

Ausweisung von Pedozonen für den Kanton Freiburg

KOBO-Bericht Nr. 14

Kompetenzzentrum Boden

April 2026

**Schweizweit engagiert
für eine wertvolle Ressource**

Impressum

Autor:innen: Dr. Thorsten Behrens, Dr. Karsten Schmidt, Dr. Felix Stumpf, Emilie Carrera, Urs Grob, Dr. Armin Keller.

Mitwirkende:

Thilo Dürr-Auster, Koordinationsgruppe Bodenschutz, Amt für Umwelt AfU Kanton Freiburg.
Adrian von Niederhäusern, Sektion Landwirtschaft, Grangeneuve.

Erscheinungsjahr: 2026

Herausgeberschaft: Kompetenzzentrum Boden (KOBO), ccsols.ch.

Das KOBO arbeitet im Auftrag der drei Bundesämter für Umwelt (BAFU), für Landwirtschaft (BLW) und für Raumentwicklung (ARE). Angesiedelt ist das KOBO an der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL) der Berner Fachhochschule (BFH) in Zollikofen.

Titelbild: Ausschnitt der Gliederung des Kantons Freiburg in acht Pedozonen. © KOBO

Layout: Fabrice Wullschleger.

Empfohlene Zitierweise: Behrens T., K. Schmidt, F. Stumpf, E. Carrera, U. Grob und A. Keller (2026): Ausweisung von Pedozonen für den Kanton Freiburg. KOBO-Bericht Nr. 14, BFH-HAFL, CH-3052 Zollikofen-Bern, verfügbar unter <https://ccsols.ch/de/downloadcenter/>

Copyright: Gemäss untenstehendem Creative Commons-Lizenzsymbol ist die nicht-kommerzielle Vervielfältigung erwünscht, jedoch mit Quellenangabe und einem Belegexemplar an die Herausgeberschaft. Die Weitergabe erfolgt nur unter gleichen Lizenzbedingungen.



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
1. Was sind Pedozonen?	4
2. Datengrundlagen	6
2.1 Fernerkundung	6
2.2 Multiskalige Terrainanalysen	8
2.3 Schweizweite Bodeneigenschaftskarten	9
3. Ausweisung von Pedozonen und Analyse	11
4. Repräsentanz FRIBO-Messnetz und Beprobungskonzept	18
5. Ausweisung von repräsentativen Teilflächen innerhalb der Pedozonen	21
6. Spektroskopische Messungen	23
7. Schlussfolgerungen	24
Bibliografie	27

1. Was sind Pedozonen?

Wenn Gebiete in der Grössenordnung eines Kantons (also mehrere 1'000 km² gross) kartiert werden sollen, ist es wichtig eine effiziente, aber qualitativ zufriedenstellende Vorgehensweise zu wählen. Eine Möglichkeit ist, das Gebiet in Zonen einzuteilen. Für die Feldarbeiten einer Bodenkartierung ist es von Vorteil, wenn bereits in der Konzeptphase auf Basis aller verfügbaren Geo- und Umweltdaten zu kartierende Gebiete in möglichst **pedogenetisch homogene Pedozonen** gegliedert werden können. Dies bedeutet, dass innerhalb einer Pedozone die Eigenschaften und Standortfaktoren wie das Relief und das Klima der Böden ähnlicher sind als zwischen verschiedenen Pedozonen. Aus bodenkundlicher Sicht können Pedozonen auch als **Bodenlandschaften** verstanden werden.

Eine solche Klassenbildung von Regionen in Pedozonen erlaubt es, dass Kartierer:innen in pedogenetisch ähnlichen Kartierlosen arbeiten können. Mit dieser Vorgehensweise können sie sich auf typische bodenbildende Faktoren innerhalb einer Pedozone eichen und die Qualitätssicherung der Feldarbeiten spezifisch auf eine Pedozone ausrichten. Die Qualität der erhobenen Bodeninformationen kann somit insgesamt verbessert werden. Zusätzlich ermöglichen Pedozonen für die Planung von grossräumigen Bodenkartierungen eine Optimierung. Mit Hilfe von Klima- und Landnutzungsdaten kann die zeitliche Etappierung der Feldarbeiten hinsichtlich verschiedener Landnutzungen und gegebenenfalls Höhenstufen effizienter eingeteilt werden. Pedozonen stellen damit in bodenkundlicher und organisatorischer Hinsicht die räumliche Grundlage für die Etappierung der Feldarbeiten dar und dienen einer **räumlich-zeitlich effizienten Planung**

der Feldkartierungen. Sie sind damit auch wichtig im Rahmen von Kostenschätzungen.

Im vorliegenden Fachbericht wurde die Klassifizierung der Böden im Kanton Freiburg in Pedozonen auf Basis der Methode von Behrens et al. (2009) und Schmidt et al. (2010) durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden für den Kanton Freiburg neue bodenrelevante **Umwelt- und Geodaten** aufbereitet. Dies schliesst **multiskalige Terrainanalysen (TerraPoly)** und Datenprodukte aus der **Fernerkundung** mit ein (Stumpf et al. 2023a) sowie **Hinweiskarten zu Bodeneigenschaften** (Textur, organisch gebundener Kohlenstoff, pH-Wert) in unterschiedlichen Tiefenzonen (0 – 30 cm, 30 – 60 cm, 60 – 120 cm) (Stumpf et al. 2023b, 2024).

Darüber hinaus hat das KOBO innerhalb der Pedozonen eine naturräumlich und pedogenetische repräsentative Teilfläche ermittelt, welche die Eigenschaften der Pedozone möglichst genau widerspiegelt. Solche repräsentativen Teilflächen eignen sich insbesondere für die Festlegung von Transekten (Catena), für Referenzprofile und für die Ausbildung von Fachpersonal für die Feldarbeiten einer Bodenkartierung.

Zudem wurde die **Repräsentativität** der Monitoringstandorte von dem kantonalen Bodenbeobachtungsnetz FRIBO (Petel et al. 2024) in Bezug zu den pedogenetischen Ausprägungen untersucht. An den 250 Standorten des FRIBO Messnetzes werden seit Mitte der 1980er-Jahre regelmässig Bodenproben aus drei Tiefen entnommen (Julien et al. 2002). So soll die zeitliche Veränderung der Bodenqualität anhand von Nähr- und Schadstoffgehalten und weiteren Bodeneigenschaften beurteilt werden. Pedologische Beschreibungen der FRIBO-

Standorte lagen bislang jedoch nicht vor. Diese Lücke wurde im Jahr 2022 weitgehend gefüllt, es wurden für rund 220 FRIBO Standorte pedologische Beschreibungen durchgeführt (Burgos et al. 2023). Die Repräsentativitätsanalyse der 220 FRIBO-Standorte liefert eine Grundlage, um den vorhandenen bodenkundlichen Datensatz aus dem FRIBO-Messnetz effizient mit weiteren gezielten Bohrungen zu erweitern, und damit die ganze Bandbreite vorkommender Böden im Kanton Freiburg abzudecken.

Für die 250 FRIBO Standorte hat das KOBO zudem Archivproben aus der FRIBO-Pedothek aus verschiedenen Erhebungszyklen ausgewählt und spektroskopische Messungen im Labor für diese durchgeführt. Die spektralen Referenzdaten der FRIBO-Standorte können im Rahmen künftiger lokaler und regionaler bodenkundlicher Kartierungen als erste regionale Basis für eine **kosteneffiziente Bestimmung von Bodeneigenschaften** dienen.

Die wichtigsten Punkte auf einen Blick

Folgende Grundlagenarbeiten für spätere Kartierarbeiten im Kanton Freiburg wurden geleistet:

Erstellung von geeigneten Produkten aus der Fernerkundung,

Durchführung multiskaliger Terrainanalysen für das ganze Kantonsgebiet Freiburg,

Spektroskopische Messungen FRIBO-Standorte sowie Kalibration auf die gemessenen Referenzanalysen für:

- pH,
- Textur,
- Humus und
- Kationenaustauschkapazität (spektrale Bibliothek);

Analyse der Repräsentanz der FRIBO Standorte,

Erstellung eines Beprobungskonzept zur Erweiterung der Repräsentativität der FRIBO-Standorte,

Gliederung des Kantonsgebiets in Pedozonen,

Analyse der Pedozonen des Kantonsgebiets als Grundlage für eine spätere Etappierung der Feldarbeiten hinsichtlich:

- Landnutzung,
- Klima und Höhenlage

Ausweisung von repräsentativen Teilflächen innerhalb der Pedozonen für detaillierte pedologische Betrachtungen.

2. Datengrundlagen

2.1 Fernerkundung

Satellitendaten ermöglichen eine flächendeckende, grossräumige und gleichzeitige Beschreibung von Vegetation und Landnutzung mit hohen zeitlichen Wiederholungsraten. Dabei werden multitemporale Satellitendaten zu einer Zeitreihe aus flächendeckenden Satellitenaufnahmen konvertiert, um darauf aufbauend Informationen zur Vegetation und Landnutzung in Raum und Zeit abzuleiten (Araya et al., 2018; Fatholouloumi et al., 2020; Silva-Coira et al., 2021).

Vegetation und Landnutzung bestimmen Bodeneigenschaften und sind somit bedeutende bodenbildende Faktoren (D'Amico et al., 2014; Dror et al., 2022). Unter anderem beeinflussen Vegetation und Landnutzung die Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe im Boden und verändern dabei die Bodenbiologie und Bodenphysik (De Vries et al. 2013).

Veränderungen der Vegetation und Landnutzung über die Zeit beeinflussen die Bodeneigenschaften wie z.B. organische Substanz, Raumgewicht und Wasserspeicherkapazität (Haghighi et al. 2010). Im Rahmen von Bodenkartierungen sind flächendeckende Umweltvariablen zu Vegetation und Landnutzung sowie deren Veränderung in der Zeit daher von besonderer Bedeutung (Lamichhane et al., 2019; Venter et al., 2021).

Die für den Kanton Freiburg aufbereiteten Datengrundlagen beschreiben den

monatlichen Zustand der Vegetation und Landnutzung seit dem Jahr 2018:

- a) als langjährige monatliche Referenz,
- b) als monatliche Abweichung von der langjährigen Referenz und
- c) als langjährige Variabilität.

Dies ermöglicht es den Kartierer:innen einzelne Flächen im Hinblick auf den Wasserhaushalt und die Bodenbeschaffenheit zu bewerten und so in der Kartierung zu berücksichtigen.

Grundlage der Daten ist der 'NDVI' ('Normalized Difference Vegetation Index'). Dabei handelt es sich um einen spektralen Vegetationsindex, der als Indikator für Vegetationsdichte, -zustand und -produktivität breite Anwendung findet (Frampton et al., 2013; Stumpf et al., 2020). Produktive Vegetation reflektiert im Bereich des roten Wellenlängenbereichs weniger und im infraroten Bereich mehr Strahlung. Der 'NDVI' berechnet sich aus dem Verhältnis dieser beiden Spektralbereiche ('RED', 'NIR'; Rouse et al., 1974):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Der Index skaliert zwischen -1 und 1. Generell lassen negative 'NDVI'-Werte auf Wasserflächen und niedrige positive 'NDVI'-Werte auf annähernd vegetationsfreie Flächen schliessen. Weiter ansteigende Werte deuten auf eine zunehmende Biomasse hin.

Der 'NDVI' wurde für jede Rasterzelle aller atmosphärisch korrigierten Sentinel-2 Satellitenaufnahmen berechnet. Über die Zeit kann pro Rasterzelle der NDVI für unterschiedliche Zeitfenster und in Bezug zu langjährigen Referenzen berechnet werden.

Entsprechend wurden folgende verschiedene Grundlagenkarten für den NDVI erstellt:

- a) 'NDVI_monatlich' beschreibt den Zustand, die Dichte bzw. die Produktivität der Vegetation auf monatlicher Basis seit 2018.
- b) 'NDVI_monatlich_Referenz' beschreibt den Zustand, die Dichte bzw. die Produktivität der Vegetation auf monatlicher Basis als langjähriges Mittel seit 2018. Das Datenprodukt dient als Referenz, um Abweichungen der 'NDVI'-Werte in einzelnen trockeneren oder feuchteren Jahren zu beschreiben und damit Ausprägungen des Bodens zu bewerten.
- c) 'NDVI_Variabilität' beschreibt die langfristige Variabilität von Zustand, Dichte bzw. Produktivität der Vegetation seit 2018.

Der Datensatz unterstützt beispielsweise die Bewertung von Landnutzungsintensität und Managementeinflüssen auf landwirtschaftlichen Flächen. Details hierzu finden sich in Stumpf et al. (2023a). Diese Datengrundlagen wurden mit einer räumlichen Auflösung von 10 m × 10 m erstellt und bereitgestellt.

2.2 Multiskalige Terrainanalysen

Das Relief spielt als bodenbildender Faktor im Hinblick auf die Verbreitungssystematik der Böden eine zentrale Rolle (Jenny, 1941; Behrens et al., 2019). Daher stellen Reliefableitungen aus digitalen Geländemodellen (DGM), wie beispielsweise die Hangneigung, die Profilkrümmung oder die Fliessakkumulation, wertvolle Grundlagenkarten zur Unterstützung der Konzeptphase und der Feldarbeiten in der Bodenkartierung dar. Diese Karten unterstützen sowohl in der Erkundungsphase einer Bodenkartierung bei der Erstellung einer Konzeptkarte als auch bei der Feldkartierung als Hilfsmittel für die Polygonabgrenzung von Bodeneinheiten. Das KOBO hat hierzu einen den [Datenservice TerraPoly](#) entwickelt. Dieser wird den Kantonen für Bodenkartierungen zur Verfügung gestellt.

Grundlage für die Berechnungen in TerraPoly sind die SwissTopo-Datensätze swissALTI^{3D} mit einer räumlichen Auflösung von 0.5m, swissBOUNDARIES und swissTLM^{3D}. Im Rahmen der Vorprozessierung wird das DGM korrigiert und skaliert. Dabei erfolgt auch eine Glättung zur Reduktion anthropogener Artefakte.

Des Weiteren wird für die Ableitung der Fliessakkumulation das Strassen- und Wegenetz aus dem DGM entfernt und anschliessend per Interpolation wieder geschlossen. Damit wird versucht, die pedogenetisch relevanten Stoffflüsse besser abzubilden.

Bei der multiskaligen Reliefanalyse handelt es sich um eine systematische Berechnung relevanter Reliefparameter auf unterschiedlichen Skalen beziehungsweise räumlichen Auflösungen des Rasterdatensatzes (Behrens et al. 2018; 2019; Behrens and Viscarra Rossel 2020). Dabei wird das Höhenmodell schrittweise in seiner Auflösung reduziert und anschliessend für jede Auflösungsstufe die Reliefparameter berechnet. Im Rahmen der Reliefanalyse werden die Hangneigung nach FAL24+, die Hangneigung nach NEK, die Profilkrümmung, die Fliessakkumulation und die Exposition berechnet. Diese Daten sind hochauflösend und werden vom KOBO aufgrund der bisherigen Erfahrungen in der Praxis in Auflösungen von 4m × 4m, 8m × 8m und 12m × 12m zur Verfügung gestellt.

2.3 Schweizweite Bodeneigenschaftskarten

Schweizweite digitale Bodeneigenschaftskarten werden am KOBO entwickelt und periodisch aktualisiert (Stumpf, 2023b, Stumpf et al. 2024). Auf diesen sind folgende Bodeneigenschaften für drei Tiefenstufen (0 – 30 cm, 30 – 60 cm, 60 – 120 cm) ersichtlich:

- der Tongehalt,
- der Schluffgehalt,
- der Sandgehalt,
- der Kohlenstoffgehalt,
- der pH-Wert und
- die Kationenaustauschkapazität.

Die Datengrundlage bilden die frei verfügbaren Bodeninformationen aus Bodenkartierungen des nationalen Bodendatensatzes (NABODAT) und rasterbasierte sowie flächendeckend verfügbare Umweltvariablen, die mit bodenbildenden Faktoren korrelieren.

Die Kombination dieser Datensätze im Rahmen einer digitalen Bodenkartierung ermöglicht die Modellierung schweizweiter Übersichtskarten für Bodeneigenschaften (Stumpf et al. 2024).

Dabei wird mittels mathematisch-statistischer Verfahren die Beziehung zwischen den Feldbodendaten und den Umweltvariablen quantitativ abgebildet. Auf Basis dieser Modelle und der flächendeckend verfügbaren Umweltvariablen werden im Nachgang räumliche Prognosen und Prognoseunsicherheiten für die jeweilige Bodeneigenschaft abgeleitet. Konzeptionell orientiert sich eine digitale Bodenkartierung an dem Zustands-Faktoren-Modell (Dokuchaev 1883; Jenny 1941; McBratney et al. 2003), wobei die vorhergesagte Bodeneigenschaft S eine Funktion aus den Faktoren Boden (*s-oil*), Klima (*c-limate*), Vegetation/Landnutzung (*o-rganism*), Relief (*r-elief*), Ausgangsmaterial (*p-arent material*), Zeit (*a-ge*) und Raum (*locatio-n*) ist. Dies ergibt folgende Formel:

$$S = f(s, c, o, r, p, a, n)$$

Abbildung 1 zeigt hierzu Beispiele aus den landesweiten Hinweiskarten für Bodeneigenschaften für den Perimeter Kanton Freiburg. Die Hinweiskarten wurden vom KOBO in einer Auflösung von 30m x 30m und 90m x 90m erstellt.

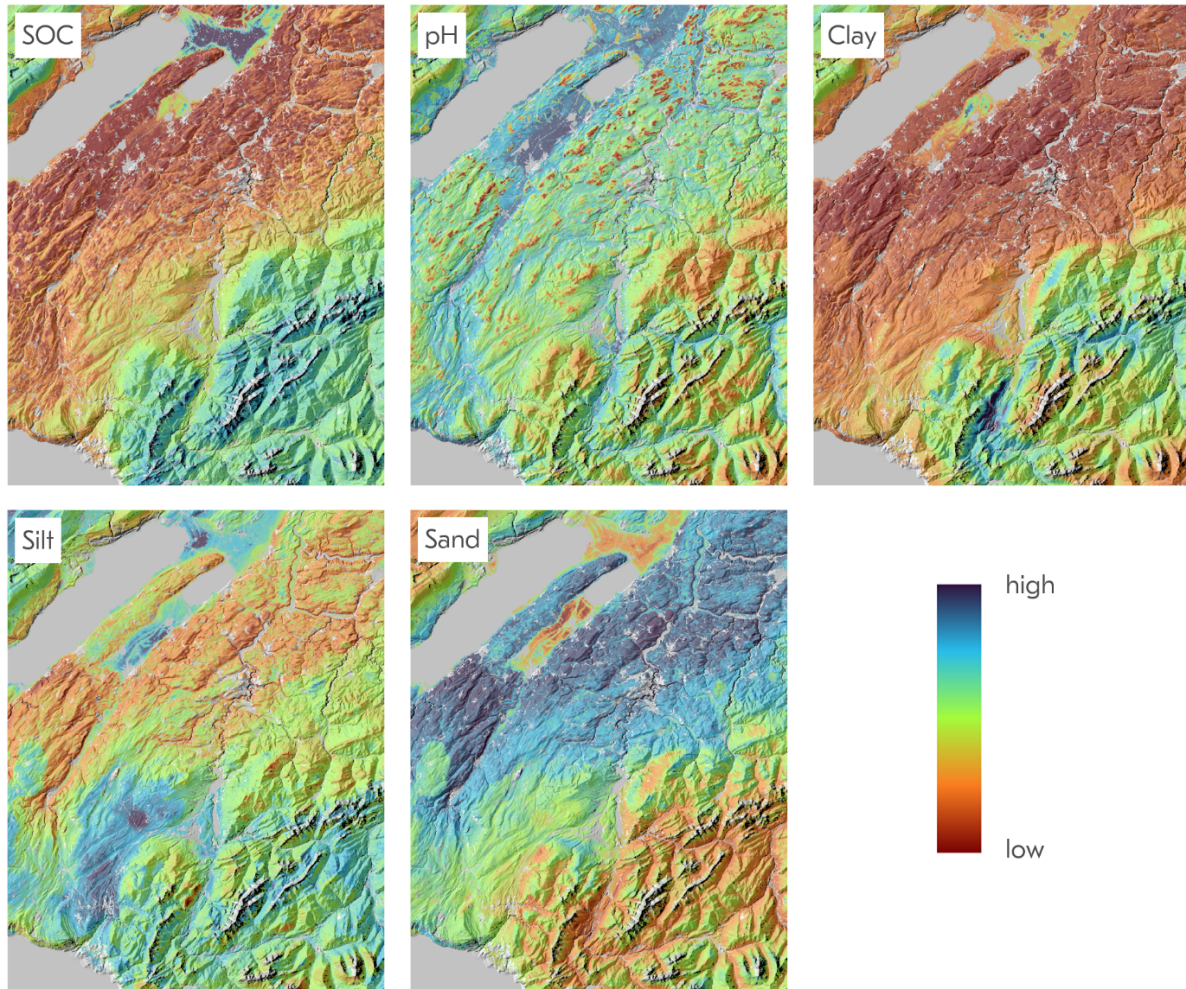


Abbildung 1:

Bodeneigenschaftskarten des Oberbodens für den Kanton Freiburg (Stumpf et al., 2023b). 2024).

3. Ausweisung von Pedozonen und Analyse

Wie oben erwähnt ist die Kernidee der Ausweisung von Pedozonen die Entwicklung eines organisatorisch und jahreszeitlich abgestimmten sowie pedologisch optimierten Planungskonzepts für die Feldarbeiten. Damit soll sichergestellt werden, dass die Feldarbeiten über einen möglichst langen Zeitraum im Jahr durchgeführt werden können. Zusätzlich soll durch die Pedozonen sichergestellt werden, dass die Kartierer:innen in pedogenetisch verwandten und ähnlichen Landschaften arbeiten können und sich so auf die bodenkundliche Beschreibung fokussieren können. Darüber hinaus kann diese Analyse helfen, die grundsätzlichen räumliche Muster der Böden im Kanton Freiburg zu beschreiben. Als Basis für die vorliegende Studie wurden die landwirtschaftlichen Flächen, die bestockten und unproduktiven Flächen im Kanton Freiburg im Umfang von 1379 km² verwendet.

Der Begriff "Soilscapes" wurde von Buol et al. (1973) eingeführt und von Hole (1978) konzeptionell erweitert. Er beschreibt Gebiete mit einem homogenen Bodeninventar. Homogen bezieht sich hierbei auf Aspekte der Bodenbeschreibung und Klassifikation, aber auch auf räumliche Zusammenhänge von Bodeneigenschaften und Standortfaktoren wie Relief, Klima und andere (Assoziation). Anhand von «Soilscapes» soll die Ausweisung räumlich kompakter und nutzungsübergreifender Zonen erreicht werden (Cambell und Edmonds, 1984). Eine räumliche Gesamtbetrachtung einer Landschaft ist ein zentrales Element einer Bodenkartierung und dient dem Verständnis der teilweise enormen Komplexität von

Bodenassoziationen in Landschaften (McBratney et al., 1991; McSweeny et al., 1994; Kuhnt, 1994). Konzeptionell ist eine Bewertung der Bodenressourcen nur dann möglich, wenn die oben genannten Zusammenhänge in einer Landschaft und der Böden bekannt sind (Assoziationsmuster) (Milne, 1935; Jenny, 1941; Ruhe, 1956; Butler, 1959; Pullan, 1969, Schmidt, 1975). Diesem Konzept folgend sollte das erste Ziel im Rahmen einer Bodenkartierung grösserer Gebiete darin bestehen, die räumlichen Assoziationsmuster als Grundlage für die Segmentierung von Landschaften zu berücksichtigen.

Für die Ableitung von Pedozonen können vorliegende Bodenkarten in grösseren Massstäben als dem Zielmassstab verwendet werden, da sie alle relevanten Informationen zur Bodenbildung und zu räumlichen Bodenassoziationen enthalten. Liegen solche Informationen nicht vor, können flächendeckende Informationen zu bodenbildenden Faktoren herangezogen werden. Im vorliegenden Projekt wurde als primäre Datengrundlage die schweizweiten Hinweiskarten zu Bodeneigenschaften mit einer räumlichen Auflösung von 90 x 90m genutzt (siehe Kapitel 2.3). Als zusätzliche Datengrundlage wurden die verfügbaren geologische Karten genutzt, und die Legenden der verschiedenen geologischen Blattsschnitte hinsichtlich der Aussagekraft für die Bodenbildung möglichst harmonisiert (Burgos et al., 2023).

Abbildung 2 zeigt die reklassifizierte geologische Karte sowie die mittels Clusteranalyse aggregierten Bodendaten. Hierbei wird deutlich, dass beide Karten

übereinstimmend gewisse räumliche Unterschiede wiedergeben (z.B. im südlichen voralpinen Bereich), die Clusteranalyse der Hinweiskarten für Bodeneigenschaften im nördlichen Kantonsgebiet aber weitaus

mehr differenzieren als die geologische Karte (weist für den nördlichen Teil im Wesentlichen als Ausgangsmaterial Moräne, MO4, vermischt mit Schotter, SC4, aus).

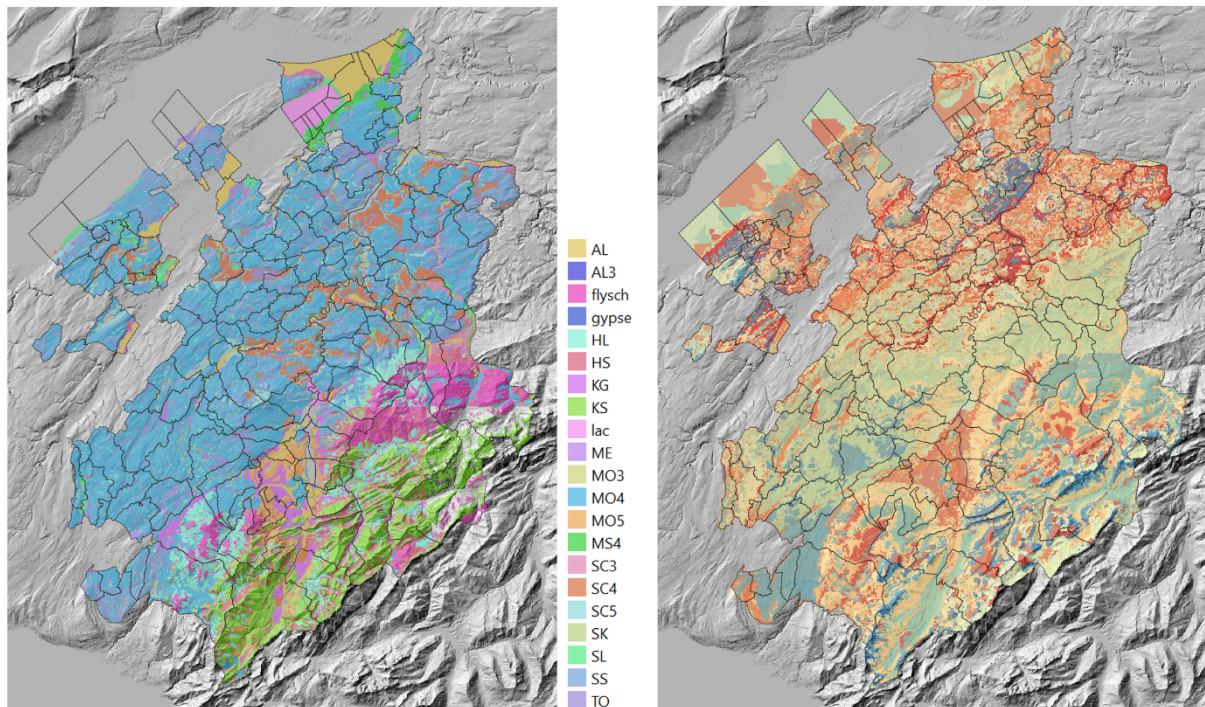


Abbildung 2:

Reklassifizierte geologische Karte (Burgos et al., 2023) (links), und die mittels Clusteranalyse aggregierten Bodendaten (Stumpf et al., 2023b) (rechts) für den Kanton Freiburg.

Technisch basiert der Ansatz zur Ausweisung der Pedozonen auf einer von Schmidt et al. (2010) entwickelten Methode. Dabei wird ein Moving-Window-Ansatz mit Analysen zur lokalen Häufigkeitsverteilung charakteristischer Raumeinheiten kombiniert. Dazu wurden im vorliegenden Projekt die Hinweiskarten der Bodeneigenschaften mit einer Rasterweite von 90m mit Hilfe einer Clusteranalyse gruppiert. Diese wurden im Anschluss mit den Informationen der geologischen Karte (Abbildung 2) verschnitten. Auf Basis dieser bodenkundlichen

Raumeinheiten wurden dann möglichst homogene Pedozonen abgeleitet, d.h. innerhalb der Pedozonen ist das Ergebnis der Clusteranalyse möglichst wenig fragmentiert. Die Fenstergröße von dem Moving-Window-Ansatz wird schrittweise variiert und optimiert. Bei jedem Schritt wird sowohl die Anzahl Cluster bestimmt als auch die Länge der Grenzverläufe der einzelnen Cluster berechnet. Ist ein Gebiet relativ homogen, dann ist die Summe der Grenzverläufe relativ gering. Ist das Gebiet heterogen, weist die Clusteranalyse viele kleine

unterschiedliche Flächen aus und damit eine hohe Summe der Grenzverläufe. Die Länge der Grenzverläufe als auch die Anzahl der Cluster beeinflussen den Grad der räumlichen Fragmentierung.

Die Verwendung kleiner Fenstergrößen führt zu räumlich stärker fragmentierten Pedozonen, als dies bei der Verwendung grösserer Fenstergrößen der Fall ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Inventar noch nicht ausreichend ist, um homogene und inhaltlich stabile Zonen auszuweisen, die sich auf regionaler Ebene differenzieren lassen. Um die optimale Fenstergrösse und damit die Fragmentierung zu bestimmen, wird der Gesamtumfang gegen die Anzahl der Pedozonen aufgetragen (Schmidt et al. 2010). Die optimale Fenstergrösse ist dann gefunden, wenn die Werte der gemittelten Grenzverläufe im Verhältnis zu grösseren Fenstern nur noch marginal abnimmt. Als Fenstergrößen wurden hier 4'500 x 4'500m, 5'400 x 5'400m, 6'300 x 6'300m, 7'200 x 7'200m, 8'100 x 8'100m, 9'000 x 9'000m verwendet.

Im Rahmen dieses Projekts wurden 6 bis 10 Klassen für jede Fenstergrösse getestet, um

die optimale Anzahl der Pedozonen durch die Berechnung der mittleren Grenzverläufe pro Klasse zu ermitteln. Als optimale Fenstergrösse wurden für den Kanton Freiburg statistisch 8'100 x 8'100m ermittelt (65.6 km²). Die finale Anzahl der Pedozonen liegt bei 8 Zonen.

Abbildung 3 zeigt den Vergleich zwischen einer Zonierung rein auf Basis der Hinweiskarten für Bodeneigenschaften sowie einer Zonierung auf Basis der Hinweiskarten in Kombination mit der geologischen Karte.

Im Wesentlichen zeigte die Analyse keine substanziellen Unterschiede im räumlichen Muster der ausgewiesenen Pedozonen. Dies liegt vermutlich darin begründet, dass die Hinweiskarten für Bodeneigenschaften in den drei Tiefenstufen einen Grossteil der geologischen Variation indirekt abdecken, insbesondere die Ton- und Schluffgehalte in den Tiefenstufen. Um dennoch den Informationsgehalt der geologischen Karte zu nutzen, wurde für die weiteren Analysen die kombinierte Karte verwendet.

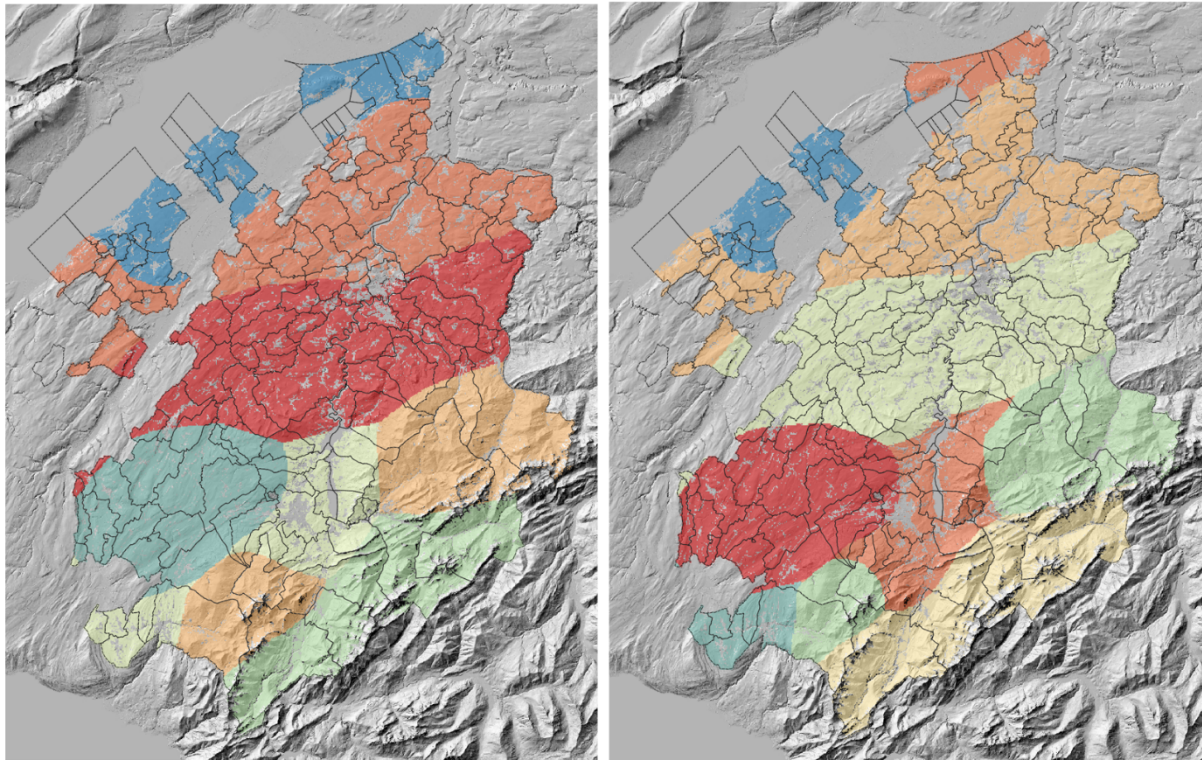


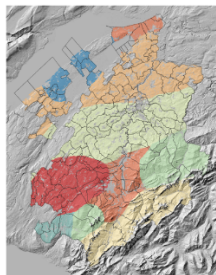
Abbildung 3:

Pedozonierungen für den Kanton Freiburg auf Basis mittels Clusteranalyse aggregierter schweizweiter Bodendaten (linke Seite), sowie einer Kombination aus aggregierten Bodendaten und der geologischen Karte (rechte Seite). Die räumlichen Muster der Pedozonen sind für beide Varianten sehr ähnlich (Die Farben weisen individuell pro Karte die Pedozonen aus und haben keinen Bezug zwischen den Karten).

Die Abbildungen 4 bis 6 zeigen Häufigkeitsverteilungen von Klima-, Relief-, Nutzungs- und Bodeninformationen. Die Abbildungen verdeutlichen, wie sich die einzelnen Pedozonen deutlich hinsichtlich dieser bodenbildenden Faktoren unterscheiden. Beispielsweise repräsentiert die Pedozone 1 (blau) die ackerbaulich genutzten Böden entlang vom Neuenburger See (Estavayer Richtung Delley) (Abbildung 6),

mit höheren mittleren Jahrestemperaturen, niedrigem Jahresniederschlag (Abbildung 4) sowie relativ niedrigeren Ton- und Humusgehalten (Abbildung 5). Während die Pedozone 5 (hellbraun) hingegen vor allem alpines Grasland und Wald zusammenfasst, in höheren Lagen in steilerem Gelände und relativ höheren Ton- und Humusgehalten.

Pedozonen



Häufigkeitsverteilung von Klima- und Reliefparametern

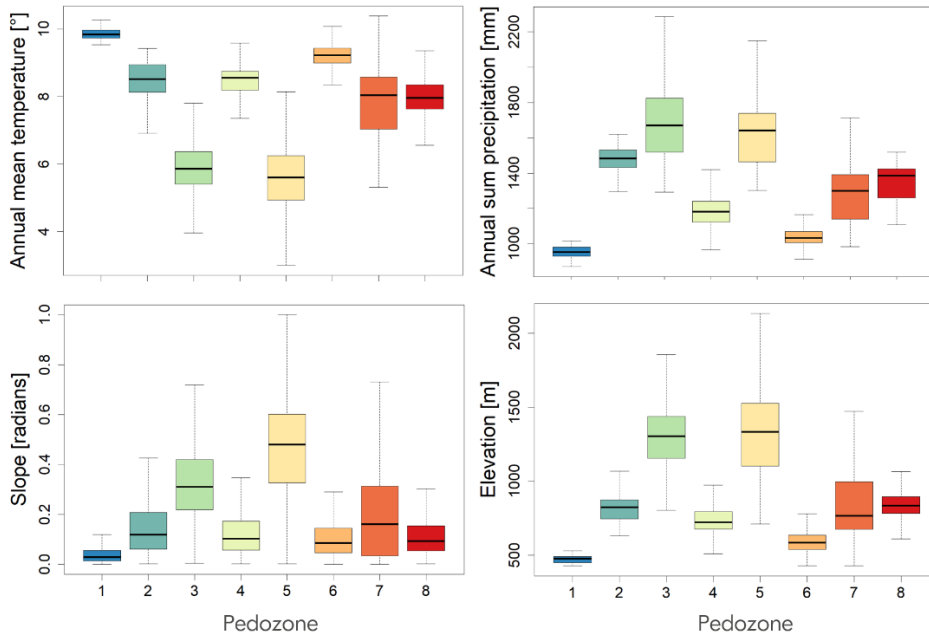


Abbildung 4:

Charakterisierung der Pedozonen anhand von Klima- und Reliefparametern.

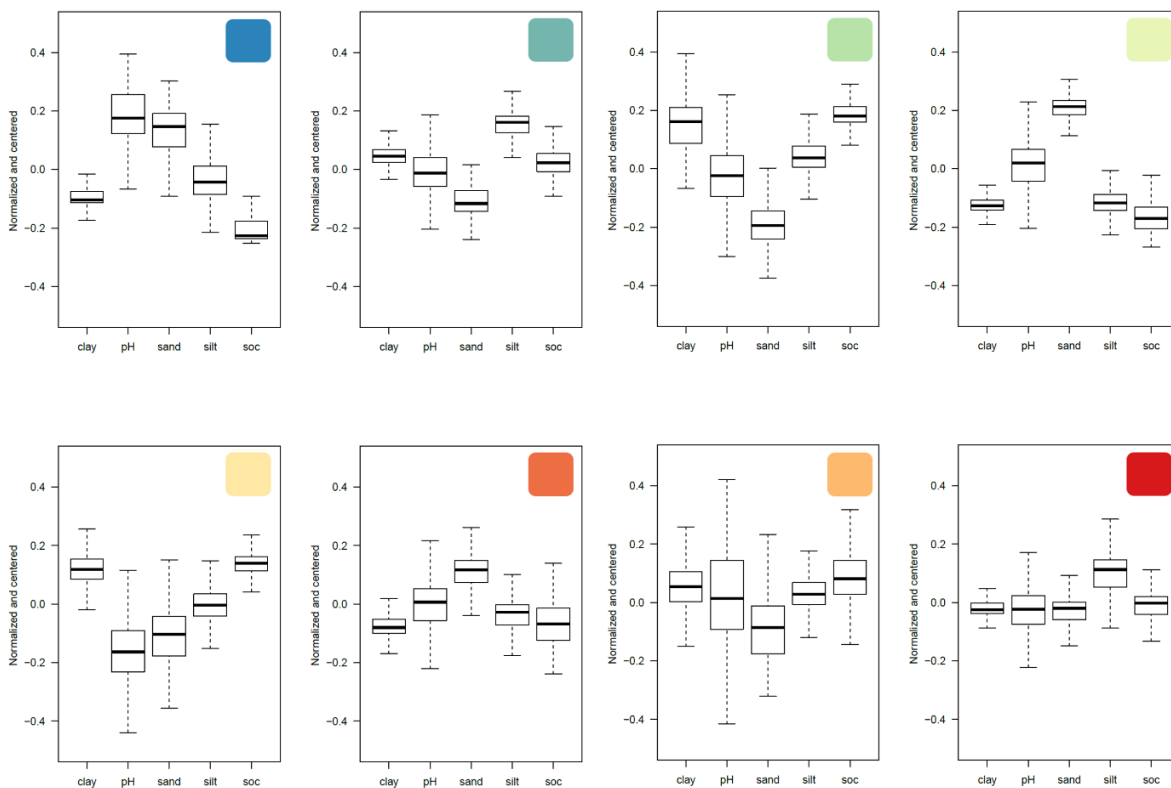
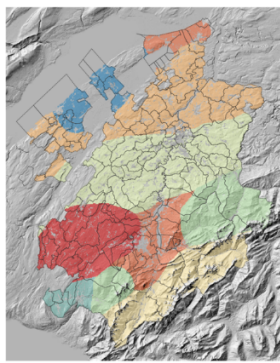


Abbildung 5:

Charakterisierung der Pedozonen anhand von Bodeneigenschaften.

Pedozonen



Häufigkeitsverteilung der Landnutzungen

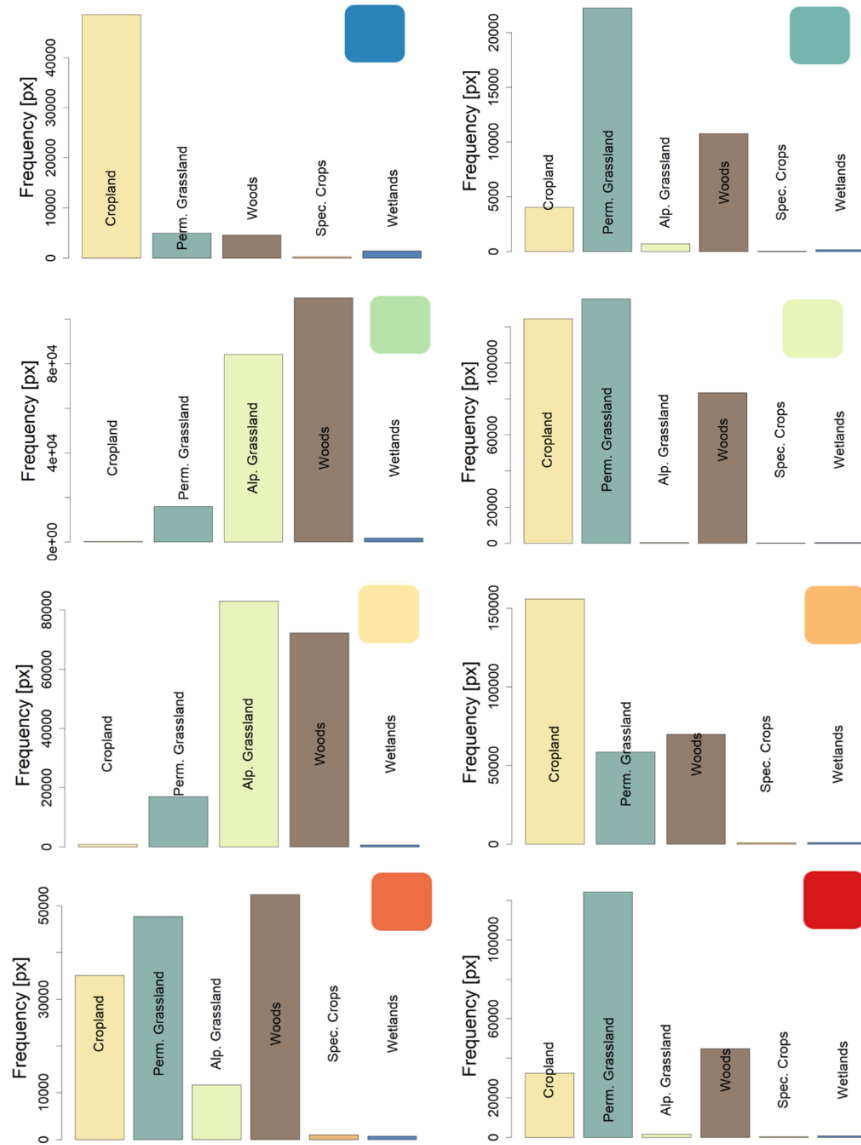


Abbildung 6:

Charakterisierung der Pedozonen anhand von Landnutzungsklassen

Die Ausweisung von Pedozonen kann rein auf Basis objektiver, statistischer Kriterien erfolgen – wie es für dieses Projekt angewendet wurde. Es ist jedoch ebenso möglich, die Anzahl der Pedozonen für spezifische Fragestellungen einer Bodenkartierung manuell zu variieren. Je nach finanziellen Ressourcen und Verfügbarkeit können beispielsweise mehr oder weniger Kartierteams in einer Bodenkartierung zeitlich parallel eingesetzt

werden. Entsprechend ist es von Vorteil die Anzahl der verfügbaren Kartierteams an die Anzahl von Pedozonen anzupassen. Je mehr Kartierteams eingesetzt werden können, desto grösser kann die Anzahl an Pedozonen sein. Dies gilt ebenso, wenn Fahrwege optimiert oder generell kleinere Abschnitte betrachtet werden sollen. Zur Illustration wurde eine feinere Zonierung über das gesamte Gebiet hinweg mit 16 Pedozonen

berechnet (Abbildung 7). Im Vergleich zu der Ausweisung von 8 Pedozonen (Abbildung 3) zeigt das räumliche Muster mit 16 Pedozonen eine weitere Aufteilung der Pedozonen in kleinere homogene Gebiete, wobei die Grenzen der 8 Pedozonen zum Teil weiter unterteilt (siehe südliches Kantonsgebiet in Abbildung 7) oder räumlich wieder neu strukturiert werden (nördliches Kantonsgebiet in Abbildung 7). Mit einer Ausweisung von 8 Pedozonen im Kanton Freiburg beträgt die durchschnittliche Grösse einer Pedozone rund 172 km² (Basis: 1379 km² für Landwirtschaftsflächen, bestockte und unproduktive Flächen), wobei die kleinsten Pedozonen 1 und 2 lediglich 57.7 km² und 36.6 km² betragen, und die grösste Pedozone 4 rund 323 km².

Eine weitere Variante für die Ausweisung von Pedozonen ist eine hierarchische Vorgehensweise. In einem ersten Schritt kann zunächst eine geeignete Anzahl von Pedozonen ausgewiesen (Level 1), und diese dann in einem zweiten Schritt hierarchisch weiter untergliedert werden (Level 2), ohne die Grenzen der Pedozonen auf Level 1 zu verändern. Diese Vorgehensweise kann vor allem für die zeitliche Planung der Kartierarbeiten mit mehreren Kartierteams vorteilhaft sein, als auch für die Organisation der Qualitätssicherung der pedologischen Beschreibung und Klassifikation der Böden.

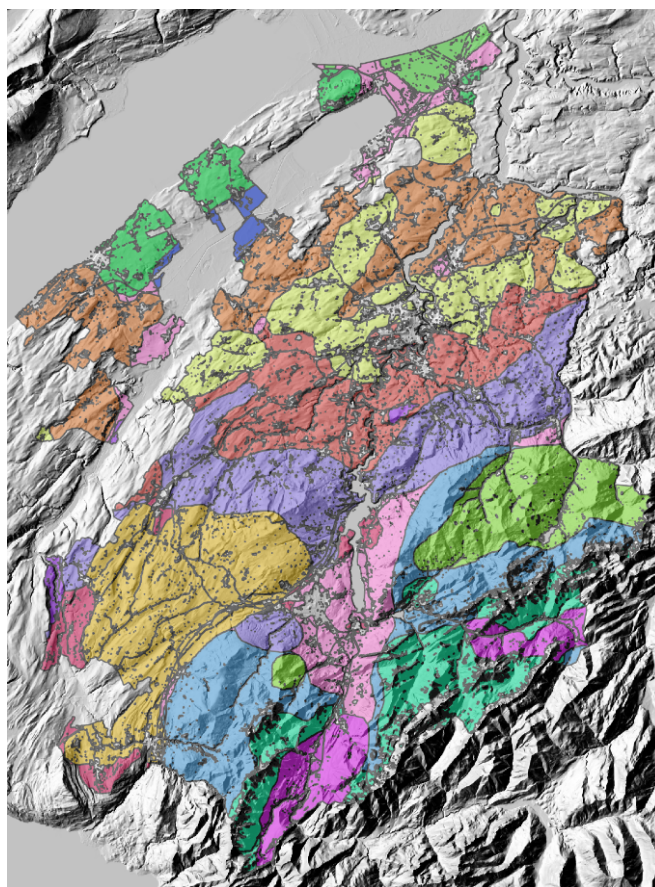


Abbildung 7:

Ausweisung von 16 Pedozonen für den Kanton Freiburg.

4. Repräsentanz FRIBO-Messnetz und Beprobungskonzept

Im Kanton Freiburg liegen mit dem FRIBO-Messnetz mit den im Jahr 2022 durchgeführten pedologischen Beschreibungen der Böden für rund 220 Standorte pedologische Bodeninformationen vor (Burgos 2023), die über das ganze Kantonsgebiet verteilt sind. Zudem sind für einzelne kleinere Teilgebiete Bodenkarten und -profile aus früheren Kartierprojekten vorhanden. Um mittelmassstäbige Bodenkarten zu erstellen und eine Boden-Spektralbibliothek aufzubauen, wäre es zielführend, die Anzahl der Standorte mit Profilaufnahmen bzw. Bohrungen weiter zu ergänzen. In diesem Kontext wurde die Repräsentanz der FRIBO-Standorte gegenüber den bodenbildenden Faktoren ermittelt, und auf dieser Basis im Sinne eines Szenarios weitere 250 Standorte ausgewiesen, die bisher unterrepräsentierte Bereiche im Kantonsgebiet abdecken.

Dazu wurde am KOBO ein neues Verfahren entwickelt, das eine Repräsentanzanalyse mit der Ausweisung von neu zu beprobenden Standorten kombiniert. Für das Gebiet des Kantons Freiburg wurden die Hinweis-karten für Bodeneigenschaften mit einer Auflösung von 30m x 30m sowie zusätzliche Informationen zur Topographie schrittweise geclustert. Zu diesen topographischen Informationen gehören:

- Höhe,
- Hangneigung,
- topographischer Positionsindex,
- topographische Rauigkeitsindex und Exposition.

Ziel war es die Repräsentativität der FRIBO-Standorte zu analysieren. Abbildung 8 zeigt die repräsentativen und nicht-repräsentativen Teilgebiete im Kanton Freiburg auf.

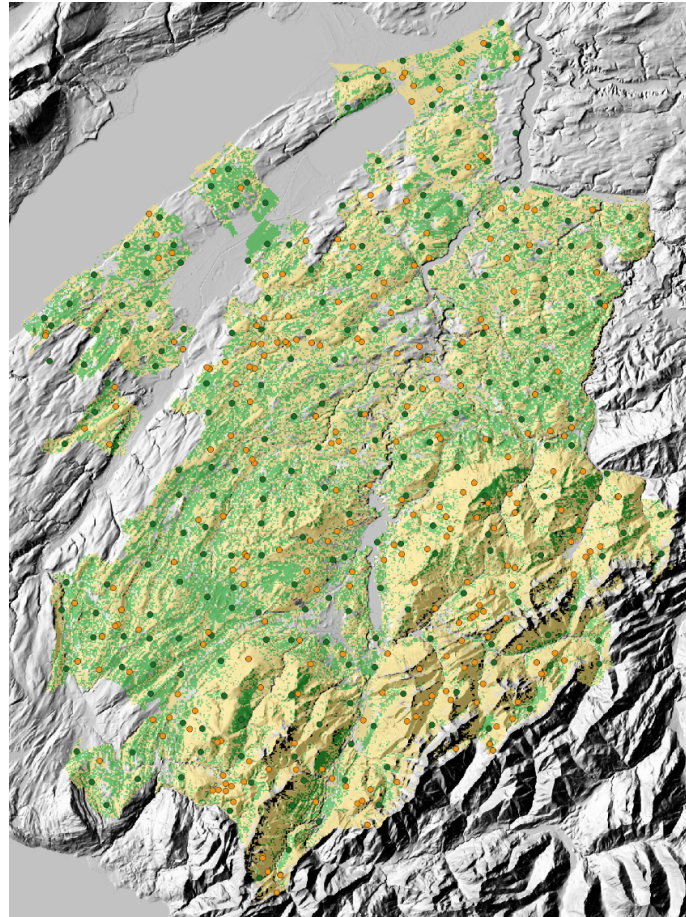


Abbildung 8:

Repräsentative (grün) und nicht-repräsentative Bereiche (gelb) in Bezug zu den 250 Standorten des FRIBO-Messnetzes. Lage der vorhandene Standorte (orange) zur Verdichtung der Punktinformationen (Szenario mit Erhebung von Profilen oder Bohrungen an weiteren 250 Standorten)

Für die Bestimmung von neu zu beprobenden Standorten wurde die Anzahl der Cluster erhöht, und jeweils mit der Lage der vorliegenden FRIBO-Standorte verglichen. Die Anzahl der Cluster wurde dann so weit erhöht, bis 250 Cluster ermittelt wurden, die keine FRIBO-Standorte enthalten. Abbildung 9 zeigt das räumliche Muster der 250 Cluster auf, sowie die Bestimmung der zusätzlichen 250 Standorte, die zur Optimierung der Repräsentativität der FRIBO-Standorte vorgeschlagen werden.

Die Festlegung der genauen Lage der Standorte innerhalb eines Clusters kann dabei automatisiert erfolgen (geographisches Zentrum des Clusters) oder durch Pedolog:innen im Feld im Rahmen der Erkundungsphase bestimmt werden.



Abbildung 9:

Unterrepräsentierte Gebiete im Bezug zu dem FRIBO-Messnetz mit 250 Clustern und neu zu beprobende Standorte, um möglichst die ganze Bandbreite an räumlicher Variation in Bezug zu bodenbildenden Faktoren im Kantonsgebiet zu erfassen.

5. Ausweisung von repräsentativen Teilflächen innerhalb der Pedozonen

Für verschiedenen Fragestellungen ist es hilfreich, wenn innerhalb einer Pedozone Teilflächen ausgeschieden können, die typische Verhältnisse der gesamten Pedozone auf kleinerem Raum widerspiegeln. Solche repräsentativen Teilflächen innerhalb von Pedozonen weisen hinsichtlich geclusterten bodenbildenden Faktoren eine möglichst ähnliche Häufigkeitsverteilung auf wie diejenige der gesamte Pedozone. Sie eignen sich im Rahmen der Erkundungsphase einer Bodenkartierung für die Festlegung von Transekten (Catena-Prinzip) und Profilen, zur Ermittlung von Standorten für Referenzböden und zur Ausbildung von Fachkräften an «gebietstypischen» Bodenprofilen und Bohrungen.

Zur Ausweisung von repräsentativen Teilflächen innerhalb einer Pedozone wurde die Methode von Behrens et al. (2009) mittels Moving-Window-Technik verwendet. Dabei wird für jedes Pixel das umgebende Gebiet im Hinblick auf die räumliche Struktur, die lokale Vielfalt sowie die Häufigkeitsverteilung der zugrundeliegenden Klassen analysiert. Wenn die Häufigkeitsverteilung der gesamten Pedozone bekannt ist, kann diejenige Teilfläche statistisch ermittelt werden, die eine möglichst ähnliche Häufigkeitsverteilung wie die gesamte Pedozone aufweist. Die Teilfläche kann dann als repräsentativ bezeichnet werden.

Die Suche nach räumlicher Ähnlichkeit, bei der repräsentative Flächen anhand einer ähnlichen Häufigkeitsverteilung ermittelt werden, basiert auf einem modifizierten Chi²-Test. Die Berechnung liefert einen Repräsentativitätswert oder ein

Ähnlichkeitsmass für jede Teilfläche einer Pedozone. Um die optimale Fenstergrösse für jedes Landschaftssegment zu bestimmen, werden die resultierenden benachbarten Repräsentanzoberflächen unterschiedlicher Fenstergrößen miteinander korreliert. Wenn sich die ergebende Korrelationskurve einem Maximum nähert, wird die entsprechende, am Kniepunkt der Kurve gefundene Flächengrösse als optimale Grösse gewählt, da keine weiteren Veränderungen in der Lage der repräsentativsten Fläche zu erwarten sind. Dieser Ansatz zielt darauf ab, diejenige Teilflächengrösse zu finden, bei der die repräsentativste Teilfläche die relevantesten Klassen einer Karte (in Bezug auf ihre Häufigkeitsverteilung) enthält, um das Kartiergebiet bzw. die Pedozone zu beschreiben (Behrens et al., 2009).

Die zugrundeliegenden Daten müssen dabei repräsentativ sein, um reproduzierbare und übertragbare Ergebnisse und Kalibrierungen zu ermöglichen (Lagacherie et al., 2001; Behrens et al., 2009). Mit der Bedingung der bestmöglichen Abdeckung der Teilflächen in den Pedozonen variiert die Größe des repräsentativen Teilbereichs mit der Heterogenität innerhalb der Pedozone. Ist eine Pedozone relativ klein und in sich relativ homogen, kann schon mit einer kleinen Teilfläche das gesamte Spektrum der Pedozone abgebildet werden. In heterogenen Pedozonen hingegen benötigt es in der Regel größere Teilflächen.

Abbildung 10 zeigt die Lage der ermittelten repräsentativen Teilflächen für das Beispiel einer Gliederung des Kantonsgebiets in 8 Pedozonen. Werden fragestellungsbedingt

mehr Pedozonen ausgewiesen oder die Pedozonen hierarchisch in Subzonen gegliedert, können entsprechend mehr solcher Teilflächen ausgewiesen werden.

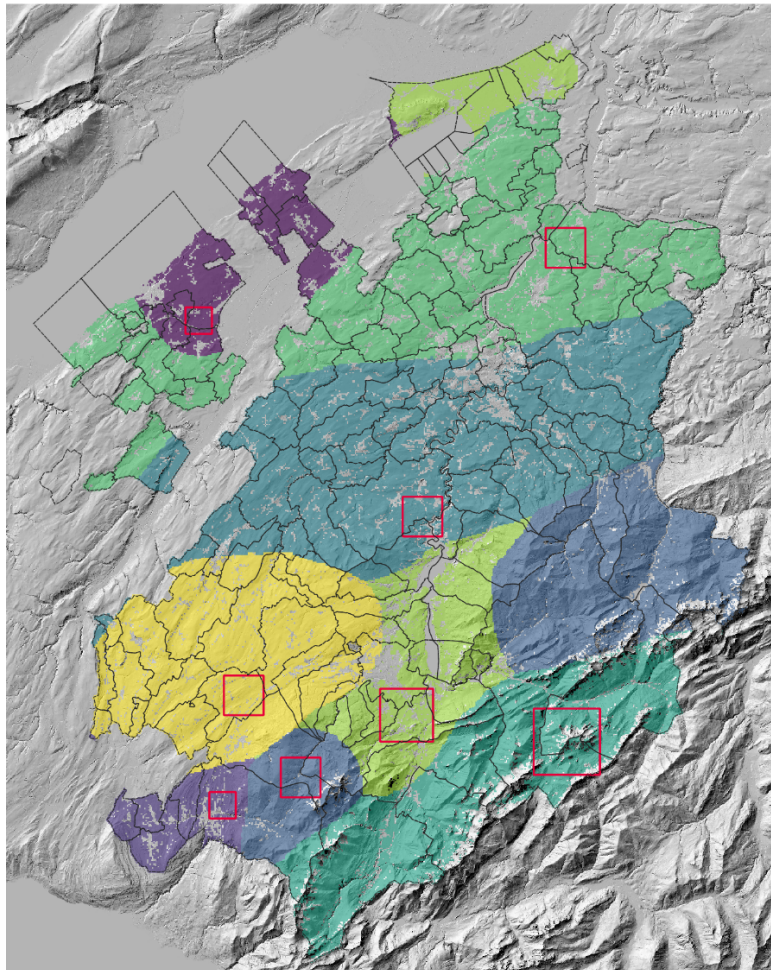


Abbildung 10:

Lage der repräsentativen Teilflächen innerhalb der Pedozonen (Variante mit 8 Cluster).

6. Spektroskopische Messungen

Spektroskopische Bestimmungsmethoden im Labor und Feld erlauben es, die wichtigsten Bodeneigenschaften wie pH, Textur, KAK (inkl. Basensättigung), Kalkgehalt und organische Substanz effizient zu bestimmen. Hierbei kommen spektroskopische Techniken im mittleren Infrarotbereich zum Einsatz (MIR). Einmal im Labor geeicht, erlauben bodenspektroskopische Methoden die wichtigen Bodeneigenschaften rasch und kostengünstig zu bestimmen.

Die 250 Standorte des FRIBO-Messnetzes werden seit 1987 von Grangeneuve mit einem Zyklus von 5 Jahren beprobt (Petel et al. 2024). Gegenwärtig wird der achte Zyklus durchgeführt. Der Kanton Freiburg unterhält eine Pedothek für die Archivierung der Bodenproben seit der ersten Erhebung. Die Analysemethoden im Labor sind über die Erhebungszyklen dieselben geblieben (ausser zur Bestimmung des Humusgehalts ab 2019). Neben den Routinemessungen für Nähr- und Schadstoffe über die Zeit wurden Bodeneigenschaften wie Textur, pH-Wert, Karbonate, Humusgehalt und Kationenaustauschkapazität im ersten Erhebungszyklus in drei Tiefenstufen durchgeführt (Julien et al. 2002).

Das Bodenarchiv des FRIBO Messnetzes in Verbindung mit der Verteilung der FRIBO-Standorte über das gesamte Kantonsgebiet eignet sich daher sehr gut, um die gesamte Spannbreite der Böden auch spektroskopisch zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde eine Auswahl der archivierten Bodenproben in Grangeneuve getroffen.

Das Ziel war es, eine repräsentative Auswahl von Proben zu erhalten. Bevorzugt wurden Bodenproben aus dem ersten Erhebungszyklus (1987-2001) ausgewählt, um einen möglichst einheitlichen Stand der Analysemethoden nutzen zu können. Die Auswahl erfolgte auch nach Verfügbarkeit und Menge der archivierten Probenmenge. Aufgrund des Wechsels der Analysemethoden für Humus wurden zudem Bodenproben aus der ersten Tiefenstufe 0-20 cm der siebten Erhebung (2017-2021) berücksichtigt. Für die spektroskopischen Analysen an der BFH-HAFL wurden rund 50 g des Feinerdematerials verwendet. Im Labor wurden die rund 750 Bodenproben zusätzlich gemahlen und in jeweils vier Wiederholungen gemessen. Für die Messung der Spektren im mittleren Infrarotbereich (MIR) mit Wellenlängen im Bereich von 1'330 nm bis 16'660 nm wurde ein Bruker INVENIO mit einem High-Throughput Modul (HTS-XT) verwendet.

Mit der Kalibrierung der Spektren auf die gemessenen Bodeneigenschaften für die FRIBO-Standorte steht für eine spätere Bodenkartierung im Kanton Freiburg dann bereits eine Spektralbibliothek zur Verfügung, anhand derer für neue Standorte die Bodenproben kostengünstig auf die oben genannten Bodeneigenschaften übertragen werden können. Spektroskopische Analysen von Böden im Kanton Freiburg liegen zudem für NABO-Standorte und Standorte aus dem Rasternetz des Biodiversitätsmonitorings (BDM) vor.

7. Schlussfolgerungen

Ausweisung von Pedozonen

Mit der vorliegenden Studie wird eine Methode vorgestellt und exemplarisch für den Kanton Freiburg angewendet, wie für grössere Regionen oder für einen Kanton die Landschaft in möglichst **pedogenetisch homogene Pedozonen** gegliedert werden kann. Hierzu werden flächendeckende Geo- und Umweltdaten verwendet, die möglichst relevante bodenbildende Faktoren abbilden, wie beispielsweise Relief, Klima, Landnutzung, Geologie, Vegetation und Bodeneigenschaften. Die statistische Auswertung der räumlichen Variation von bodenbildenden Faktoren im Kanton Freiburg ergab eine geeignete Klassenbildung von 8 Pedozonen. Die durchschnittliche Grösse einer Pedozone beträgt rund 172 km² in Bezug zu der berücksichtigten Gesamtfläche von 1379 km² (Landwirtschaftsflächen, bestockte und unproduktive Flächen). Die kleinsten Pedozonen 1 (Gebiet Neuenburgersee im Bezirk La Broye) und 2 (Gebiet Châtel-Saint-Denis im Bezirk La Veveyse) weisen eine Grösse von 57.7 km² bzw. 36.6 km² auf, die grösste Pedozone 4 rund 323 km² (Gebiete in den Bezirken La Glâne, La Sarine, Sense).

Die Gliederung des Kantonsgebiets in Pedozonen kann in mehrerlei Hinsicht als Grundlage für die Planung weiterer Feldarbeiten für Bodenkartierungen dienen. In der Konzeptphase einer Bodenkartierung können sich die Kartierer:innen gezielt auf die relevanten bodenbildenden Faktoren innerhalb einer Pedozone eichen, und die Qualitätssicherung der bodenkundlichen Aufnahmen entsprechend auslegen. Mit einer Planung von Kartierarbeiten in Pedozonen wird sichergestellt, dass die Kartierer:innen in (möglichst) pedogenetisch verwandten und

homogenen Landschaften arbeiten können, und sich so inhaltlich optimal fokussieren können. Darüber hinaus kann eine gezielte Ausbildung von Nachwuchskräften für ausgewählte Pedozonen den Einstieg für die Feldarbeiten und die Qualitätssicherung erleichtern. Zudem unterstützt die Ausweisung von Pedozonen die Planung und Entwicklung eines organisatorisch und jahreszeitlich abgestimmten Vorgehens für die Feldarbeiten. Damit soll sichergestellt werden, dass die Feldarbeiten über einen möglichst langen Zeitraum im Jahr durchgeführt werden können unter Berücksichtigung der Landnutzung, den vorherrschenden Kulturen, der Zugänglichkeit und der Höhenlage.

Die verwendete Methodik zur Ausweisung von Pedozonen erlaubt eine grosse Flexibilität. Generell ist die Festlegung der Anzahl von Pedozonen abhängig von der Fragestellung. Es können auch mehr oder weniger Klassen ausgewiesen werden, oder die Pedozonen können hierarchisch weiter unterteilt werden in kleinere Gebiete innerhalb einer Pedozone. Diese Vorgehensweise kann vor allem für die zeitliche Planung der Kartierarbeiten mit mehreren Kartierteams vorteilhaft sein, als auch für die Organisation der Qualitätssicherung der pedologischen Beschreibung und Klassifikation der Böden. Für spezifische Projekte zur Kartierung von Böden im Kanton Freiburg kann eine angepasste Neuberechnung der Pedozonen erfolgen.

Für die Methodik wurden für den Kanton Freiburg neue Umwelt- und Geodaten erstellt, beispielsweise multiskalige Terrainanalysen und Produkte aus der Fernerkundung (siehe Kapitel 2). Diese neuen

Grundlagendaten stehen für weitere Arbeiten zur Verfügung.

Innerhalb von Pedozonen können repräsentative Teilflächen für detaillierte pedologische Betrachtungen bzw. Feldarbeiten ausgewiesen werden. Repräsentative Teilflächen zeichnen sich dadurch aus, dass die relevanten bodenbildenden Faktoren möglichst ähnliche Häufigkeitsverteilungen aufweisen wie diejenigen der gesamten Pedozone. Eine repräsentative Teilfläche spiegelt die typischen Verhältnisse der gesamten Pedozone auf kleinerem Raum wider. Sie eignen sich im Rahmen der Erkundungsphase einer Bodenkartierung für die Festlegung von Transekten (Catena-Prinzip) und Profilen, zur Ermittlung von Standorten für Referenzböden und zur Ausbildung von Fachkräften an «gebietstypischen» Bodenprofilen und Bohrungen mit der neuen Beschreibung und Klassifikation der Böden (rKLABS).

Repräsentanz FRIBO-Messnetz

Das FRIBO-Messnetz mit seinen rund 250 Standorten, die räumlich über den Kanton Freiburg gut verteilt sind, stellt eine sehr gute Ausgangsbasis für Vorarbeiten einer grossräumigen Bodenkartierung dar. Zusätzlich zur Ausweisung der Pedozonen wurde die Repräsentanz der FRIBO-Standorte gegenüber wichtigen bodenbildenden Faktoren ermittelt. Im Sinne eines Szenarios wurden zusätzlich den bestehenden 250 Standorten im FRIBO-Messnetz weitere 250 Standorte ausgewiesen, die bisher unterrepräsentierte Bereiche im Kantonsgebiet abdecken. Mit der Durchführung von diesem Beprobungskonzept könnte die Repräsentativität der FRIBO-Standorte gezielt erweitert werden. Je nach Zielsetzung des Kantons können mit der Methodik auch mehr oder weniger neue Standorte für eine Beprobung ausgewiesen werden.

Im Sinne von Vorarbeiten für weitere Kartierarbeiten im Kanton wurden spektroskopische Messungen im Labor für rund 250 FRIBO-Standorte durchgeführt. Insgesamt wurden die Spektren von rund 750 Bodenproben im Labor gemessen. Die Kalibration der Spektraldaten auf die gemessenen (konventionellen) Referenzanalysen für pH, Textur, Humus und Kationenaustauschkapazität wurde modelliert. Der Mehrwert dieser Vorarbeit besteht darin, dass bei zukünftigen Bodenkartierungen im Kanton Freiburg diese wichtigen Bodeneigenschaften kosteneffizient bestimmt werden können. Konkret würde dies bedeuten, dass bei neuen Bodenkartierungen alle Bodenproben mit MIR-Spektroskopie analysiert werden könnten, und nur noch für relativ wenige Bodenproben in der Grössenordnung von 5-10% konventionelle Analysemethoden erforderlich wären. Für alle neuen Proben einer Bodenkartierung können die

Bodeneigenschaften dann kostengünstig auf Basis des Kalibrationsmodells und der wenigen konventionellen Bodenanalysen übertragen werden.

Optionen für weitere Projekte

Die in diesem Projekt exemplarisch aufgezeigten Methoden liefern wichtige Grundlagen nicht nur für weitere Projekte im Kanton Freiburg, sondern auch im Hinblick auf eine Schweizweite Bodenkartierung.

Zusammenfassend ergeben sich aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie folgende Optionen für weitere Projekte im Bereich der Bodenkartierung:

1. Planung mit Pedozonen

Planung unter Berücksichtigung der Pe-dozonen und repräsentativen Teilflä-chen. Kartierer:innen können sich zu-nächst primär an Böden in den reprä-sentativen Teilflächen eichen und die neue Beschreibung und Klassifikation der Böden (rKLABS) anwenden. Nach-wuchskräfte können vorwiegend in die-sen Gebieten ausgebildet werden.

2. Umfassendere Bodeninformationen

Innerhalb Pedozonen und repräsentativer Teilflächen können die Kartierer:innen im Rahmen der Erkundungsphase gezielt Transekte bestimmen, und Bodenprofile mit der neuen rKLABS beschreiben sowie Kartierer:innen ausbilden. Optional können für gebietstypische Bodenprofile Referenzprofile untersucht werden (das KOBO würde die bodenphysikalischen Bestimmungsmethoden leisten).

3. Verbesserung der Repräsentativität des FRIBO-Messnetz

Mit neuen zusätzlichen Standorten für Bohrungen mit pedologischer Beschrei-bung und der Analyse von Bodenei-genschaften gemäss der Auswertung kann die Repräsentativität des FRIBO-Messnetz optimiert werden.

(mit Stand-orten sind hier Standorte im Sinne einer einmaligen Zustandserhebung und nicht im Sinne der FRIBO-Bodendauer-beobachtung gemeint).

4. Hinweiskarten Bodeneigenschaften

Sind Bodeninformationen für neue Standorte vorhanden, können die bestehenden Hinweiskarten für Bodeneigenschaften neu modelliert und verbessert werden. Eine bessere räumliche Auflösung der Hinweiskarten für Bodeneigenschaften liefern dann wiederum bessere Vorinformationen (Konzeptkarte) für die Feldarbeiten von Kartierprojekten.

Alle diese Optionen sind konsistent mit dem Vorgehen in einer schweizweiten Bodenkartierung, d.h. sie sind konzeptionell kompatibel. Für die zeitliche-logistische Planung der Kartierarbeiten im Kanton Freiburg im Rahmen einer Schweizweiten Bodenkartierung liefern die hier vorgestellten Methoden eine wichtige Grundlage. Im Rahmen einer Schweizweiten Bodenkartierung ist ein analoges Vorgehen in operativen Gebietseinheiten wie den Pedozonen vorgesehen.

Bibliografie

- _ Araya S., Ostendorf B., Lyle G., Lewis M., 2018: CropPhenology: An R package for extracting cropphenology from time series remotely sensed vegetation index imagery. *Ecological Informatics* 46, 45-56.
- _ Behrens T., M. Hertzog, K. Schmidt und A. Keller. 2023. TerraPoly - Karten zu multiskaligen Reliefableitungen zur Unterstützung der Konzeptphase und Feldarbeiten in Bodenkartierungen. KOBO-Bericht Nr. 4, BFH-HAFL, CH 3052 Zollikofen-Bern, verfügbar unter www.ccsols.ch
- _ Behrens T., Viscarra Rossel R.A., 2020. On the interpretability of predictors in spatial data science: the information horizon. *Scientific Reports*, 10 (1), 16737.
- _ Behrens, T., Viscarra Rossel, R. A., Kerry, R., MacMillan, R., Schmidt, K., Lee, J., Scholten, T., Zhu, A-X., 2019. The relevant range of scales for multi-scale contextual spatial modelling. *Scientific Reports*. 9: 14800
- _ Behrens, T., MacMillan, R. A., Rossel, R. A. V., Schmidt, K., & Lee, J. .2019. Teleconnections in spatial modelling. *Geoderma*, 354:113854.
- _ Behrens, T., Schmidt, K., MacMillan, R.A., Viscarra Rossel, R., 2018. Multi-scale Digital Soil Mapping with deep learning. *Scientific Reports* 8:15244.
- _ Behrens, T., Schneider, O., Lösel, G., Scholten, T., Hennings, V., Felix-Henningsen, P., Hartwich, R. 2009: Analysis on pedodiversity and spatial subset representativity – The German soil map 1:1.000.000. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 172, 1, 91–100.
- _ Buol, S. W., Hole, F. D., McCracken, R. J. (1973): *Soil genesis and classification*, Univ. Press, Ames, IA, USA.
- _ Burgos S., Tuchschnid R., Tatti D., Oechslin, S. (2023): *Projet d'évaluation de la diversité pédologique du canton de Fribourg*. Projektbericht. BFH-HAFL. Zollikofen.
- _ Butler, B. E. (1959): *Periodic phenomena in landscapes as a basis for soil studies*. Australia Soil Publication 14, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Canberra.
- _ Campbell, J. B., Edmonds, W. J. (1984): The missing geographic dimension to soil taxonomy. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 74, 83–97.
- _ D'Amico ME., Freppaz M., Filippa G., Zanini E., 2014. Vegetation influence on soil forming rate in a proglacial chronosequence (Lys Glacier, NW Italian Alps). *Catena* 113, 122-137.
- _ De Vries FT., Thebault E., Liiri M., Birkhofer K., et al., 2013. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *PNAS* 35, 14296-14301.
- _ Dokuchaev V.V., 1883. Russian chernozem. In: *Selected Works of V.V. Dokuchaev*, Volume 1. Moscow, 1948 (ed. S. Monson), pp. 14– 419. Israel Program for Scientific Translations Ltd. (for USDA-NSF), Jerusalem, Israel.
- _ Dror I., Yaron B., Berkowitz B., 2022: The human impact on all soil forming factors during the Anthropocene. *ACS Environmental Au* 2, 11-19.

- _ Fatholouloumi S., Vaezi, AR., Alavipanah SK., Ghorbani A., Saurette D., Biswas A., 2020: Improved digital soil mapping with multitemporal remotely sensed satellite data fusion: A case study in Iran. *Science of the Total Environment* 721, 137703.
- _ Frampton WJ., Dash J., Watmough G., Milton EJ., 2013: Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82, 83-92.
- _ Haghghi F., Gorji M., Shorafa M., 2010: A study of the effects of land use changes on soil physical properties and organic matter. *Land degradation and development* 21, 496-502.
- _ Hole, F. D. (1978): An approach to landscape analysis with emphasis on soils. *Geoderma* 21, 1–23.
- _ Jenny, H. (1941): *Factors of soil formation*. McGraw-Hill, New York.
- _ Julien P., D. Bouchard, T. Niggli. 2002. FRIBO Réseau d'observation des sols agricoles. Institut Agricole de l'Etat de Fribourg. Grangeneuve. 1725 Posieux. S. 170.
- _ Kuhnt, G. (1994): Regionale Repräsentanz Beiträge zu einer raumorientierten Meßtheorie. Postdoctoral lecture qualification thesis, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany.
- _ Lagacherie, P., Robbez-Masson, J. M., Nguyen-The, N., Barthes, J. P. (2001): Mapping of reference area representativity using a mathematical soilscape distance. *Geoderma* 101, 105–118
- _ Lamichhane S., Kumar L., Wilson B., 2019: Digital Soil Mapping algorithms and covariates for soil organic carbon mapping and their implications: A review. *Geoderma* 352, 395-413.
- _ McBratney, A. B., Hart, G. A., McGarry, D. (1991): The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attributes. *J. Soil Sci.* 42, 513–532.
- _ McBratney A.B., Mendonça-Santos M.L., Minasny B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52.
- _ McSweeney, K., Slater, B. K., Hammer, R. D., Bell, J. C., Gessler, P. E., Petersen, G. W. (1994): Towards a new framework for modeling the soil-landscape continuum, in Amundson, R., Harden, J., Singer, M. (eds.): *Factors of Soil Formation: A 50th Anniversary Retrospective*. SSSA Special Publication 33, 127–145
- _ Milne, G. (1935): Some suggested units of classification and mapping, particularly for East African soils. *Soil Res.* 3, 183–198.
- _ Petel F., Bushmann S., A. von Niederhäusern. 2024. Resultate der Bodenbeobachtung im Kanton Freiburg. FRIBO-Bericht. Koordinationsgruppe für den Bodenschutz KGBo. Grangeneuve, 1725 Posieux.
- _ Pullan, R. A. (1969): The soil resources of West Africa, in Thomas, M. F., Whittington, G. W. (eds.): *Environment and Land Use in Africa*. Methuen, London, pp. 147–191
- _ Rouse JW., Haas RH., Schell JA., Deering DW., 1974: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-Symposium, Washington D.C. 1973.
- _ Ruhe, R. V. 1956: Geomorphic surfaces and the nature of soils. *Soil Sci.* 82, 441–455.
- _ Schmidt, R. 1975: Grundlagen der Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung. *Arch. Acker-, Pflanzenbau Bodenkd.* 8, 533–543.

- _ Schmidt, K., Behrens, T., Friedrich, K., Scholten, T. 2010: A method to generating soilscapes from soil maps. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 173, 2, 163–172.
- _ Silva-Coira F., Paramá JR., De Bernardo G., Seco D., 2021: Space-efficient representations of raster time series. *Information Sciences* 566, 300-325.
- _ Stumpf F., T. Behrens, K. Schmidt und A. Keller. 2023a. Vegetation und Landnutzung -- Karten zur Vegetation und Landnutzung in Raum und Zeit aus der Fernerkundung zur Unterstützung der Konzeptphase und Feldarbeiten in Bodenkartierungen. KOBO-Bericht Nr. 5, BFH-HAFL, CH 3052 Zollikofen-Bern, verfügbar unter www.ccsols.ch
- _ Stumpf F., Behrens T., K. Schmidt und A. Keller. 2023b. Hinweiskarten für Bodeneigenschaften - Landesweit modellierte Karten für Bodeneigenschaften für drei Tiefenstufen. KOBO-Bericht Nr. 6, BFH-HAFL, CH 3052 Zollikofen-Bern, verfügbar unter www.ccsols.ch
- _ Stumpf F., T. Behrens, K. Schmidt und A. Keller. 2024. Exploiting Soil and Remote Sensing Data Archives for 3D Mapping of Multiple Soil Properties at the Swiss National Scale. *Remote Sens.* 2024, 16, 2712. <https://doi.org/10.3390/rs16152712>
- _ Stumpf F., Schneider MK., Keller A., Mayr A., Rentschler T., Meuli RG., Schaepman M., Liebisch, F., 2020: Spatial monitoring of grassland management using multi-temporal satellite imagery. *Ecological Indicators* 113, 106201.
- _ Stumpf, F., Schmidt, K., Goebes, P., Behrens, T., Schönbrodt-Stitt, S., Wadoux, A., Xiang, W., Scholten, T. (2017): Uncertainty-guided sampling to improve digital soil maps. *Catena* 153, 30–38.
- _ Venter SV., Hawkins HJ., Cramer MD., Mills AJ., 2021: Mapping soil organic carbon stocks and trends with satellite-driven high resolution maps over South Africa. *Science of The Total Environment* 771, 145384.

Kompetenzzentrum Boden
BFH-HAFL

Länggasse 85_3052 Zollikofen
info@ccsols.ch_ccsols.ch