den Überblick klein- bis mittelmaßstäbiger Karten (1 : 25.000 bis 1 : 200.000) erhöht.

Andererseits gibt es auch geologische Einheiten, die so heterogen sind, dass sie unterschiedlichen Substrattypen zugeordnet werden müssen (1 : m-Relationen in Abb. 2). Oft deuten schon die geologischen Bezeichnungen wie „Schicht", „Formation" oder „Serie" (z. B. Raiblerschichten, Garschellaformation) darauf hin.

Diese Heterogenität kann in einer vertikalen Heterogenität innerhalb eines geologischen Profils bestehen wie beispielsweise bei den Raiblerschichten, oder sie kann in einer horizontalen Heterogenität begründet sein. Die horizontalen Heterogenitäten kommen oft gerichtet vor. So gehen die ladinischen Karbonatgesteine aus den mittleren bayerischen Kalkalpen in Form der Wettersteinkalke nach Osten allmählich in die Ramsaudolomite über. Die norischen Plattenkalke gehen nach Osten allmählich in die Dachsteinkalke über. Häufiger sind nord-südorientierte Fazieswechsel, die v. a. im Allgäuer Flysch, der Unteren Süßwassermolasse und etwas schwächer auch in der Oberen Meeresmolasse auffällig sind.

Werden diese Heterogenitäten auf der Karte dargestellt, können sie unterschiedlichen Substrattypen zugeordnet werden. So wurden beispielsweise die Raiblerschichten in eine sandige, eine mergelige, eine kalkige und eine dolomitische Fazies und die Cenomanmergel in je eine sandige, kalkige, tonige und eine intermediäre Fazies unterteilt. Waren diese differenzierenden Informationen nicht vorhanden, weil sie flächenmäßig zu unbedeutend oder weil auf grobmäßstäbigen Karten eine differenzierte Darstellung nicht möglich oder unübersichtlich ist, wurde diese Einheit dem Substrattyp zugeordnet, der diese Einheit am häufigsten vertritt.

In der Summe überwiegen n : 1-Relationen, die zu einer Reduktion der Einheiten führen, im Gegensatz zu 1 : m-Relationen, die zu einer Differenzierung der Substrattypen führen (Abb. 2).

Es gibt auch 1 : 1-Relationen, wenn für einen Substrattyp nur eine geologische Einheit existiert. Diese Fälle sind selten und flächenmäßig unbedeutend.

2.1.2 Beziehung zwischen Substrat und Boden

Aus einem Substrattyp können fast immer mehrere Bodentypen oder Standortseinheiten entstehen mit der Konsequenz, dass weder aus einer geologischen Einheit noch aus einem Substrattyp eindeutig ein Bodentyp oder eine Standortseinheit abgeleitet werden kann. Allerdings entsteht je nach Reliefposition in einer Landschaft aus einem Substrattyp nur ein Bodentyp – in steiler erosionsausgesetzter Position ein genetisch jüngerer gering entwickelter Bodentyp, bei geringer Neigung in geschützter Position dagegen ein genetisch älterer weiter entwickelter Bodentyp. Die Zusammenfassung aller aus einem Substrattyp in einer Landschaft entstehenden Bodentypen zu einer Bodengesellschaft kann als Toposequenz, wenn nach der Topografie, bzw. als Chronosequenz, wenn nach dem Alter gegliedert wird, dargestellt und verstanden werden (Stahr et al., 2012, Rehfuess, 1990), (Tab. 2).

Dieses Denken in Toposequenzen oder Relief-Bodenentwicklungsreihen ist der Schlüssel für das Verständnis von mittelmaßstäbigen Boden- oder Standortskarten, da die Standortsvielfalt die übersichtliche Darstellungsmöglichkeit in diesem Maßstab verhindert.

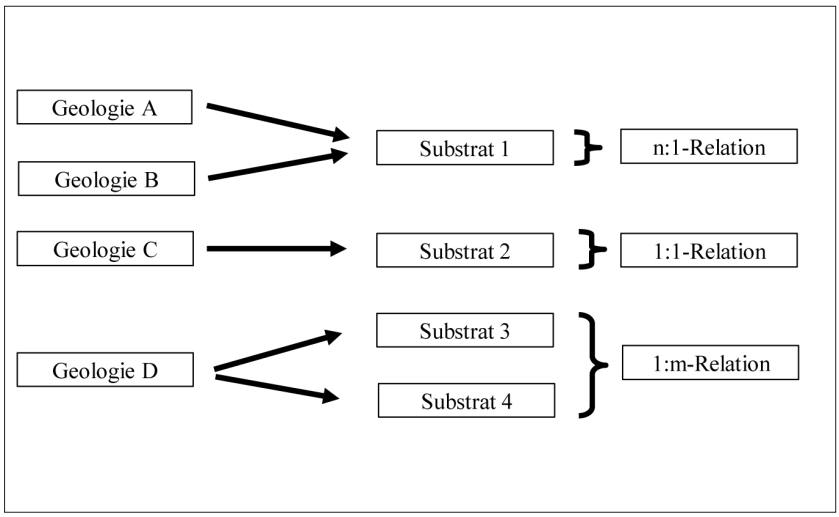

Abb. 2: Zuordnungsrelationen zwischen geologischen Einheiten und Substrattypen. Die Substratkarte ist übersichtlicher als die zugrundeliegende geologische Karte, da n : 1-Relationen überwiegen. Nur bei sehr heterogenen geologischen Einheiten war es notwendig, diese weiter zu differenzieren (1 : m-Relationen).

Fig. 2: Relations between geological units and substrate types. The substrate map is clearer than the underlying geological map, as n : 1 relations predominate. Only in very heterogeneous geological units it was necessary to differentiate geological units (1 : m relations).

So ist beispielsweise die typische reliefbedingte Entwicklungsreihe eines Mergels: Syrosem - Pararendzina - Parabraunerde (im regenreichen Klima auch eine Pseudogley-Parabraunerde), da wir in der Regel Syroseme nur in exponierter, stark der Erosion ausgesetzter Position finden, Parabraunerden dagegen nur in erosionsgeschützter Position, zum Beispiel an einem Unterhang, da hier die Zeit ausreichte, dass sich die Böden bis zum Stadium der Tondurchschlämmung entwickeln konnten, ohne dass das Bodensolum erodiert wurde. Vor allem die chemischen Kennziffern der Substratklassifikation sind so gewählt, dass sie meist eindeutig einer Bodenentwicklungsreihe nach Rehfuess (1990) zugeordnet werden können.

Dieser Zusammenhang hat mehrere Konsequenzen. Zum einen kann die Substratkarte auch im mittleren oder groben Maßstab dargestellt werden ohne ein zu kleinteiliges und unübersichtliches Mosaik zu ergeben. Zum zweiten benötigt die Ableitung von Bodeneigenschaften eine gewisse fachliche Vorbildung. Konkret bedeutet dies, dass man beispielsweise auf die Expertise eines ausgebildeten Försters angewiesen ist, wenn man sie als Planungsgrundlage auf Bestandesebene nutzen will. Dieser muß beispielsweise erkennen, wo Kaltluftmulden, vernässende Hangwasseraustritte oder Geländepartien mit mächtigeren bzw. geringmächtigeren Tangelhumusauflagen im Gelände auftreten, da Kaltluft und Hangwasser in der Substratklassifizierung nicht berücksichtigt und kleinräumige Heterogenitäten von Humusauflagen in diesem Maßstab nicht dargestellt werden können. Sie erfordern jeweils unterschiedliche forstlichen Maßnahmen, z. B. bezüglich Baumartenwahl, Bestockungsziel oder Bestandespflege.

Diese Klassifikation sollte zusätzlich folgende Kriterien erfüllen:

a.) sie sollte nicht nur beschreibend, sondern auch erklärend sein, d. h. in diesem Fall für den Anwender viel Information zu standörtlichen Fragestellungen liefern

b.) sie sollte auch eine Kartendarstellung ermöglichen

c.) sie sollte möglichst auf maximal 10 Stufen einer Hierarchie beschränkt bleiben, damit eine einfache numerische Darstellung und damit eine Verarbeitung über die EDV einfach ist.

2.1.3 Datenaufbereitung

Zunächst wurde die Klassifikation für den Bayerischen Alpenraum mit geologischen Karten im Maßstab 1 : 200.000 sowie 453 Bodenprofilen der Bodenprofildatenbank des Bayerischen Informationssystems (BIS) aus den Erfahrungen der tiroler Klassifikation heraus abgeleitet. Später wurde dieses Klassifikationssystem mit den mittlerweile fast flächendeckend vorhandenen geologischen Karten im Maßstab 1 : 25.000 weiterentwickelt.

In Tirol sind kleinmaßstäbige geologische Karten im Maßstab 1 : 50.000 noch sehr lückig. Daher war dort die Notwendigkeit zur Schließung dieser Lücken besonders groß, so dass hier die Idee dieser Substratklassifikation geboren wurde. Es konnten die schon erstellten Substratkarten verwendet werden, indem diese in das hier vorgestellte etwas gröber aufgelöste System zwanglos eingegliedert wurden. Hier sind alle bisher bewerteten Flächen integriert. Es fehlen zurzeit nur 2 Gebiete, für die aber kleinmaßstäbige geologische Karten vorliegen.

In Salzburg und Oberösterreich sind die kleinmaßstäbigen geologischen Karten ähnlich lückenhaft, ohne dass eine Substratklassifizierung vorliegt. Hier wurde jeweils mit der flächendeckend vorhandenen mittelmaßstäbigen Karte 1 : 200.000 gearbeitet.

Von den oben erwähnten im Bayerischen Informationssystem (BIS) zur Verfügung stehenden 453 Bodenprofilen für den Bayerischen Alpenraum, konnten 303 widerspruchsfrei geologischen Einheiten zugeordnet werden. Entfielen mindestens 5 Bodenprofile auf eine geologische Einheit, so wurde diese mit harten Fakten nach datenbasierten Regeln eingewertet. Aus diesen Informationen sowie dem Vorwissen aus der tiroler Substratgliederung wurde ein Substratklassifizierungssystem erarbeitet und geologische Einheiten zu Substrattypen zusammengefasst. Damit konnten 67 % der Fläche der Bayerischen Alpen bewertet werden. Alle geologischen Einheiten, die nicht ausreichend durch Bodenprofile charakterisiert sind – auf 33 % der Fläche –, wurden expertenbasiert nach Informationen aus geologischen Beschreibungen und Geländebefunden bewertet.

2.1.3.1 Geogenese (1. Ziffer)

Der Parameter „Geogenese“ ist auf den ersten Blick nicht so offensichtlich ein geeigneter Parameter für eine standortskundlich orientierte Gliederung, da es ja der Pflanze gleichgültig sein könnte, wie das Substrat, auf dem sie wächst, entstanden ist. Die hier verwendete geogenetische Gliederung beinhaltet aber viele Eigenschaften, die pedogenetisch von Bedeutung sind. So ist für die Schnelligkeit der Bodenentwicklung wichtig, ob es sich um Fest- oder Lockergesteine handelt. Weitere wichtige Größen sind die Partikelgrößen und Sortierung des Ausgangssubstrats. Sind diese eher fein, wie bei äolischen Sedimenten oder eher grob, wie im Fall von Bergsturzmaterial, oder sind die Größenfraktionen stark gemischt wie in Moränensedimenten oder sortiert wie in fluviatilen Sedimenten. Wichtig ist, dass sich die substratgenetische Einordnung nur auf die Lockergesteine bezieht. Sobald ein Lockersediment sich diagenetisch verfestigt hat oder gar aufgeschmolzen oder metamorphisiert wurde, wird es einer der beiden Klassen der Festgesteine zugeordnet. Beispielsweise wird der anstehende Wettersteinkalk nicht als marin, also mit der Kennziffer 6 klassifiziert, sondern als sedimentäres Festgestein mit der Kennziffer 2. Sobald dieser beispielsweise zu Hangschutt verwittert, erhält er die Kennziffer 4 für gravitative Sedimente. Die Zuordnungsregeln finden sich in Tabelle 1.

Die magmatischen und metamorphen Gesteine sowie die festen Sedimentgesteine zeichnen sich an Hängen durch geringere Rutschneigung als die anderen geogenetischen Einheiten aus. Ausnahme bilden die Einheiten des Flyschs, was aber eher als definitorisches Problem zu sehen ist, da geologische Karten den Flysch zum größten Teil als anstehendes Gestein und nicht als Hangschutte kennzeichnen.

Die Lockergesteine unterscheiden sich v. a. in Körngrößenspektrum, ihrer horizontalen und vertikalen Heterogenität. Das ist insofern bedeutsam, da die Gliederung des physikalischen Parameters (3. Ziffer) nur einen Durchschnittswert angeben kann.

Tab. 1: Geogenetische Gliederung. Sie dient vor allem dazu, um die Lockergesteine nach Korngrößenspektrum und Sortierung zu differenzieren.

Tab. 1: *Characterisation of Geogenesis. It serves to differentiate the loose rocks by grain size spectrum and sorting.*

	Beschreibung	Geogenese	Ziffer
Festgesteine	Magmatische und Metamorphe Festgesteine	Magmatite/ Metamorphite	1
	Klastische, Biogene und Chemische Festgesteine	feste Sedimentgesteine	2
Lockergesteine	Moränen, ohne Blockmoränen,ohne vorstoßschotter-dominierte Moränen	glazial	3
	Hangschutte, Bergstürze, Blockmoränen	gravitativ	4
	Muren, Schwemmkegel, Hangrutschungen, Fließerden	gravitativ-fluviatil	5
	Flußschotter, Hochflutlehme, Vorstoßschotter, vorstoßschotterdominierte Moränen, Strand- und Marschensedimente	fluviatil, glazifluviatil, marin	6
	Seesedimente inklusive Seetone und Seekreiden	limnisch und glazilimisch	7
	Löß, Schwemmlöß	äolisch und äolisch-fluviatil	8
	Moore	organisch	9

Die glazialen Sedimente zeichnen sich durch eine heterogene, durchmischte Matrix von Ton bis zur Blockfraktion aus. Von den glazialen Sedimenten werden folgende Substrate ausgegliedert:

Blockmoränen werden den gravitativen Lockergesteinen zugeordnet, die die Bergsturzsedimente einschließen. Da Blockmoränen vom Gletscher auf seiner Oberfläche transportierte Bergstürze sind, wurde das Substrat so wenig verändert, dass trotz per Definition geänderter Genese die Standortsqualität eines Bergsturzes bleibt.

Vorstoßschotterdominierte Grundmoränen sind oft aus wenig aufgearbeiteten glazifluviatilen Vorstoßschottern aufgebaut und werden den fluviatilen Sedimenten zugeordnet. Der ursprüngliche fluviatile Charakter wurde bei geringer Aufarbeitung so wenig verändert, dass die Standortsqualität des Substrats durch den fluviatilen Charakter passender wiedergeben ist. Die glazilimnischen Sedimente werden aufgrund ihrer Sortierung und ihrer Feinheit einer eigenen Gruppe, den limnischen Sedimenten zugeordnet.

Die gravitativen Sedimente sind ebenfalls durch eine heterogene durchmischte Matrix mit Schwerpunkt der groben Fraktion, also Schutt- bis Blockfraktion charakterisiert. Ihnen werden aus oben erwähnten Gründen Blockmoränen zugeordnet.

Die gravitativ-fluviatilen Sedimente stehen zwischen den gravitativen und fluviatilen Sedimenten. Sie sind heterogen und stark durchmischt. Sie zeichnen sich aber durch feinere Korngrößenfraktionen aus, die einerseits für die starke Wasseraufnahme verantwortlich sind und andererseits bei der gegenüber gravitativen Sedimenten geringeren Hangneigung noch transportiert werden können. Das Spektrum reicht vom Ton bis Blockfraktion. Schwerpunkt liegt im Bereich zwischen Sand bis Ton. Ausnahmen bilden seltene Sulzstromereignisse, die sich in Gebieten mit rückstandsarmen aber feinschuttig zerfallenden Dolomiten ereignen können.

Die fluviatilen Sedimente sind durch vertikal wie horizontal heterogene Größenfraktionen, die sortiert und abgerundet sind charakterisiert. Der Schwerpunkt liegt im Schluff bis Feinsandbereich bei den Hochflutlehmen, ansonsten im Sand bis Kiesbereich. Aus den oben erwähnten Gründen werden Vorstoßschotter und Grundmoränen, die von Vorstoßschottern dominiert sind, den fluviatilen Sedimenten zugeordnet.

Die limnischen Sedimente sind wenig heterogene, immer sortierte Korngrößen mit Schwerpunkt im Schluff- bis Tonbereich.

Die äolischen Sedimente weisen ein extrem enges Korngrößenspektrum mit Schwerpunkt im Feinsand bis Schluffbereich aus. Sie sind also ein Produkt eines extremen Sortiervorgangs und sind daher sowohl horizontal wie vertikal sehr homogen. Da durch das Verschwemmen dieses sortierten Materials keine unterschiedlichen Korngrößen gemischt werden, sind die Schwemmlösse ebenfalls dieser genetischen Klasse zugeordnet.

Die organischen Sedimente zeichnen sich durch fehlende Korngrößen aus, da sie v. a. aus organischen Stoffen aufgebaut sind.

2.1.3.2 Substratchemismus (2. Ziffer)

Um den Substratchemismus des im Alpenraum vorkommenden Gesteinsspektrums mit einer Ziffer charakterisieren zu können, wurden zwei Kriterien – Karbonatgehalt und Basenreichtum der Silikate – kombiniert (Tabelle 2). Das führt zu praktikablen Ergebnissen, da es keinen chemischen Parameter gibt, der allein einem Großteil des Gesteinsspektrums „aus Sicht der Pflanzenwurzel“ gerecht wird.

Bei höherem Carbonatgehalt dominiert dieser in starkem Maß die Bodenentwicklung und Standortsqualität, bei niedrigem Carbonatgehalt (< 10 %) werden Bodenentwicklung und Standortsqualität in starkem Maß vom Basengehalt der an der Gesteinszusammensetzung beteiligten Minerale und hier wiederum v. a. der Silikate dominiert.

Die Gesteine mit höheren Carbonatgehalten werden im Weiteren nach Zusammensetzung und Menge der Nichtcarbonate bzw. der Residuen nach der Verwitterung gegliedert. So werden die Mergel mit Carbonatgehalten zwischen 10 und 35 % als Mergeltone bzw. Tonmergel (Wert 5) eingeordnet, wenn die Verwitterungsresiduen v. a. tonig sind, als Sandmergel (Wert 6), wenn die Residuen vor allem sandig sind und bei Carbonatgehalten zwischen 35 und 65 % und entsprechend geringen Residuen als (kalkige) Mergel (Wert 7) bezeichnet. Sind die Residuen noch geringer, bei Carbonatgehalten über 65 %, so werden sie in Abhängigkeit des Chemismus als Kalke (Wert 8) bzw. Dolomite (Wert 9) bezeichnet. Bei Carbonatgehalten unter 10 % wird der Charakter der Residuen stärker betont. Sind diese sehr tonreich (> 45 %), so werden sie der Gruppe der Tone (Wert 4) zugeordnet. Bei geringeren Tongehalten wird nach dem Basenreichtum in basenreiche Silikate (Wert 3), intermediäre, carbonatarme oder -freie Silikate (Wert 2) oder saure quarzreiche Gesteine (Wert 1) aufgeteilt. Alle Gesteine, die nicht nach diesen Kriterien gegliedert werden können, erhalten den Wert 0. Ursache für eine Nicht-Einteilung können an der Heterogenität des Substrats oder am Fehlen von Carbonaten, Silikaten und Quarzen, wie es beispielsweise bei den Mooren der Fall ist, liegen.

Diese Einteilung wurde so gewählt, dass die substratchemischen Gruppen den Bodenentwicklungsreihen im Sinne von Rehfuess (1990) zugeordnet werden können (Tab. 2). Beispielsweise können die Kalke (8) und Dolomite (9) der „Rendzina-Terra fusca-(Parabraunerde)-Entwicklungsreihe, die drei Mergelgruppen (5-7) der Pararendzina-Parabaunerde-(Pseudogley)-Entwicklungsreihe usw. zugeordnet werden.

2.1.3.3 Substratphysik (3. Ziffer)

Die substratphysikalische Kennziffer zielt vor allem auf die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens, als wichtige Größe für die Standortsqualität, ab. Für die Beurteilung werden folgende drei Größen herangezogen:

1. Mineralbodenmächtigkeit bis zum C-Horizont
2. Skelettgehalt des obersten Mineralbodenhorizonts
3. die nFK des obersten Mineralbodensubstrats.

Die Ziffer 1 wird vergeben für geringmächtige Böden mit skelettreichen Oberböden und geringer nFK, die Ziffer 3 für tiefgründige, feinerdereiche Böden und hoher nFK im Oberboden (Tab. 3).

Tab. 2: Substratchemische Gliederung. Die Einteilung wurde vor allem nach pedologischen Kriterien gegliedert und orientiert sich an den Bodenentwicklungsreihen nach Rehfuess (1990). Hierdurch kann ein engerer Bezug zwischen Geologie und Potential für die Boden- bzw. Standortsentwicklung erstellt werden. Sie gibt grobe Hinweise für das Potential der Nährstoffnachlieferung und -verfügbarkeit.

Tab. 2: *Characterisation of substrate chemistry. The classification was structured according to pedological criteria and is based on the soil development series according to Rehfuess (1990). This allows a closer link between geology and the potential for the development of soils or site types, respectively. It also provides rough indications for the potential of nutrient supply and availability.*

Carbonatgehalt	weitere Merkmale	Substratchemie	typ. Bodenentwicklungsreihen	Ziffer
0 %	sauer, quarzreich, silikatarm	Saure, quarzreiche Gesteine	Ranker-(Regosol)-Podsol-(Gley- und Moor)	1
	intermediäre Silikate	Intermediäre, carbonatfreie Silikate oder Siliziklaste	Ranker-(Regosol)-Braunerde-(Gley, Pseudogley)	2
< 10 %	basenreiche Silikate	Basenreiche Silikate oder Siliziklaste		3
	tonreich	Tone	Pelosol	4
10-35 %	Nichtcarbonatanteil eher tonig	Mergeltone/Tonmergel	Pararendzina-Parabraunerde-(Pseudogley)	5
	Nichtcarbonatanteil eher sandig	Sandmergel		6
35-65 %	Nichtcarbonatanteil gering	(Kalk)-Mergel		7
> 65 %	überwiegend kalkig	Kalke	Rendzina-Terra fusca-(Parabraunerde)	8
	überwiegend dolomitisch (>50%)	Dolomite		9
Carbonatgehalt heterogen oder nicht differenzierend		Moore und heterogene Substrate	-	0

Tab. 3: Substratphysikalische Gliederung. Diese Gliederung soll vor allem das Potential für den Wasserhaushalt charakterisieren.

Tab. 3: Characterisation of substrate physics. This classification primarily characterizes the potential for the storage of plant available water.

Gründigkeit	Skelettgehalt	Verwitterungsrückstand	nFK	Ziffer
flachgründig	skelettreich	rückstandsarm	gering	1
mittelgründig	mittlerer Skelettgehalt	mäßig rückstandsreich	mittel	2
tiefgründig	skelettarm	rückstandsreich	hoch	3
sehr heterogen				0

2.1.3.4 Substrattypen

Für die Ausscheidung von Substrattypen werden jeweils die geologischen Einheiten zusammengefasst, die potentiell vergleichbare pedogenetische Entwicklungen erwarten lassen. Hierbei werden die drei beschriebenen Parameter Geogenese, Substratchemie und Substratphysik kombiniert. Jede Bewertung wird mit einer Ziffer belegt, so dass jeder Substrattyp durch eine dreiziffrige Zahl dargestellt ist.

In den Bayerischen Alpen konnten so 291 Einheiten der geologischen Karte zu 34 Substrattypen zusammengefasst werden. Insgesamt konnte das bisher bewertete Gebiet, welches die Kalkalpenanteile von Oberösterreich, Salzburg, Bayern und Tirol sowie Liechtenstein umfasst, mit 110 Substrattypen bewertet werden. Die 58 häufigsten, die jeweils mehr als 10 km², einnehmen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tab. 4: Liste der Substrattypen, die auf mindestens 10 km² im bisher bewerteten Gebiet Bayerns, Tirols, Salzburgs, Oberösterreichs und Liechtensteins vorkommen.

Tab. 4: *List of substrate types that occur on at least 10 km² in the up to now assessed area of Bavaria, Tyrol, Salzburg, Oberösterreich and Liechtenstein.*

Substrattyp	Substratname	Fläche [km²]
0	Gewässer, Gletscher, Siedlungen	199
210	Saure, quarzreiche Festsedimente	11
211	Saure, quarzreiche Festsedimente, rückstandsarm	17
212	Saure, quarzreiche Festsedimente, mäßig rückstandsreich	38
222	Intermediäre, carbonatfreie Siliziklaste, mäßig rückstandsreich	15
243	Tongesteine, rückstandsreich	29
253	Mergeltone und Tonmergel, rückstandsreich	177
261	Sandmergel, rückstandsarm	66
262	Sandmergel, mäßig rückstandsreich	129
263	Sandmergel, rückstandsreich	445
270	Mergel	21
272	Mergel, mäßig rückstandsreich	99
273	Mergel, rückstandsreich	910
280	Kalke	10
281	Kalke, langsam verwitterbar	1725
282	Kalke, mäßig rückstandsreich	917
283	Kalke, rückstandsreich	59
291	Dolomite, rückstandsarm	2622
292	Dolomite, mäßig rückstandsreich	42
293	Dolomite, rückstandsreich	12
303	Moränen, rückstandsreich	200

Substrattyp	Substratname	Fläche [km²]
322	Intermediäre, carbonatfreie siliziklastische Moränen, mäßig rückstandsreich	15
362	Sandig-mergelige Moränen, mäßig rückstandsreich	16
363	Sandig-mergelige Moränen, rückstandsreich	16
370	Mergelige Moränen	44
372	Mergelige Moränen, mäßig rückstandsreich	35
373	Mergelige Moränen, rückstandsreich	732
382	Kalkige Moränen, mäßig rückstandsreich	309
383	Kalkige Moränen, rückstandsreich	16
402	Hangschutte, mäßig rückstandsreich	188
472	Mergelige Hangschutte, mäßig rückstandsreich	277
473	Mergelige Hangschutte, rückstandsreich	16
481	Kalkige Hangschutte, rückstandsarm	86
482	Kalkige Hangschutte, mäßig rückstandsreich	306
483	Kalkige Hangschutte, rückstandsreich	26
491	Dolomitische Hangschutte, rückstandsarm	58
492	Dolomitische Hangschutte, mäßig rückstandsreich	183
503	Rutschungen, rückstandsreich	38
573	Mergelige Rutschungen, rückstandsreich	103
580	Kalkige Rutschungen	39
583	Kalkige Rutschungen, rückstandsreich	41
593	Dolomitische Rutschungen, rückstandsreich	39
601	Flusssedimente, rückstandsarm	64
602	Flusssedimente, mäßig rückstandsreich	75
603	Flusssedimente, rückstandsreich	189
620	Intermediäre, carbonatfreie siliziklastische Flusssedimente	16
661	Sandig-mergelige Flusssedimente, rückstandsarm	39
662	Sandig-mergelige Flusssedimente, mäßig rückstandsreich	26
670	Mergelige Flusssedimente	60
671	Mergelige Flusssedimente, rückstandsarm	15
672	Mergelige Flusssedimente, mäßig rückstandsreich	213
673	Mergelige Flusssedimente, rückstandsreich	278
680	Kalkige Flusssedimente	78
681	Kalkige Flusssedimente, rückstandsarm	27
682	Kalkige Flusssedimente, mäßig rückstandsreich	91
691	Dolomitische Flusssedimente, rückstandsarm	27
773	Mergelige See- und Meeressedimente, rückstandsreich	17
903	Moore	88

2.1.3.5 Hierarchiefreiheit der Gliederung

Die hier vorgestellte Substratklassifizierung unterscheidet sich von Bodenklassifizierungssystemen unter anderem dadurch, dass sie hierarchiefrei ist. Hierdurch kann eine Abfrage auf jeder Gliederungsebene beginnen und ist am besten durch einen Würfel dreidimensional darstellbar (Abb. 3). So kann beispielsweise nach allen festen Sedimentgesteinen gefragt werden, die durch die Kennziffern „2YZ“ gekennzeichnet sind oder nach allen Substraten, die flachgründig, skelettreich und mit geringer nFK verwittern mit den Kennziffern „XY1“ abgefragt werden.

Die geringe Zahl der benutzten Parameter ermöglicht eine übersichtlichere Kartendarstellung und einfachere elektronische Datenverarbeitung.

Das System ist offen für eine Verfeinerung in weitere Gliederungsebenen oder weitere Schlüsselgrößen, wie beispielsweise die im tiroler System schon vorhandene Skelettcharakterisierung oder die Erodierbarkeit. Hierdurch kann eine feinere Differenzierung der Substrate erreicht werden.

2.1.3.6 Vorteile dieses Ansatzes

Das vorgestellte Klassifizierungsverfahren kann auf mittel- und großmaßstäblicher Ebene Standorte einheitlich darstellen, v. a. kann dies auch länderübergreifend erfolgen, selbst wenn den geologischen Karten unterschiedliche Maßstäbe und unterschiedliche Interpretationen zugrunde liegen. So können beispielsweise nach geringer Überarbeitung im Hinblick auf die Nährstoffnachhaltigkeit von Standorten leicht die Regionen erkannt werden, die eine intensivere Nutzung unter Beibehaltung des Nachhaltigkeitsprinzips zulassen. Das System ist jedoch nicht geeignet, um kleinmaßstäbliche Aussagen auf Bestandesebene zu treffen. Siehe auch Kap. 2.1.2..

3 Interpretation der Substratkarte

3.1 Interpretation der Substratchemie

Substratchemie und Substratphysik sind nicht völlig unabhängig, was auf der Tatsache beruht, dass im allgemeinen Mergel rascher zu einem tiefgründigen und steinfreien Bodensolum verwittern als Kalke und Dolomite. Dies erlaubt es, für eine regionale Betrachtung zunächst auf die Substratchemie zu fokussieren.

Erstmals ist es möglich, in den nördlichen Kalkalpen länderübergreifend das Ausgangssubstrat für die Bodenentwicklung und Standortsqualitäten vergleichbar darzustellen. In Abbildung 4 ist der Gesteinschemismus in den Grenzgebieten zwischen Bayern, Tirol, Salzburg und Oberösterreich dargestellt. Trotz der unterschiedlichen Datengrundlagen sind kaum Grenzeffekte zu erkennen. Tabelle 5 zeigt an, wie die Bundesländer bzw. Länder sich in der Substratchemie unterscheiden und wie passend der Name „Kalkalpen“ ist.

In der Verteilung der Substrate lassen sich deutliche Muster erkennen. So dominieren am Alpenrand, mit Ausnahme des Allgäus, die Mergel der Flyschzone. Im eigentlichen südlich davon gelegenen Kalkalpin treten mergelige Sedimente zurück zugunsten von Kalken und Dolomiten. Die mergelgeprägten Randalpen zeichnen sich im Gegensatz zu den kalkalpinen schroffen Hochgebirgs-Landschaftsformen durch weiche mittelgebirgsartige Landschaftsformen aus. Schon dieser grobe Überblick gibt einen ersten standörtlichen Eindruck, in welchen Landschaften die wüchsigeren Standorte zu finden sind, die dann auch i. d. R. intensiver und dennoch nährstoffnachhaltig genutzt werden können (Kolb et al. 2017). Der Unterschied ist so markant, dass in der Wuchsregionengliederung nach Kolb & Göttlein (2014) diese mergelgeprägten Voralpen, trotz ihrer mittelgebirgsartigen Morphologie, mit den ebenfalls durch Mergel geprägten Jungmoränen des Voralpenlands zusammengefasst werden.

In den Kalkalpen dominieren mit 58 % die dunkelgelben Farben der Kalke sowie die hellgelben Farben der Dolomite. Trotz des Namens Kalkalpen liegen die Anteile an Kalken und Dolomiten fast gleich hoch. Zusammen mit den 34 % an Mergeln (kalkige Mergel, Sandmergel und Tonmergel) decken diese Substrattypgruppen 92 % der Fläche ab.

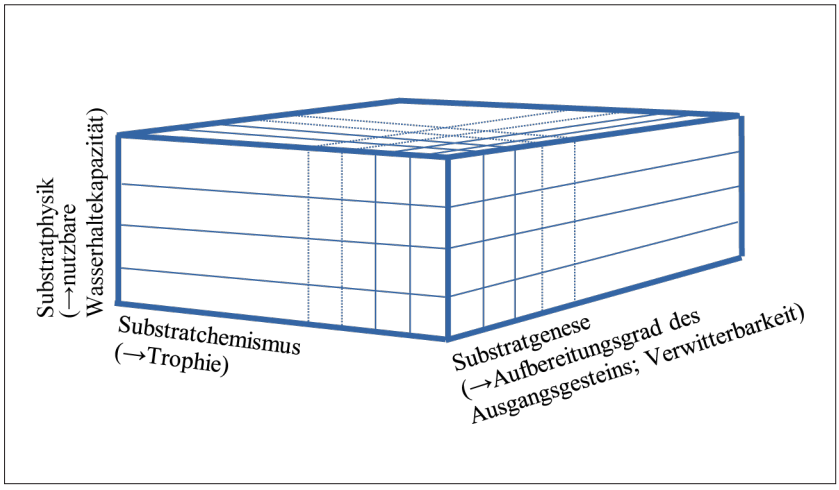

Abb. 3: Der Würfel zeigt die hierarchiefreie Darstellung der drei Kenngrößen der Substrattypen. Jeder Teilwürfel wird jeweils durch Substratgenese, -chemie und -physik als dreifferiges System charakterisiert. Die Reihenfolge der Abfrage ist nicht entscheidend für das Ergebnis. Es muss auch nicht nach allen drei Parametern gefragt werden. Beispielsweise könnte man nur nach flachgründig verwitternden Böden fragen, indem nach der Substratphysikziffer mit dem Wert „1“ gefragt wird. Bildlich würde das einer Scheibe des Würfels entsprechen.

Fig. 3: The cube shows the hierarchical representation of the three characteristics of the substrate types. Each partial cube is characterized by substrate genesis, chemistry, and physics as a three-parameter system. It is not necessary to ask for all three parameters. For example, one could only ask for shallow weathered soils by selecting the substrate physics number “1” which is represented by one slice of the cube.

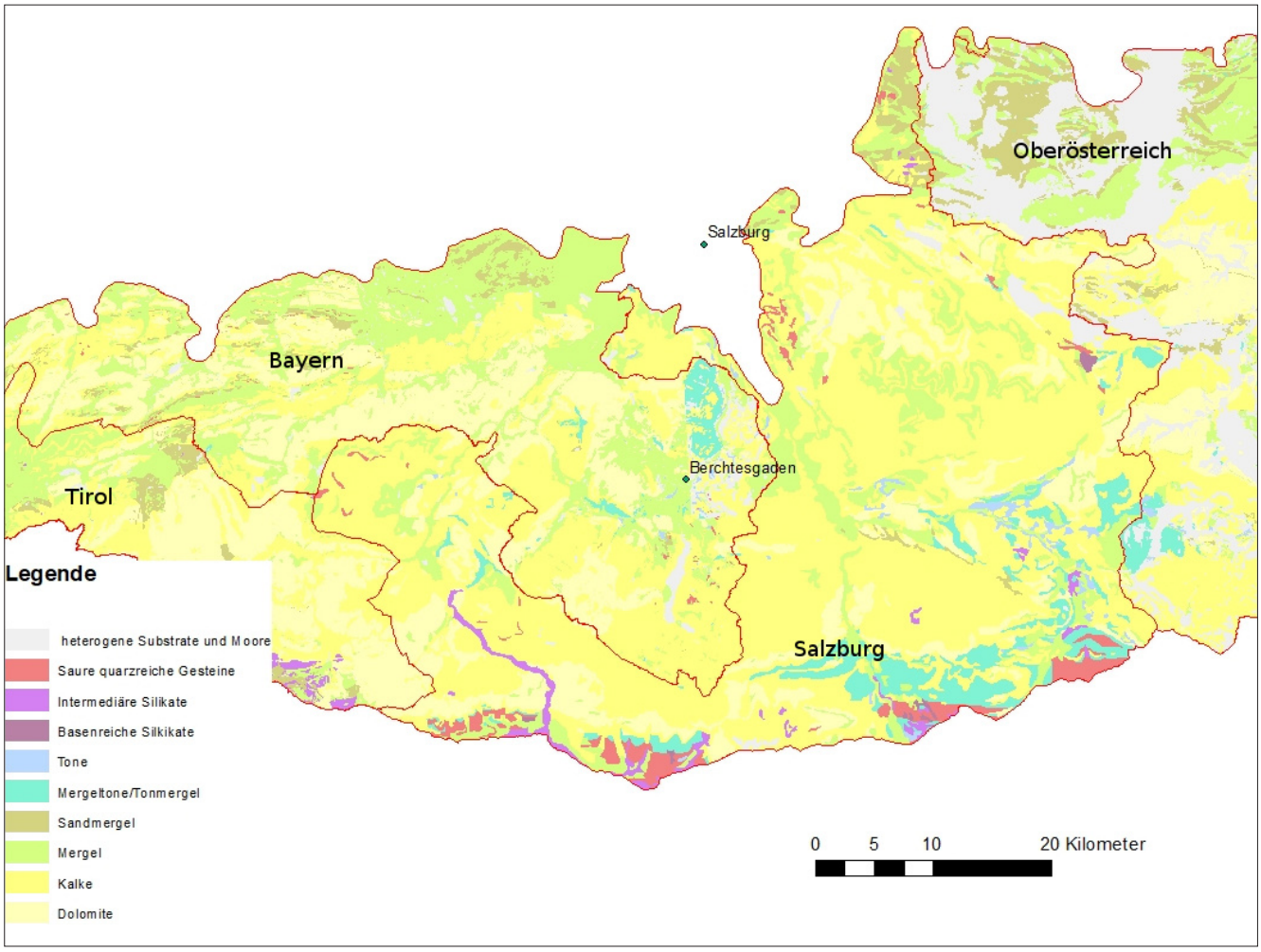

Abb. 4: Länderübergreifende Darstellung der Substratchemie im Bereich von Bayern, Tirol, Salzburg und Oberösterreich. Trotz der unterschiedlichen Vorgehensweise der geologischen Landesämter und den unterschiedlich verwendeten Maßstäben, sind auf großen Teilen der Landesgrenzen keine „Grenzeffekte“ zu erkennen.

Fig. 4: *Representation of substrate chemistry in the region of Bavaria, Tyrol, Salzburg and Oberösterreich. Despite the different approaches of the geological surveys and the different scales used in the different countries, no “border effects” can be seen on large parts of the country’s borders.*

Tab. 5: Anteile der zusammengefassten Substrattypgruppen Kalke/Dolomite (= hochprozentige Carbonatgesteine), Mergel und Silikate.

Tab. 5: *Percentage of the substrate type groups limestone/dolomite (= high-percentage carbonate rocks), marls and silicates.*

[%]					[km²]
Bundesland/Land	Kalke und Dolomite	Mergel	Silikate	nicht bewertet	Gesamtfläche
Bayern	51	45	0	3	4597
Tirol	75	21	3	1	1627
Salzburg	73	21	5	1	1949
Oberösterreich	50	25	0	25	3427
Liechtenstein	42	55	3	0	165
Mittelwert	58	34	2	6	

3.2 *Interpretation der Substratphysik*

In der kalkalpinen Zone dominieren Kalke und Dolomite nicht nur flächenmässig, sondern prägen aufgrund ihrer Verwitterungsresistenz ganz entscheidend das Landschaftsbild. In Abbildung 5 sind die Substratkennziffern in grau aufgetragen. Mit einiger Ortskenntnis hat man oft den Eindruck, eine topografische Karte vor sich zu haben. Das ist kein Zufall, da die Kenngrößen, die zur physikalischen Kennziffer 1 führen, eine langsame, flachgründige und skelettreiche Bodenentwicklung und damit gleichzeitig auch eine langsamere Tieferlegung der Landschaft durch Erosion bedingen, da immer nur das vorhandene Bodensolum erodiert werden kann. Die Erosionskraft der Gletscher wirkt sich im Alpenraum v. a. auf die Landschaftsformung, weniger auf den flächigen Abtrag aus. Das liegt nicht nur an der relativ geringen erosiven Kraft, die oft überschätzt wird, sondern vor allem an der geringen Zeit, die in den Eiszeiten zur Verfügung stand, verglichen mit dem langen Zeitraum im Tertiär, in dem im Alpenraum ein subtropisches Klima herrschte.

Die Kalke und Dolomite, die besonders langsam verwittern – also mit der physikalischen Kennziffer 1 charakterisiert werden, werden als Substrattyp „Hartkalk“ bzw. „Hartdolomit“ mit den Substrattypziffern 281 bzw. 291 bezeichnet. Vergleichbare rückstandsarme Verwitterung findet man in Mitteleuropa ausserhalb der Alpen eher selten, v. a. noch in den Schwamm- bzw. Riffkalken des Oberen Jura. Rückstandsreichere Kalke (Substrattyp 282) und Dolomite (Substrattyp 292), die für viele mitteleuropäische Kalke aus dem Muschelkalk und Jura typisch sind, finden sich in den Nördlichen Kalkalpen seltener. Aufgrund ihres i. d. R. flachgründigen Bodensolums in Kombination mit einer hohen Basensättigung bis in den Oberboden, die aber v. a. durch Calcium bzw. Calcium und Magnesium dominiert wird, handelt es sich um sensible Standorte. Ist zu wenig Feinerde vorhanden, bilden sich mächtige Tangelhumusauflagen (Kolb & Kohlpaintner 2018), die besonders nach Sturm oder Kahlschlag leicht gestört, erodiert und abgebaut werden.

Interessant wird die Interpretation da, wo sie nicht, wie oben beschrieben, einer topografischen Karte entspricht (Pfeile in Abb. 5). Das ist beispielsweise am Allgäuer Hauptkamm der Fall (= Landesgrenze südöstlich von Oberstdorf), wo trotz

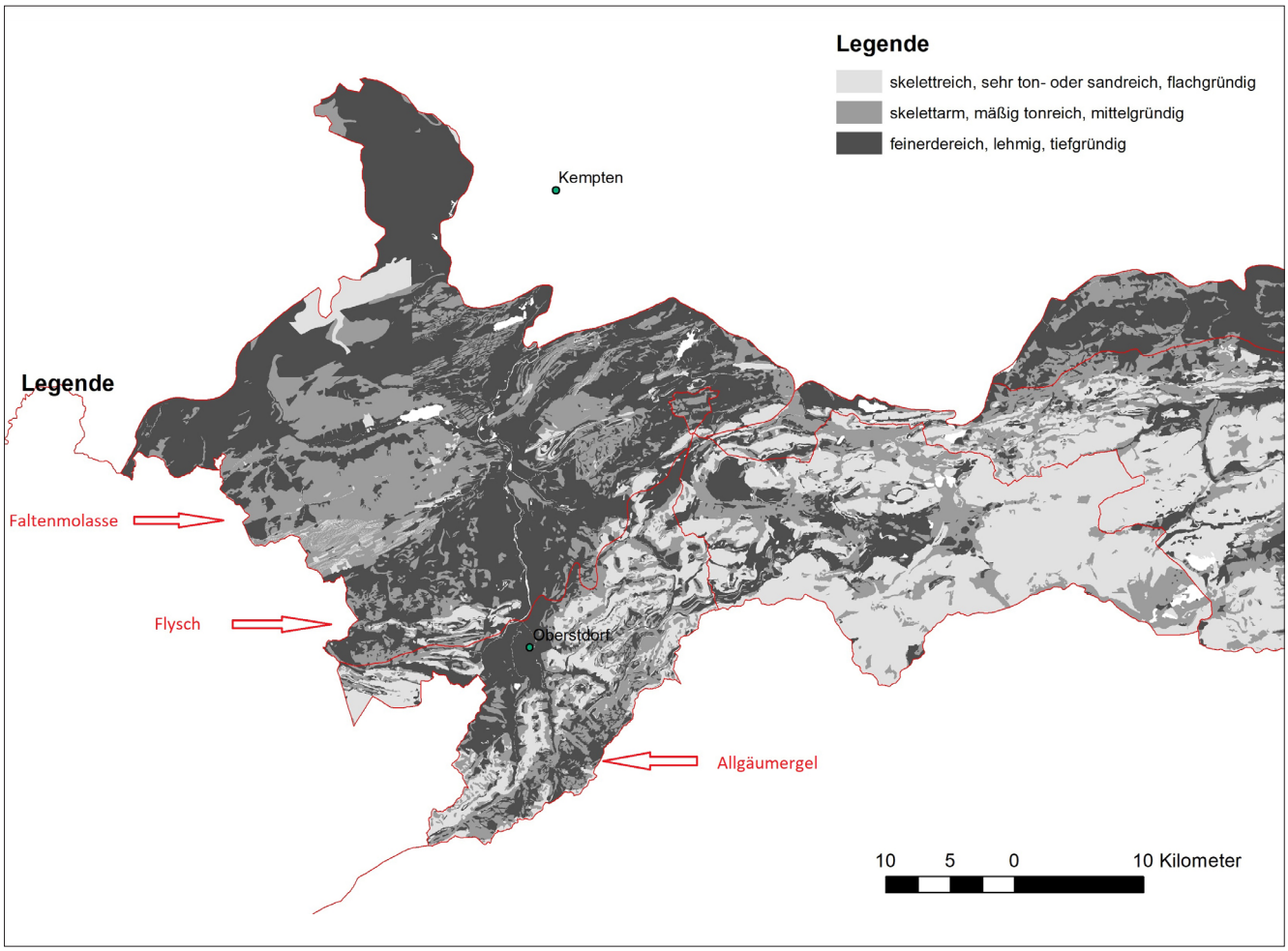

Abb. 5: Substratphysik des Allgäus. Die Verwitterungsresistenz der Gesteine bestimmen einerseits die Bodenentwicklung aber auch die Landschaftsformen. Daher wirkt die substratphysikalische Karte oft wie eine topografische Karte. Je heller die Einfärbung desto gipfelbildender sind die Gesteine. Interessant sind daher vor allem die Ausnahmen (Pfeile). Hier finden sich großflächige feinerdereich verwitternde Substrate in größeren Meereshöhen.

Fig. 5: *Substrate physical map of the Allgäu. The weathering resistance of the rocks determines soil development as well as landscape forms. Therefore, the substrate physical map often looks like a topographic map. The brighter the grey the more peak building are the rocks. Interesting are the exceptions (arrows). Here you will find large areas with fine-weathered substrates high above sea level.*

großer Höhen dunkle Farben für feinerdereich verwitternde Substrate dominieren. Hier konnten sich liassische Fleckenmergel, auch als Allgäuschichten bezeichnet, auf großen Flächen erhalten. Sie sind die geologische Grundlage der „Allgäuer Grasberge“, da sie über der Waldgrenze liegen, tragen sie keine Wälder, und sind berühmt für ihre Flora, die sich daher so deutlich von der Flora der naheliegenden Dolomitberge unterscheiden.

Aber auch die Region nordwestlich von Oberstdorf zeichnet sich auf großer Fläche durch dunkle Farben auf der Karte, also feinerdereich verwitternde Substrate aus, obwohl auch hier keine geringeren Höhen als in dem nördlich davor gelegenen Gebiet anzutreffen sind, welches in mittelgrauen Farben gekennzeichnet ist. Es handelt sich hier um Flyschgesteine, die in der Regel sehr viel toniger verwittern als die nördlich davor liegenden Molassegesteine.

3.3 Interpretation der Substratgenese

Die Interpretation der substratgenetischen Karte zeigt, dass die fluviatilen und glazifluviatilen Sedimente v. a. in den Tallagen zu finden sind und damit grob das Gewässernetz nachzeichnen (Abb. 6). Die fluviogravitativen und gravitativen Sedimente (v. a. Hangschutte und Muren) finden sich vor allem in der Flyschregion (Flysch ist ein schweizer Begriff, der für Fließen steht) und in den Dolomitregionen, da Dolomit in den Nördlichen Kalkalpen eher zu Feinschutt verwittert, verglichen mit der deutlich blockigeren physikalischen Verwitterung vieler Kalkgebiete, hier v. a. der Hartkalke (281). Die Moränenablagerungen finden sich v. a. in den Tälern oder am Alpenrand, also in eher tieferen Lagen. Das scheint zunächst widersprüchlich, da die Vergletscherung in den höheren Lagen verbreiteter war. In den tieferen häufig auch reliefärmeren Positionen waren sie aber weniger der Erosion ausgesetzt und konnten sich so besser erhalten. In den Nördlichen Kalkalpen kommt hinzu, dass in den großen Quertälern die großen Gletscher, die aus den Zentralalpen kamen, sich ihren Weg gesucht haben und entsprechend mächtige glaziale aber auch glazifluviatile Sedimente abgelagert haben.

3.4 Beispiele für weitergehende Interpretationen

3.4.1 Interpretation der Nährstoffnachhaltigkeit

Da den Substrattypen v. a. durch die bodenchemische Charakterisierung Bodenentwicklungsreihen zugeordnet

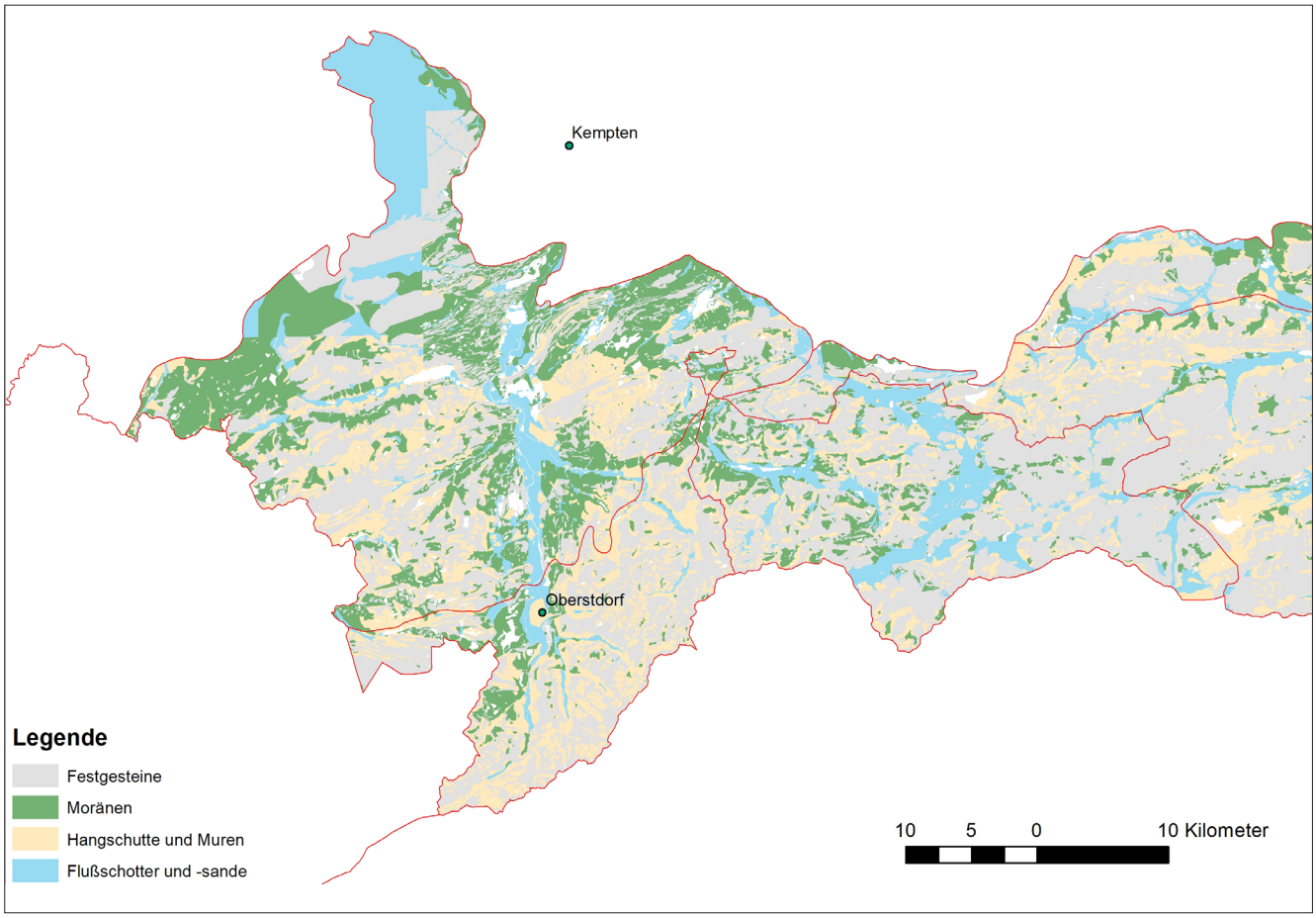

Abb. 6: Die Substratgenese charakterisiert vor allem Lockersedimente. Die fluviatilen Sedimente finden sich erwartungsgemäß in den Tälern und zeichnen das heutige Gewässernetz nach. Die Hangschutte und Muren finden sich vor allem in den Flyschgebieten sowie dort, wo Dolomite verbreitet sind. Moränen finden sich oft in tieferen Lagen an Unterhängen und am Alpenrand, weil sie dort besser erhalten blieben.

Fig. 6: *Substrate genesis mainly characterizes unconsolidated sediments. As expected, the fluvial sediments are found in the valleys and trace the current water network. Landslides and mudflows are mainly found in flysch areas and in regions where dolomites are widespread. Moraines are often found in lower elevations and at the edge of the Alps, because they were preserved there.*

sind, ist es möglich, sie auf ihre Empfindlichkeit bezüglich Nährstoffentzügen einzuteilen. Bewertet wird mit Expertenwissen, ob mindestens ein oder mehrere Nährstoffe bei der Nutzungsintensität „Derbholz mit Rinde“ in Mangel kommen könnte (Kolb & Göttlein, 2012, 2016, Kolb et al., 2017). Eine erste Einschätzung zeigt Abbildung 7 sowie Tabelle 6. Hierbei werden Braunerden, Terrae fuscae, Pseudogley-Braunerden, Pseudogleye, Gley-Braunerden oder Kalk-Paternien als schwach empfindlich bis unempfindlich bewertet. Dagegen werden Rendzinen, Braunerde-Rendzinen, Pararendzinen, podsolige Braunerden oder Ramblen als empfindlich eingestuft. Als sehr empfindlich gegenüber Nährstoffentzug werden Fels- oder Skeletthumusböden, Kalk- oder Dolomit-Syroseme oder Podsole bewertet. Der Anteil von Standorten, die bei der derzeit üblichen Nutzungsintensität „Derbholz mit Rinde“ nicht nachhaltig genutzt werden kann, liegt im dargestellten Gebiet bei 51 %. An dieser Stelle sei noch einmal an den Maßstab der Karte erinnert: die Karte wurde aus geologischen Karten im Maßstab zwischen 1:25.000 bis 1:200.000 entwickelt, daher sind die Polygone teilweise recht aggregierend. D. h. auch auf einer orange eingefärbten Fläche kann es kleine Teilbereiche geben, wo dennoch eine nachhaltige Nutzung möglich ist und umgekehrt.

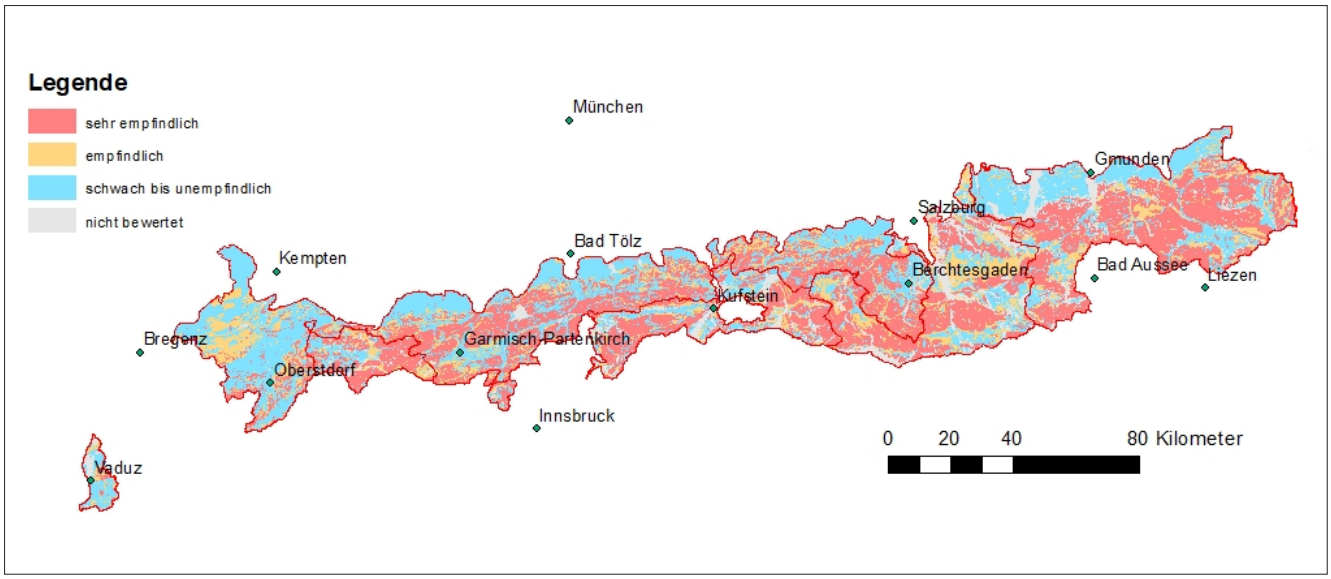

Abb. 7: Die Karte zeigt die Verteilung Substrate im Hinblick auf das Nährstoffnachlieferungsvermögen unter der Annahme einer Nutzungsintensität „Derbholz mit Rinde“. Bei den beiden empfindlichen Standortskategorien (orange und rot) muss damit gerechnet werden, dass schon nach wenigen Durchforstungen mindestens ein Nährstoffmangel das Wachstum der Bäume begrenzen wird. Sie zeigt auch, dass es Gunsträume der Nutzung gibt. Diese befinden sich am Alpenrand und sind wesentlich von Flyschmergeln bestimmt, die im Rheintal nach Süden umbiegen und dort im Westen Liechtensteins entlangstreichen.

Fig. 7: *The map shows the distribution of substrates with respect to nutrient supply capacity, assuming a usage intensity of compact wood with minimum diameter of 7 cm including the bark. For the two sensitive site categories (orange and red) it is expected, that at least one nutritive element will limit the growth of the trees after only a few thinnings. It also shows that there are favorable areas for biomass use. These are located at the edge of the Alps and largely bound to marls from the flysch zone, that bend in the Rhine Valley to the south to reach the west of Liechtenstein.*

Tab. 6: Die Tabelle zeigt die prozentualen Anteile der in Abbildung 7 dargestellten Empfindlichkeitsklassen in den jeweiligen Bundesländern bzw. Ländern.

Tab. 6: *This table shows the percentages of the sensitivity classes shown in Figure 7 in the respective federal states or countries.*

[%]					[km²]
Bundesland/ Land	sehr empfindlich	empfindlich	schwach bis unempfindlich	nicht bewertet	Gesamtfläche
Bayern	35	16	47	2	4597
Tirol	49	14	24	13	1627
Salzburg	41	22	20	17	1948
Oberösterreich	44	12	34	10	3427
Liechtenstein	8	18	60	15	165
Mittelwert	35	16	37	11	

3.4.2 Charakterisierung empfindlicher Tangelhumusflächen

Die Informationen der Substratkarte können mit einem digitalen Höhenmodell verschnitten werden um abzuschätzen, wie groß der Anteil potentieller Tangelhumusflächen ist. Das ist angesichts des aktuellen ausgeprägten Humusschwunds im Gebirge von besonderem aktuellem Interesse, weil diese Humusform empfindlich auf Freilegung durch Sturm oder Kahlschlag reagiert, indem sich die Humusauflage teilweise zentimeterweise pro Jahr abbaut und erodiert wird (Mayer et al., 2016). Da darunter meist langsam verwitterbarer Kalk oder Dolomit liegt, ist der Verlust dieser Auflage besonders dramatisch für dieses Ökosystem, da für lange Zeit kein Waldwachstum mehr möglich ist. In den Kalkalpen stellen Tangelhumusböden den wesentlichen Teil des im Jahr 2018 proklamierten Boden des Jahres „Alpine Felshumusböden“ dar. Potentielle Flächen befinden sich über den schwer verwitterbaren Kalken und Dolomiten (= Hartcarbonate), die unter 2.000 m NN liegen und südexponiert sind. Tabelle 7 zeigt, dass 37 % aller Flächen von Hartcarbonaten unterlagert werden und immerhin 35 % der Flächen unter 2.000 m NN liegen, also in einer Höhenstufe, in der Wälder und Latschen-Alpenrosengebüsche gedeihen können. Mit 17 % aller Flächen liegt erwartungsgemäß etwa die Hälfte dieser Flächen auf der besonders kritischen Sonnseite (Abbildung 8).

3.5 Grenzen der Auswertung und Interpretation

3.5.1 Grenzen der räumlichen Auflösung

Die Substratklassifizierung baut auf geologischen Karten auf, die nie feiner als 1 : 25.000 aufgelöst sind. In vielen Ländern

Tab. 7: Dargestellt ist die Verteilung der Hartcarbonate auf die bearbeiteten Bundesländer bzw. Länder. Im Gesamtdurchschnitt liegt er bei 37 %. Der Anteil in der wald- und gebüschfähigen Stufe unter 2.000 m NN ist etwas geringer, wovon erwartungsgemäß die Hälfte, also 17 %, auf der Sonnseite liegen.

Tab. 7: *Distribution of hard carbonates in the processed federal states or countries. The overall average is 37%. The percentage in the area below 2000 m a.s.l. is slightly lower, of which, as expected, half (in total 17%) is facing to the south.*

	[km²]	[%]		
	Gesamtfläche	Hartcarbonate	Hartcarbonate <2.000 m ü NN	Hartcarbonate <2.000 m ü NN; südseitig
Bayern	4597	32	31	15
Tirol	1627	41	40	20
Salzburg	1949	37	30	14
Oberösterreich	3427	43	42	20
Liechtenstein	165	7	6	3
Gesamt	11765	37	35	17

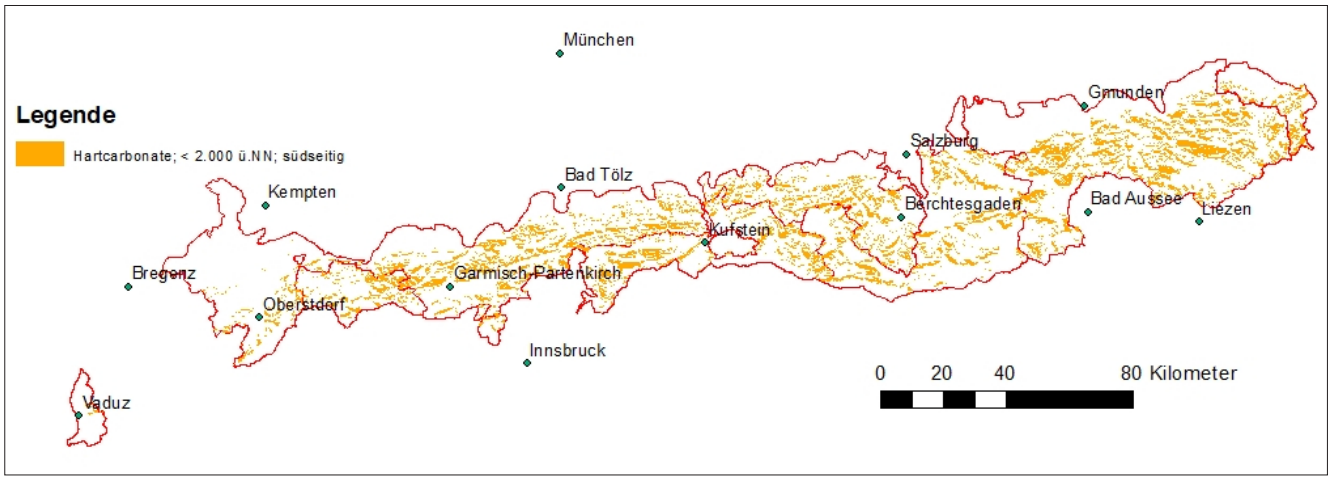

Abb. 8: Die orangen Flächen markieren die Hartcarbonatflächen unter 2.000 m NN, die südseitig exponiert sind. Man erkennt, dass diese ungleich verteilt sind. In den mergelreichen Gebieten der Randalpen des mittleren Salzburger Landes, des Allgäus sowie Liechtensteins kommen sie selten vor.

Fig. 8: *The orange areas represent hard carbonate sites below 2000 m a. s. l., which are exposed to the south. These areas are unevenly distributed. In the regions rich in marl situated in the Northern Alps of the middle Salzburg country, the Allgäu, as well as Liechtenstein hard carbonates are rare.*

liegen sie oft im Maßstab 1 : 50.000 vor. Da geologische Informationen in diesen Maßstäben nicht flächendeckend vorliegen, musste in Teilen der bayerischen, tiroler und oberösterreichischen Alpen zusätzlich auf geologische Übersichtskarten in Maßstäben zwischen 1 : 100.000 und 1 : 250.000 zurückgegriffen werden. In Deutschland liegen Forstbetriebskarten i. d. R. im Maßstab 1 : 10.000 vor. Aufgrund der geringeren räumlichen Auflösung der vorgestellten Standortsklassifikation sollen die daraus abgeleiteten Standortsinformationen nicht auf Bestandesebene interpretiert werden, auch wenn die digitale Verarbeitung der Karte ein punktgenaues Ablesen ermöglicht und damit eine höhere räumliche Auflösung suggeriert als tatsächlich gegeben ist. Die Klassifikation ist daher besonders geeignet für Entscheidungen auf forstlicher Betriebsebene oder auf überbetrieblicher Planungsebene.

3.5.2 Grenzen der Interpretation

Neben den zufälligen Fehlern, die auf dem langen Weg von der geologischen Kartierung im Gelände bis zum Drucken oder digitalen Bereitstellen der Karten passieren können, spielen systematische Interpretationsfehler eine Rolle.

So sind geologische Karten „abgedeckte" Karten, d. h. sie stellen die Gesteine dar, die wir sehen würden, wenn die obersten ein bis zwei Meter entfernt worden wären. Das ist geologisch sinnvoll, da meist Böden, Hangschutte und Staubeinwehungen die Erdoberfläche bedecken, die für die Interpretation der Entstehung der Gebirge, der Oberflächenformen oder Tektonik wenig aussagekräftig sind. Für den Landnutzer i. w. S. – Förster, Landwirte, Naturnutzer – sind aber gerade diese „flachen" Bodenbildungen oder Hangschutte von großer Bedeutung, stellen sie doch das entscheidende Substrat für ein Pflanzenwachstum dar. So kann beispielsweise eine 50 cm mächtige Kalklehmverwitterung über anstehendem Kalkgestein einen recht fruchtbaren Standort darstellen. In der Regel würden aber solche Standorte auf geologischen Karten mit den Farben oder Signaturen des darunterliegenden Kalks dargestellt werden. Vergleichbares gilt für Hangschutte und Lößauflagen.

Eine Interpretation der mit Lokalnamen bezeichneten „Schichten" oder „Formation" ist deutlich schwieriger und fehlerträchtiger als eine, die durch ein dominierendes Gestein geprägt sind. Raibler Schichten, Kössener Schichten oder Gutensteiner Schichten sind weitverbreitete Gesteinsformationen in den mittleren bayerischen Alpen. Im Gegensatz zum Wettersteinkalk, in dem Kalke dominieren oder dem Hauptdolomit, in dem Dolomite dominieren, dominiert hier keine Gesteinsart. So sind beispielsweise die Raibler Schichten zum einen aus klastischen Sedimenten aufgebaut, die von Schiefertonen über Silt- zu Sandsteinen reichen. Dazwischen kommen kleinbankig verschiedene Karbonatgesteine in Form verschiedener Kalke, Dolomite und Rauhwacken vor und selbst Gipse finden sich gelegentlich in frischen Aufschlüssen. Da die Raibler Schichten weit verbreitet sind, ändert sich deren Zusammensetzung erwartungsgemäß. Die für den Geologen wichtige Differenzierung ist für den Landnutzer oft nur mühsam zu interpretieren, teilweise sicherlich auch verwirrend. Die Substratklassifizierung enthebt den Nutzer dieser komplizierten Aufgabe, kann aber der Vielfalt der vorkommenden Raibler Schichten dennoch gerecht werden, indem diese beispielsweise vier verschiedenen Substrattypen zugeordnet werden, je nachdem wie kalkig oder dolomitisch und wie tonig oder sandig die jeweiligen Fazies auftreten.

Der Fehler kann hier in der eingeschränkten Erkennbarkeit der „durchschnittlichen" Zusammensetzung liegen als auch in der fehlerhaften Zuordnung zu einem Substrattyp. Letzteres liegt daran, dass Geologen solche komplexen Formationen v. a. an diagnostischen Horizonten beschreiben, beispielsweise einem grauschwarzen, pyritführenden Sandstein oder einer auffallend mächtigen Kalkbank. Diese bestimmen aber i. d. R. nicht den durchschnittlichen Charakter der Verwitterung, d. h. wie lehmig oder basenreich die Verwitterungsprodukte sind. Hier gibt es oft fließende Übergänge, so dass wie bei anderen Klassifikationen, die nicht-disjunkte Objekte klassifizieren – beispielsweise unsere deutsche Bodensystematik, eine gewisse Subjektivität in der Klassifizierung zu einem Substrattyp nicht zu vermeiden ist.

Eine letzte Unsicherheit in der Interpretation liegt in der Charakterisierung von Lockersedimenten v. a. der quartären Lockersedimente. Diese sind klassischerweise meist genetisch, also nach Hangschutt, Flussschotter oder Moränenablagerung beschrieben. Die Flussschotter sind mit einer Hochflutlehmdecke sehr fruchtbar, ohne dagegen deutlich weniger fruchtbar – hier ist dann das Wasserregime entscheidend. Die Mächtigkeit der Hochflutlehmdecke ist aber oft nur grob aus den Informationen abzuleiten, wenn überhaupt.

Der Substratchemismus wird in älteren geologischen Karten selten beschrieben. In diesen Fällen muss die Substratchemie aus dem Einzugsgebiet der jeweiligen Gewässer abgeleitet werden. Dies kann mit entsprechenden Modellen aus einem GIS einzugsgebietsweise berechnet werden. In kleinen Einzugsgebieten ist das oft auch einfach durch einen kurzen Blick auf eine geologischen Karte abschätzbar. Je höher der Anteil an Lockergesteinen gegenüber den Festgesteinen ist, desto schwieriger wird die automatisierte Abfrage aus Wassereinzugsmodellen eines GIS.

4 Literatur

Hintermaier-Erhard, G., Zech, W. (1997): Wörterbuch der Bodenkunde. Enke.

Kolb, E. (2012): Interaktive Karte der Gesteinseigenschaften in den Alpen. Eine neue Substratgliederung bringt schnelle Übersicht und viele Informationen über die Böden der Bayerischen Alpen. LWF-aktuell **87**: 15-17.

Kolb, E., Göttlein, A. (2012): Nährstoffnachhaltige Nutzung von Landschaften – Regionale Bewertung erntebedingter Nährstoffentzüge. AFZ-Der Wald **15**/2012.

Kolb, E., Göttlein, A. (2014): Vorschlag zur Anpassung der Forstlichen Wuchsregionengliederung Deutschlands an das Nutzungspotential der Böden. AFJZ, Jg. 11/12, **185**: 249-260.

Kolb, E., Göttlein, A. (2016): Nährstoffnachhaltige Bewirtschaftung – Nutzung von Geoinformation zur Identifikation kritischer Waldstandorte. In: Katzensteiner, K., Ewald, J., Göttlein, A. (Hrsg.): Wälder der Kalkalpen – Strategien für die Zukunft. Forstliche Schriftenreihe der Universität für Bodenkultur, Wien, Band **21**: 1-7.

Kolb, E., Insinna, P., Göttlein, A. (2017): Ableitung einer Nährstoffnachhaltigkeits-Karte für die Bewirtschaftung der Wälder des Fürstentums Liechtenstein. AFZ-Der Wald **7/2017**.

Kolb, E., Kohlpaintner, M. (2018): Tangel humus forms - genesis and co-evolution with vegetation. Applied Soil Ecology, **123**: 622-626. doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.040.

Mayer, M., Matthews, B., Katzensteiner, K. (2016): Humusdynamik auf Waldstandorten in den Nördlichen Kalkalpen. In: Katzensteiner, K., Ewald, J., Göttlein, A. (Hrsg.): Wälder der Kalkalpen – Strategien für die Zukunft. Forstliche Schriftenreihe der Universität für Bodenkultur, Wien, Band **21**: 39-59.

Rehfuess, K.-E. (1990): Waldböden – Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Parey.

Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., Streck, T. (2012): Bodenkunde und Standortlehre – Grundwissen Bachelor. Ulmer, Stuttgart.

submitted: 11.09.2019
reviewed: 02.12.2019
accepted: 04.12.2019

Autorenanschrift:

Dr. Eckart Kolb
Prof. Dr. Dr. Axel Göttlein
Fachgebiet Waldernährung und Wasserhaushalt der TU München

Korrespondierender Autor:
Dr. Eckart Kolb
H. C. v. Carlowitzplatz 2
85354 Freising

Tel.: +49 8161 71 4829

E-Mail: kolb@wzw.tum.de