



## Neue Methoden in der Bodenkartierung – Pilotprojekt Lommis

**KOBO-Bericht Nr. 11**

Kompetenzzentrum Boden

Juni 2025

**Schweizweit engagiert  
für eine wertvolle Ressource**

## Impressum

**Autor:innen:** Urs Grob, Marie Herzog, Thorsten Behrens, Simon Tutsch, Dominik Zahner, Michael Scheifele, Lucie Greiner, Karsten Schmidt, Felix Stumpf, Gunnar Petter, Marion Wallner, Fabrice Wullschleger, Emilie Carrera, Maxime Siegenthaler und Armin Keller

**Erscheinungsjahr:** 2025

**Herausgeberschaft:** Kompetenzzentrum Boden (KOBO), [ccsols.ch](https://www.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.

**Layout:** Magma Branding, Sandrainstrasse 3, 3007 Bern, [magma-branding.ch](https://magma-branding.ch)

**Empfohlene Zitierweise:** Grob U., Herzog M., Behrens T., Tutsch S., Zahner D., Scheifele M., Greiner L., Schmidt K., Stumpf F., Petter G., Wallner M., Wullschleger F., Carrera E., Siegenthaler M. und A. Keller (2025). Neue Methoden in der Bodenkartierung – Pilotprojekt Lommis. KOBO-Bericht Nr. 11, BFH-HAFL, CH 3052 Zollikofen-Bern, verfügbar unter [www.ccsols.ch](https://www.ccsols.ch)

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



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Ziele</b>	<b>11</b>
1.1 Projektziele	12
1.2 Übersicht Kartierablauf	13
1.3 Massnahmen für die Kommunikation	15
1.4 Projektvorbereitung und -organisation	18
<b>2. Gebietsbeschreibung</b>	<b>19</b>
2.1 Geologie und Geomorphologie	19
2.2 Hauptkulturen im Jahr 2022	21
2.3 Historische Kartenwerke – Beispiel Siegfriedkarte	22
<b>3. Aufbereitung Umwelt- und Geodaten</b>	<b>24</b>
3.1 Reliefanalyse	25
3.2 Vegetations- und Landnutzungsdaten	26
3.3 Spektrale Bodeninformationen	28
3.4 Hinweiskarten für Bodeneigenschaften	29
<b>4. Konzeptphase</b>	<b>30</b>
4.1 Projektperimeter	30
4.2 Beprobungskonzept	31
4.3 Erkundungsphase	34
<b>5. Feldarbeiten</b>	<b>36</b>
5.1 Qualitätssicherung der pedologischen Aufnahmen	37
5.2 Profilstandorte (H1-Standorte)	39
5.3 Bohrungen für Pedologie (H2-Standorte)	52
5.4 Bohrungen für Probenahme und spektroskopische Analysen im Labor (H3-Standorte)	57
<b>6. Labor</b>	<b>58</b>
6.1 Bestimmung von physikalischen Bodeneigenschaften	60
6.2 Regenwurmbiomasse	64
6.3 Messung der MIR-Spektren im Labor	65
<b>7. Kartenerstellung</b>	<b>66</b>
7.1 Datenmanagement	66
7.2 Auswertung der MIR-Spektren	67
7.3 Karten für Bodeneigenschaften	68
7.4 Karten für pedologische Kenngrössen	74
<b>8. Auswertungen und Produkte</b>	<b>77</b>
8.1 Bewässerungseignung und Bewässerungsbedürftigkeit	78
8.2 Kohlenstoffvorrat und Potenzial zur Kohlenstoffanreicherung	80
8.3 Feucht- und Trockenstandortpotenzial	83
8.4 Bodenqualitätsindizes	85
<b>9. Schlussfolgerung und Ausblick</b>	<b>89</b>
<b>10. Abbildungsverzeichnis</b>	<b>92</b>
<b>11. Tabellenverzeichnis</b>	<b>97</b>
<b>12. Anhang A</b>	<b>98</b>
<b>13. Anhang B</b>	<b>99</b>
<b>14. Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>100</b>
<b>15. Literaturverzeichnis</b>	<b>101</b>

## Vorwort



Für eine nachhaltige Nutzung der Böden ist es notwendig, anhand von Bodenkartierungen die Bodeneigenschaften und die Qualität der Böden in ihrer Tiefe zu erheben. Dazu wollen wir als Kompetenzzentrum Boden unseren Beitrag leisten. Verschiedene neue Methoden und Techniken ermöglichen es, Bodenkartierungen zukünftig quantitativ und qualitativ zu verbessern und kosteneffizienter durchzuführen. In Zusammenarbeit mit Kantonen, Bundesämtern und der Privatwirtschaft werden im Rahmen von KOBO-Pilotprojekten und kantonalen Pilotprojekten in den kommenden Jahren in verschiedenen Regionen der Schweiz neue Methoden und Techniken auf ihre Praxistauglichkeit hin getestet und optimiert. Auf diese Weise sollen mit jedem Pilotprojekt stufenweise neue Methoden in die Bodenkartierung integriert werden, sowohl für die Kartierung von landwirtschaftlich genutzten Böden als auch von Waldböden.



Der vorliegende Fachbericht fasst das Vorgehen und die wichtigsten Ergebnisse des zweiten KOBO-Pilotprojekts in Lommis (TG) zusammen. Der Fachbericht richtet sich an ein breites Fachpublikum und dokumentiert daher die einzelnen technischen und methodischen Entwicklungen auf eine möglichst leicht verständliche Art und Weise. Für die zugrunde liegenden wissenschaftlichen Methoden wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen. Der vorliegende Bericht baut auf dem Fachbericht des ersten KOBO-Pilotprojekts (Diemerswil, BE) auf. Fachlich dokumentierte Inhalte aus dem ersten Pilotprojekt werden hier nicht erneut beschrieben, sondern es wird darauf verwiesen. Im Bericht wird auf die neuen Erkenntnisse hinsichtlich der Optimierungen der Arbeitsabläufe, der Schnittstellen, der Qualitätssicherung, des Datenmanagements und der Zusammenarbeit zwischen Feldarbeit, Laborarbeit und Datenwissenschaft eingegangen.

Es freut uns sehr, dass wir in der Gemeinde Lommis im Kanton Thurgau unser zweites Pilotprojekt durchführen durften. Dank der Zustimmung und Unterstützung der Gemeinde und der Bewirtschafter:innen von Lommis sowie der Fachstelle Boden des Kantons Thurgau (AfU), aber auch begünstigt durch das gute Herbstwetter, konnten die Feldarbeiten mit leichter Verzögerung planmässig durchgeführt werden. Der Dank gilt ebenfalls den beiden Ingenieurbüros Dr. Roland Wyss GmbH und Naturkonzept AG, mit welchen die Feldarbeiten durchgeführt wurden. Ein besonderer Dank gilt den Auftraggebern des Bundes, dem Bundesamt für Umwelt (BAFU), dem Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) und dem Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) sowie der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL, Zollikofen) an der Berner Fachhochschule (BFH). Das ganze KOBO-Team möchte sich bei den Projektbeteiligten herzlich für ihre Unterstützung und die gute Zusammenarbeit bedanken.

Urs Grob & Marie Hertzog  
Stellvertretender Leiter & wissenschaftliche Mitarbeiterin  
des Kompetenzzentrums Boden

# Zusammenfassung

Das KOBO hat zum Ziel, die Bodenkartierung in der Schweiz technisch weiterzuentwickeln. Um neue Methoden im Ablauf der Bodenkartierung testen und für die Praxis optimieren zu können, führt das KOBO gemeinsam mit Kantonen, Bundesämtern und Ingenieurbüros in verschiedenen Regionen in der Schweiz Pilotprojekte durch. Das zweite Pilotprojekt, das hier vorgestellt wird, wurde in der thurgauischen Gemeinde Lommis in den Jahren 2022–2024 zusammen mit der Fachstelle Boden des Kantons Thurgau (AfU) und den beiden Ingenieurbüros Dr. Roland Wyss GmbH und Naturkonzept AG umgesetzt. In dem Projekt wurden unter anderem folgende methodische Ziele verfolgt:

- Einbezug von unterstützenden Werkzeugen für die Feldarbeit und der Ausbau von Qualitätssicherungs-Routinen für die bodenkundliche Ansprache
- Zusammenarbeit und Arbeitsteilung mit Kanton und Ingenieurbüros
- Spektroskopische Analyse von Bodenproben unter Laborbedingungen
- Kartenerstellung mit Hilfe von Verfahren aus dem Bereich des Maschinellen Lernens
- Analyse von bodenphysikalischen Eigenschaften mit neuen Labormethoden
- Erstellung von neuen Themenkarten

Der Projektperimeter umfasste 256 ha Landwirtschaftsfläche sowie 22 ha Waldböden. Das Kartiergebiet wird überwiegend ackerbaulich genutzt, mit einem gewissen Anteil an Futterbau mit Kunstwiesen, Wiesen und Weiden. Das Amt für Umwelt des Kantons Thurgau gewährleistete die Bereitstellung der Leitungspläne, die Kommunikation gegenüber der Gemeinde, den Bewirtschafter:innen sowie Eigentümer:innen und die Organisation der Informationsanlässe. Es wurden zudem mehrere kantonsinterne Informationsanlässe für verschiedene Zielgruppen durchgeführt.

Vor der Erstellung des Beprobungskonzepts für die automatisierte Probenahme von Bodenproben wurden sämtlich verfügbaren Pläne für Leitungen und Drainagesysteme digitalisiert und ein räumlicher Schutzpuffer für die Objekte (zum Schutz der Infrastruktur) berechnet. Für den Projektperimeter wurden mehrere Hundert Umwelt- und Geodaten aufbereitet und prozessiert.

In der Erkundungsphase fanden zusammen mit den Ingenieurbüros und dem KOBO mehrere Begehungen des Gebietes statt, um vereinzelt Bohrungen nach dem Catena-Prinzip vorzunehmen und iterativ Profilstandorte festzulegen. Im Sinne eines mehrstufigen Vorgehens wurde ein hierarchisches Beprobungskonzept eingeführt. Dieses gliedert sich in drei Ebenen und umfasst i) die Standorte der Profile (H1), ii) die Standorte der pedologischen Bohrungen (H2), und iii) die Standorte für die Probenahme für konventionelle und spektroskopische Analysenmethoden im Labor (H3).

Im Projektperimeter wurden im Landwirtschaftsland 17 Bodenprofile (H1), 242 H2-Standorte und 745 H3-Standorte erhoben. Für den Wald 2 Profile, 22 H2-Standorte und 66 H3-Standorte. Insgesamt wurden in Lommis an 295 Standorten rund 1283 Horizonte bodenkundlich erfasst. Die mittlere Beprobungsdichte lag bei 0.07 Standorte/ha (H1), 0.94 Standorte/ha (H2) und 2.91 Standorte/ha (H3). Die H3-Standorte wurden in den Tiefenstufen 0–30 cm, 30–60 cm und 60–90 cm beprobt. In Abstimmung mit dem Datenbedarf zur Erstellung von Themenkarten wurde ein minimaler Datensatz (MDS) definiert, der den bestehenden MDS nach

der aktuellen Kartieranleitung KA23 erweitert. Für alle Standorte wurden die Metadaten, Standort- und Bodendaten direkt im Feld digital mit der Webapplikation Soildat erfasst. Für die Probenlogistik in Feld und Labor wurden konsequent QR-Codes in allen Arbeitsabläufen genutzt. Zu Beginn der Feldarbeiten wurden die Ingenieurbüros in die neue Vorgehensweise eingeführt und für die neuen digitalen Feldtools geschult.

Die Qualitätssicherung der pedologischen Aufnahmen wurde an allen H1- und H2-Standorten durchgeführt. Es wurde grundsätzlich zwischen einer Prüfung der pedologischen Aufnahme an einem Standort (Punkt-QS) oder im Kontext der Flächenkartierung (Flächen-QS) unterschieden. Für beide Prüfungen wurden Arbeitsabläufe etabliert. Für die Punkt-QS wurde ein bestehendes R-Skript weiterentwickelt, welches auf die Soildat-Datenbank zugreift und vorgegebene Regeln automatisiert prüft. Auf diese Weise konnte die QS der pedologischen Aufnahmen verbessert werden.

Im Projektgebiet dominieren verbraunte, lehmige Braunerden. In den Kuppenlagen finden sich kieshaltige flachgründige wenig entwickelten Böden (Regosole), während in den tiefsten Lagen grundwassergeprägte Böden (Braunerde-Gley, Buntgley, Fahlgley) vorkommen. Insgesamt ist das räumliche Muster der Verbreitung der Böden auch stark anthropogen beeinflusst, z.B. durch Aufschüttungen, Drainagen und ehemalige Wölbacker. Der  $p_nG$ -Werte liegen im Bereich von 9 cm bis 108 cm, der Mittelwert liegt bei 50 cm. Im Untersuchungsgebiet liegen Böden mit geringer  $p_nG$  im Bereich der Senken und in erodierten Kuppenlagen vor (10–50 cm), während Böden im Unterhangbereich durch Bodenverlagerung häufig sehr tiefgründig sind (70–100 cm).

Für die flächenhafte Erhebung des Raumgewichts, der Lagerungsdichte Feinerde sowie des Skeletthalts für drei Tiefenstufen wurden mit dem Bohrfahrzeug an 19 Profilen und an 46 H2-Standorten insgesamt 178 Volumenproben mittels Hülsen (Durchmesser 5 cm und 8 cm) entnommen. Im Vergleich zu den Messwerten mit 100 ml-Zylinderproben waren Raumgewicht und Lagerungsdichte wie erwartet mit den Hülsen systematisch höher. Dieser systematische Fehler kann jedoch durch einen empirischen Faktor korrigiert werden, wobei mit den 8 cm-Hülsen bessere Ergebnisse erzielt wurden als mit den 5 cm-Hülsen. Zudem wurden an 12 Bodenprofilen insgesamt 63 Zylinderproben mit einem Volumen von 250 cm<sup>3</sup> entnommen und im Labor das Wasserretentionsverhalten, das Grobporenvolumen, die Anteile der Grob-, Mittel- und Feinporen sowie das für Pflanzen leicht bzw. schwer verfügbare Wasser im Boden mit neuen Geräten bestimmt (HYPROP, WP4C und KSAT).

Für die Erstellung von Karten für Bodeneigenschaften für die oben genannten drei Tiefenstufen wurden insgesamt 2829 Proben vorwiegend an den H3-Standorten sowie von den H1- und H2-Standorten im Labor spektroskopisch gemessen. Die Spektren wurden anhand von 181 Referenzanalysen auf die gemessenen Bodeneigenschaften kalibriert und auf alle Bodenproben der H3-Standorte übertragen. Aufgrund der Weiterentwicklung der QS für die Messung der Spektren im Labor und der Optimierung in der Modellierung der Spektren zeigte die Kalibrierung der Spektren mit einem Bestimmtheitsmass ( $R^2$ ) von 0.86 eine sehr hohe Güte.

Für die Erstellung der Bodenkarten wurden verschiedene statistische Methoden aus dem Bereich des Maschinellen Lernens eingesetzt. Mit der räumlichen Modellierung (Regionalisierung) der am Punkt erhobenen Bodendaten wurden Raster- und Polygonkarten für 12 Bodeneigenschaften für jeweils drei Tiefenstufen und für 11 pedologische Kennwerte erstellt. Die räumliche Variation für jede Bodeneigenschaft und -kennwert kann somit individuell dargestellt und genutzt werden. Mit den Modellen zur Regionalisierung konnten gute Gütemasse erzielt werden. Im Schnitt lag das Bestimmtheitsmass ( $R^2$ ) für Bodeneigenschaftskarten bei einem Wert von 0.6. Weiterführende Informationen zu den Profilbeschreibungen (inkl. Eichprotokoll und Profil-Steckbriefe), den Laboranalysen und der Kartenerstellung sind im Anhang A dokumentiert.

Auf Basis der Bodenkarten und weiteren Standortfaktoren wurden für das Projektgebiet 25 Themenkarten aus den Bereichen Gewässer- und Grundwasserschutz (Regulierungsfunktionen), Klimaschutz (Kohlenstoff), Landwirtschaft (Optimierung Kalkung und Düngung), Naturschutz (Feuchtstandort- und Trockenpotenzial), Raumplanung (Bodenqualitätsindex), Trockenheit (Bewässerung) und Wald (Säurestatus) berechnet. Diese Themenkarten sind als Vorschläge zu betrachten. Die Beurteilungsmethoden stammen vorwiegend aus nationalen und internationalen Studien. Es bedarf zukünftig einen Dialog mit den jeweiligen Nutzergruppen, um gemeinsam praxistaugliche Themenkarten und Produkte (weiter) entwickeln zu können. Im Sinne der Nachvollziehbarkeit und Transparenz sind die Beurteilungsmethoden detailliert im Anhang B dokumentiert.

Schliesslich wurden fünf internationale Methoden zur Erstellung eines Bodenqualitätsindizes auf Basis der Themenkarten für Bodenfunktionen verglichen. Der Vergleich zeigte für Lommis eindrücklich, dass es nicht eine einzelne ideale Methode zur Erstellung von einem Bodenqualitätsindex gibt, die es erlaubt ausgewählte Bodenfunktionen optimal zu aggregieren. Stattdessen orientieren sich die internationalen Methoden an unterschiedlichen Fragestellungen und benutzen zudem unterschiedliche statistische Bewertungsregeln zur Aggregation einzelner Bodenfunktionen zu einem Bodenindex. Wie und welche Bodenfunktionen zu einem Index aggregiert werden sollen, ist für ein bestimmtes Gebiet jeweils stark von gesellschaftlichen Fragestellungen geprägt und daher in einem partizipativen Prozess mit allen beteiligten Akteuren zu bestimmen. Ausgangspunkt für diesen Prozess stellen die Themenkarten für Bodenfunktionen dar.

## Résumé

Le CCSols a pour objectif de faire progresser le développement technique de la cartographie des sols en Suisse. Afin de tester de nouvelles méthodes pour la cartographie des sols et de les optimiser pour le travail pratique, le CCSols mène des projets pilotes dans différentes régions de Suisse en collaboration avec les cantons, les offices fédéraux et les bureaux d'ingénieurs. Le deuxième projet pilote présenté dans ce rapport a été mis en œuvre dans la commune thurgovienne de Lommis entre 2022 et 2024. Il a été mené par le CCSols en collaboration avec le Service cantonal des sols (AfU) et deux bureaux de cartographie (Dr. Roland Wyss GmbH et Naturkonzept AG). Le projet avait notamment les objectifs méthodologiques suivants :

- \_ Utilisation d'outils d'aide pour le travail sur le terrain et développement de procédure de contrôle qualité pour les descriptions pédologiques.
- \_ Collaboration et répartition des tâches entre le CCSols, le canton et les bureaux de cartographie.
- \_ Analyses spectroscopiques en laboratoire des échantillons pédologiques.
- \_ Création de cartes à l'aide de méthodes d'apprentissage automatique (machine learning).
- \_ Analyse des propriétés physiques des sols à l'aide de nouvelles méthodes de laboratoire.
- \_ Création de nouvelles cartes thématiques.

Le périmètre du projet comprenait 256 hectares de sols agricoles et 22 hectares de sols forestiers. La zone cartographiée est principalement utilisée pour l'agriculture avec quelques parcelles consacrées à la culture fourragère telles que des prairies artificielles, des prairies et des pâturages. La mise à disposition des plans des conduites et la communication entre la commune, les exploitants et les propriétaires, ainsi que l'organisation des séances d'information ont été assurées par le Service de l'environnement, division Déchets et sols, du canton de Thurgovie. Plusieurs séances cantonales d'information menées en interne ont également été organisées pour différents groupes cibles. Avant d'élaborer le concept d'échantillonnage destiné à l'échantillonnage automatisé (réalisé à l'aide d'un véhicule de sondage), tous les plans disponibles des conduites et des systèmes de drainage ont été numérisés et une zone tampon a été calculée autour de ces éléments (afin de protéger les infrastructures). Plusieurs centaines de données environnementales et géographiques ont été préparées et traitées pour le périmètre du projet.

Au cours de la phase d'investigation, les bureaux d'ingénieurs et le CCSols ont réalisé plusieurs visites du site afin de procéder à quelques sondages le long d'un catena et de déterminer de manière itérative les emplacements des profils. Afin de suivre une démarche en plusieurs étapes, un concept d'échantillonnage hiérarchisé a été mis en place. Celui-ci se divise en trois niveaux et comprend i) les emplacements des profils (H1), ii) les emplacements des sondages (H2) et iii) les emplacements des prélèvements d'échantillons destinés aux méthodes d'analyses conventionnelles et spectroscopiques en laboratoire (H3).

Dans les terres agricoles contenues au sein du projet, 17 profils (H1), 242 sondages (H2) et 745 points d'échantillonnage (H3) ont été réalisés. Dans la forêt, 2 profils (H1), 22 sondages (H2) et 66 sites d'échantillonnage (H3) ont été effectués. Au total, environ 1283 horizons ont été relevés à Lommis sur 295 sites. La densité moyenne d'échantillonnage était de 0,07 site/ha pour les profils (H1), de 0,94 site/ha pour les sondages (H2) et de 2,91 sites/ha pour l'échantillonnage (H3). Les sites

d'échantillonnage (H3) ont été échantillonnés à trois profondeurs (0–30 cm, 30–60 cm et 60–90 cm). En fonction des données nécessaires à l'élaboration des cartes thématiques, un jeu de données minimales (MDS<sup>1</sup>) complétant le MDS existant (conforme au manuel de cartographie actuel KA23) a été défini. Les métadonnées, les données de localisation et les données pédologiques de tous les sites ont été saisies directement sur le terrain à l'aide de l'application web Soildat. Des codes QR ont été utilisés de manière systématique pour la logistique des échantillons dans tous les processus de travail sur le terrain et en laboratoire. Au début des travaux sur le terrain, les bureaux d'études ont été informés sur la nouvelle procédure et formés aux nouveaux outils numériques de terrain.

Le contrôle qualité (CQ) des relevés pédologiques a été réalisé sur tous les sites H1 et H2. Une distinction a été faite entre le contrôle qualité des relevés pédologiques d'un site (CQ ponctuel) et le contrôle qualité des données surfaciques (CQ surfacique). Des procédures ont été mises en place pour ces deux types de contrôle. Pour le CQ ponctuel, un script R existant a été perfectionné afin de pouvoir reprendre les données contenues dans la base de données Soildat et de vérifier automatiquement le respect des règles prédéfinies. Le CQ des relevés pédologiques a ainsi pu être amélioré.

Les Sols bruns loameux brunifiés dominent dans la zone du projet. Les sols peu évolués superficiels (Régosols) se situent sur les crêtes, tandis que les sols influencés par les eaux souterraines (Gley-Sols bruns, Gley oxydés et Gley réduits) se retrouvent dans les zones les plus basses. Dans l'ensemble, le modèle spatial illustrant la répartition des sols est également fortement influencé par l'anthropisation, par exemple par des remblais, des drainages et des cultures sur billons. La profondeur utile (PU) des sols dans le périmètre varie de 9 cm à 108 cm avec une profondeur moyenne de 50 cm. Les sols à faible PU se situent au niveau des dépressions et des croupes érodées (10–50 cm), tandis que les sols en bas de pente sont souvent très profonds (70–100 cm) en raison du colluvionnement.

Les cartouches (5 ou 8 cm de diamètre) du véhicule de sondage ont été utilisées pour prélever sur 3 profondeurs des échantillons volumiques destinés à mesurer la masse volumique apparente, la masse volumique apparente de la terre fine et la teneur en squelette du sol. Au total de 178 échantillons volumiques provenant de 19 profils et de 46 sondages ont été prélevés. Les résultats d'analyses des échantillons cylindriques de 100 ml étaient, comme prévu, systématiquement plus élevés pour la masse volumique apparente et la masse volumique apparente de la terre fine par rapport aux échantillons prélevés à l'aide de cartouches. Cette erreur systématique peut toutefois être corrigée par un facteur empirique, bien que les résultats obtenus avec les cartouches de 8 cm soient meilleurs que ceux obtenus avec les cartouches de 5 cm. De plus, un total de 63 échantillons cylindriques d'un volume de 250 cm<sup>3</sup> ont été prélevés sur 12 profils. La courbe de rétention d'eau, le volume des pores grossiers, le pourcentage de pores grossiers, moyens et fins ainsi que l'eau facilement ou difficilement disponible pour les plantes dans le sol ont été déterminés en laboratoire à l'aide de nouveaux appareils (HYPROP, WP4C et KSAT).

Afin de réaliser des cartes de propriétés des sols pour les trois profondeurs susmentionnées, 2829 échantillons, provenant principalement de sites H3, mais aussi de sites H1 et H2, ont été analysés en laboratoire à l'aide de la spectroscopie. Une partie des spectres ont été calibrés grâce à 181 analyses de référence. Ces spectres calibrés ont ensuite permis d'ajuster tous les spectres provenant des autres prélèvements H3. Grâce au perfectionnement du CQ des spectres mesurés en laboratoire et à l'optimisation de la modélisation des spectres, le coefficient de corrélation (R<sup>2</sup>) entre les spectres et les spectres calibrés était de 0,86, ce qui est un très bon résultat.

<sup>1</sup> MDS: abréviation de «minimaler Datensatz»

Diverses méthodes statistiques issues de l'apprentissage automatique ont été utilisées pour réaliser les cartes des sols. La modélisation spatiale (régionalisation) des données pédologiques relevées ponctuellement a permis de créer des cartes matricielles et vectorielles sur 12 propriétés des sols pour 3 profondeurs et pour 11 caractéristiques pédologiques. La variation spatiale de chaque propriété et caractéristique pédologiques peut ainsi être représentée et exploitée individuellement. Les modèles de régionalisation ont permis d'obtenir de bons résultats. En moyenne, le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) pour les cartes des propriétés des sols était de 0,6. De plus amples informations sur les descriptions des profils (y compris le protocole d'harmonisation et les fiches descriptives des profils), les analyses de laboratoire et la création des cartes sont disponibles dans l'annexe A.

Sur la base des cartes des sols et d'autres facteurs liés aux sites, 25 cartes thématiques ont été établies pour la zone du projet dans les domaines de la protection des eaux de surface et des eaux souterraines (fonctions de régulation), de la protection du climat (carbone), de l'agriculture (optimisation du chaulage et de la fertilisation), de la protection de la nature (sites humides et potentiels secs), de l'aménagement du territoire (indice de qualité des sols), de la sécheresse (irrigation) et de la forêt (état d'acidification). Ces cartes thématiques doivent être considérées comme des propositions. Les méthodes d'évaluation proviennent principalement d'études nationales et internationales. À l'avenir, des échanges avec les différents groupes d'utilisateurs seront nécessaires afin de pouvoir (continuer à) développer ensemble des cartes thématiques et des produits adaptés aux travaux pratiques. Dans un souci de traçabilité et de transparence, les méthodes d'évaluation sont documentées en détail dans l'annexe B.

Enfin, cinq méthodes internationales ont été comparées pour établir un indice de qualité des sols sur la base des cartes thématiques des fonctions des sols. La comparaison a clairement montré qu'il n'existe pas une méthode idéale pour établir un indice de qualité des sols qui permette d'agréger de manière optimale les fonctions sélectionnées. Les méthodes internationales s'orientent plutôt vers diverses problématiques et utilisent en outre différentes règles d'évaluation statistique pour agréger les différentes fonctions des sols en un indice. La démarche utilisée et le choix des fonctions des sols agrégées pour former un indice sont fortement influencés par les questions sociales. Par conséquent, ceux-ci doivent être déterminés par un processus participatif avec tous les acteurs impliqués. Les cartes thématiques des fonctions des sols constituent le point de départ de ce processus.

# 1. Einleitung und Ziele

Eine Bodenkarte kann als ein Inventar verstanden werden, das die Eigenschaften der Böden in einem vertikalen Profil bis ca. 1–1.5 m Tiefe beschreibt. Mit diesen Bodeninformationen können die Qualität der Böden, ihre Nutzungseignung und ihre Funktionen als Umweltkompartiment beurteilt werden. Wichtige bodenkundliche Informationen, die im Rahmen einer Kartierung erhoben werden, sind unter anderem der Humus- und Tongehalt, der Bodenaufbau und seine Horizontschichten, die Gründigkeit, der Skelettgehalt, die Vernäsungseigenschaften und der Wasserhaushalt. Zusammen mit der pedologischen Beschreibung und Klassifikation der Böden liefern diese Bodeninformationen wichtige Grundlagendaten für viele Anwendungen und Fragestellungen (Abbildung 1). Die Produkte einer modernen Bodenkartierung liefern somit eine Vielzahl von Anwendungen und generieren einen hohen Mehrwert für die Gesellschaft (Steiger et al. 2018; Keller et al. 2018).

Das KOBO hat zum Ziel, die technische Weiterentwicklung der Bodenkartierung in der Schweiz zu forcieren. Dazu koordiniert und standardisiert es Methoden und Instrumente für die Erhebung, Bewertung und Bereitstellung von Bodeninformationen in der Schweiz. Mit technischen Innovationen und der Praxiserfahrung von Ingenieurbüros und Kantonen soll die Kartierung grösserer Gebiete effizienter gestaltet werden, während gleichzeitig der Umfang und die Qualität der zu erhebenden Bodeneigenschaften und -kennwerte erhöht werden. Um neue Methoden im Ablauf der Bodenkartierung testen und für die Praxis optimieren zu können, führt das Kompetenzzentrum Boden in den kommenden Jahren gemeinsam mit Kantonen, Bundesämtern und Ingenieurbüros in verschiedenen Regionen in der Schweiz Pilotprojekte durch. Das zweite Pilotprojekt, das hier vorgestellt wird, wurde in der thurgauischen Gemeinde Lommis umgesetzt.

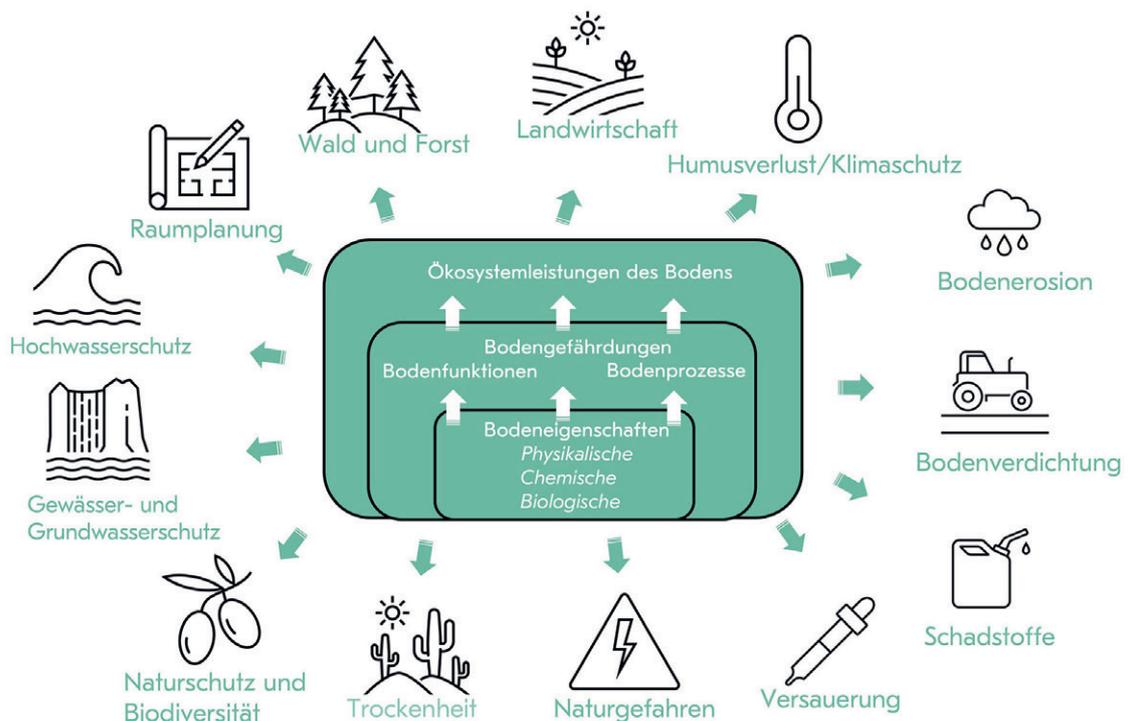


Abbildung 1: Bodeninformationen können einen Mehrwert in vielen Themengebieten erzeugen. Bodeneigenschaften haben einen grossen Einfluss auf die im Boden ablaufenden Prozesse und somit auf die Leistungen des Bodens (Produktionsfunktion, Regulierungsfunktion, Habitatfunktion). Sowohl die Leistungen des Bodens als auch die Risiken für Bodengefährdungen gilt es in geeigneten Themenkarten den verschiedenen Nutzergruppen zu kommunizieren.

## 1.1 Projektziele

In Zusammenarbeit mit dem Kanton Thurgau und dem Kartierpersonal aus zwei regional verankerten Ingenieurbüros startete im August 2022 das KOBO-Pilotprojekt in der Gemeinde Lommis. Im gesamten Projektgebiet wurden rund 256 ha Landwirtschaftsflächen sowie 22 ha Waldböden (siehe Abbildung 2) kartiert. Der Projektperimeter wird in Kapitel 2 näher beschrieben. Auf Basis der Erfahrungen aus dem ersten Pilotprojekt wurden folgende methodischen Ziele verfolgt:

- Einbezug von unterstützenden Werkzeugen für die Feldarbeit: Anwendung von digitalen Grundlagenkarten (z. B. Beprobungsplan) und Datenerfassung der bodenkundlichen Beschreibung auf einem Feld-Tablet
- Aufbau, Anwendung und Ausbau von Qualitätssicherungs-Routinen am Punkt (Profile und Bohrungen) und für Flächen-daten
- Zusammenarbeit mit zwei regionalen Ingenieurbüros bei der Beschreibung und Klassierung der Böden an Bodenprofilen und Bohrungen
- Ausbildung von Kartierpersonal und Wissensvermittlung für Anwendergruppen
- effiziente Beprobung mit einem automatisierten Probenstecher für verschiedene Tiefenstufen (durch externen Dienstleister)

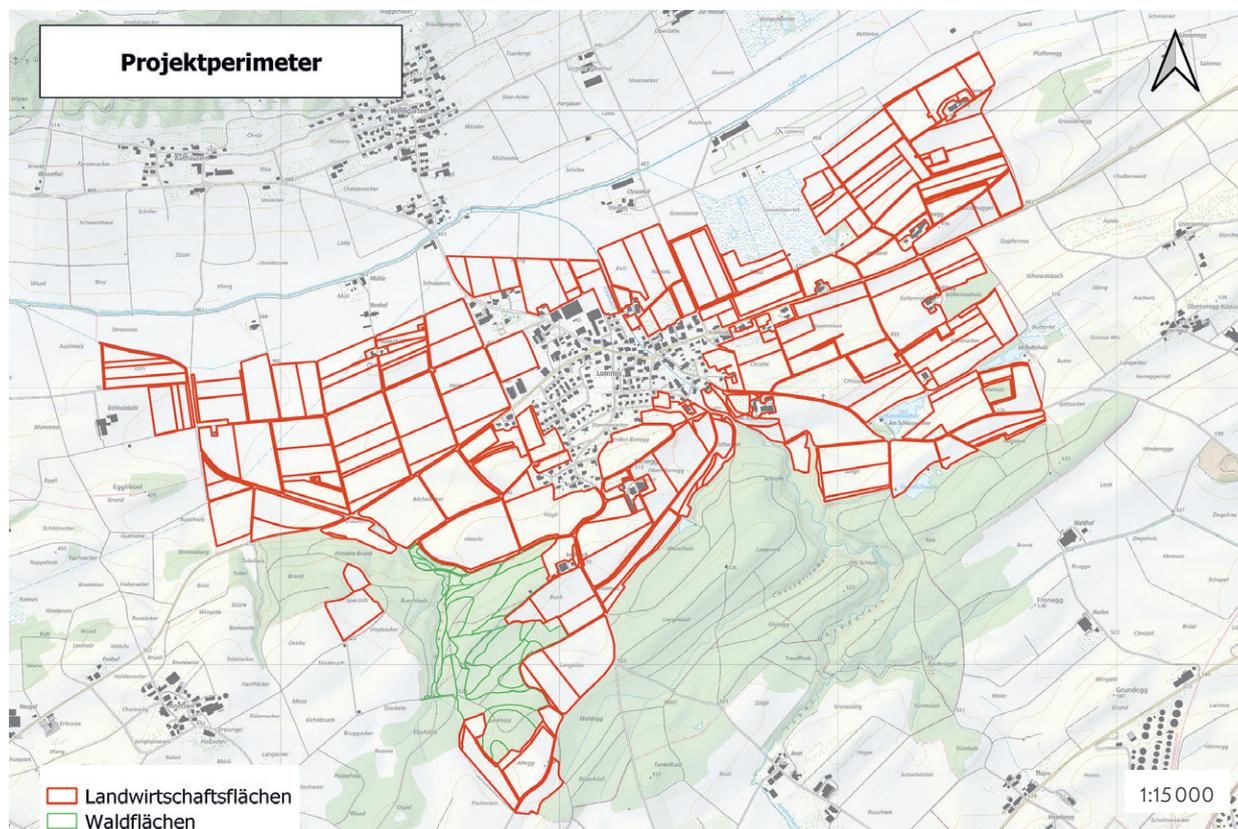


Abbildung 2:  
Projektperimeter des KOBO-Pilotprojekts in Lommis  
(Hintergrundkarte: Landeskarte farbig von swisstopo.ch).

- \_ Spektroskopische Analyse von Bodenproben im MIR-Spektralbereich hinsichtlich Textur, pH, Humusgehalt und Kationenaustauschkapazität unter Laborbedingungen
- \_ Kartenerstellung für Bodeneigenschaften und pedologische Kennwerte mit Hilfe von Verfahren aus dem Bereich des Maschinellen Lernens (Regionalisierung)
- \_ Analyse von bodenphysikalischen und bodenbiologischen Eigenschaften für ausgewählte Bodenprofile
- \_ Die Bereitstellung von Themenkarten, die bisher im ersten Pilotprojekt noch nicht entwickelt wurden (z.B. Regulierungsfunktion für Nährstoffe)

Aus den Erfahrungen und Erkenntnissen des ersten Pilotprojekts wurde in Lommis vollständig auf den Einsatz von Feldspektroskopie (VIS/NIR und Gamma) verzichtet. Im Fachbericht zum ersten KOBO-Pilotprojekt (Keller et al. 2023) sind die Arbeiten und Ergebnisse zur Feld- und Laborspektroskopie im Detail beschrieben.

---

## 1.2 Übersicht Kartierablauf

Der Projektablauf einer Bodenkartierung gliedert sich grundsätzlich in drei Phasen (siehe Abbildung 3): erstens die Projektvorbereitung und Konzeptphase, zweitens die eigentliche Feldkartierung und Kartenerstellung sowie drittens die erweiterte Auswertung der erhobenen Bodendaten zu Produkten und Themenkarten. Abbildung 3 stellt den Ablauf einer Bodenkartierung übersichtlich, aber sehr vereinfacht dar. Innerhalb und zwischen den einzelnen der sechs Kartierkomponenten sind iterative Prozessabläufe erforderlich. Die sechs Kartierkomponenten sind im Detail in Keller et al. (2023) und auf den Webseiten des KOBO beschrieben (siehe [www.ccsols.ch/Böden\\_kartieren](http://www.ccsols.ch/Böden_kartieren)).

Für die Bodenkartierung in Lommis wurde, wie bereits erwähnt, das Beprobungskonzept für die Kartierung der Böden angepasst. Im Sinne eines mehrstufigen Vorgehens wurde ein hierarchisches Beprobungskonzept getestet. Dieses gliedert sich in drei Ebenen und umfasst i) die Standorte der

Profile (H1), ii) die Standorte der pedologischen Bohrungen (H2), und iii) die Standorte für die Probenahme für konventionelle und spektroskopische Analysenmethoden im Labor (H3). Dabei nimmt die Anzahl der Standorte von den Profilen H1 bis hin zu den Standorten für die Probenahme H3 pro Fläche stets zu. Umgekehrt nimmt der Informationsumfang der aufgenommenen Attribute (minimal zu erhebender Datensatz) von den Profilen H1 bis hin zu den Standorten für die Probenahme H3 stark ab (siehe Kapitel 4.2).

Mit einem hierarchischen Beprobungskonzept kann grundsätzlich auf unterschiedliche heterogene Gebiete flexibel mit angepassten Beprobungsdichten pro Hierarchiestufe reagiert werden. In relativ homogenen Gebieten kann die Dichte der Stufen H1, H2 und H3 variabel herabgesetzt, in eher heterogenen Gebieten hingegen erhöht werden. Diesbezüglich gilt es zukünftig Praxiserfahrungen zu sammeln für möglichst unterschiedliche Regionen in der Schweiz.

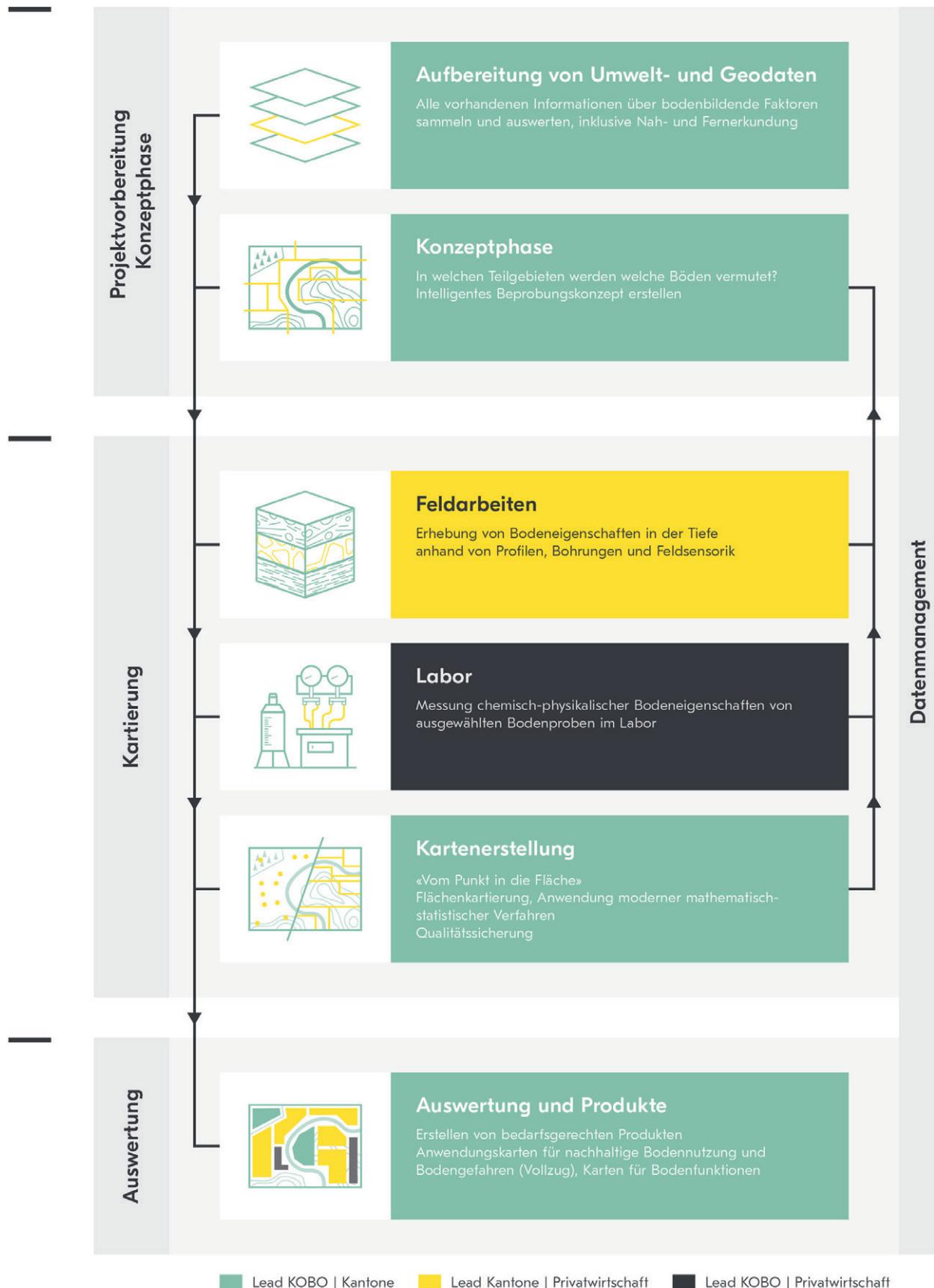


Abbildung 3: Kartierablauf in drei Phasen: 1) Projektvorbereitung und Konzeptphase, 2) Kartierung mit Feldarbeit und Erstellung Grundlagenkarten, 3) Auswertung und Produkte.

---

## 1.3 Massnahmen für die Kommunikation

Eine offene und umfassende Kommunikation mit Eigentümer:innen, Landwirt:innen, Kanton und Gemeinde ist für das erfolgreiche Durchführen eines Kartierprojektes eine essenzielle Voraussetzung. Der Zeitstrahl in Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Bodenkartierung und die verschiedenen Kommunikationsmassnahmen. Die Informationen an die verschiedenen Stakeholder:innen über das Projekt erfolgte zeitlich gestaffelt. Hierzu zählt der frühzeitige Erstkontakt mit Kanton und Gemeinde, vor allem aber auch die direkte Kontaktaufnahme mit den Bewirtschafter:innen und Eigentümer:innen oder weiteren Stakeholdern. Im Pilotprojekt in Lommis wurde der Erstkontakt dank der zeitlich begrenzten Teilzeitstelle des Kantons bewerkstelligt. Zudem fanden mehrere kantonsinterne Anlässe statt (siehe Abbildung 5).

Alle betroffenen Bewirtschafter:innen wurden im August 2022 persönlich durch den Kanton kontaktiert und in einem ersten Schritt per Brief über das Pilotprojekt schriftlich informiert. Das Wissen und die Erfahrung der Landwirt:innen in Bezug auf ihren Boden sind für das Projekt von hohem Wert. Persönliche Gespräche sind diesbezüglich ein wichtiger Schlüssel zum Erfolg. Im Vorfeld zu den Feldarbeiten wurde eine Informations- und Austauschveranstaltung durchgeführt, in der über alle bevorstehenden Feldarbeiten umfassend informiert wurde und offene Fragen geklärt werden konnten.

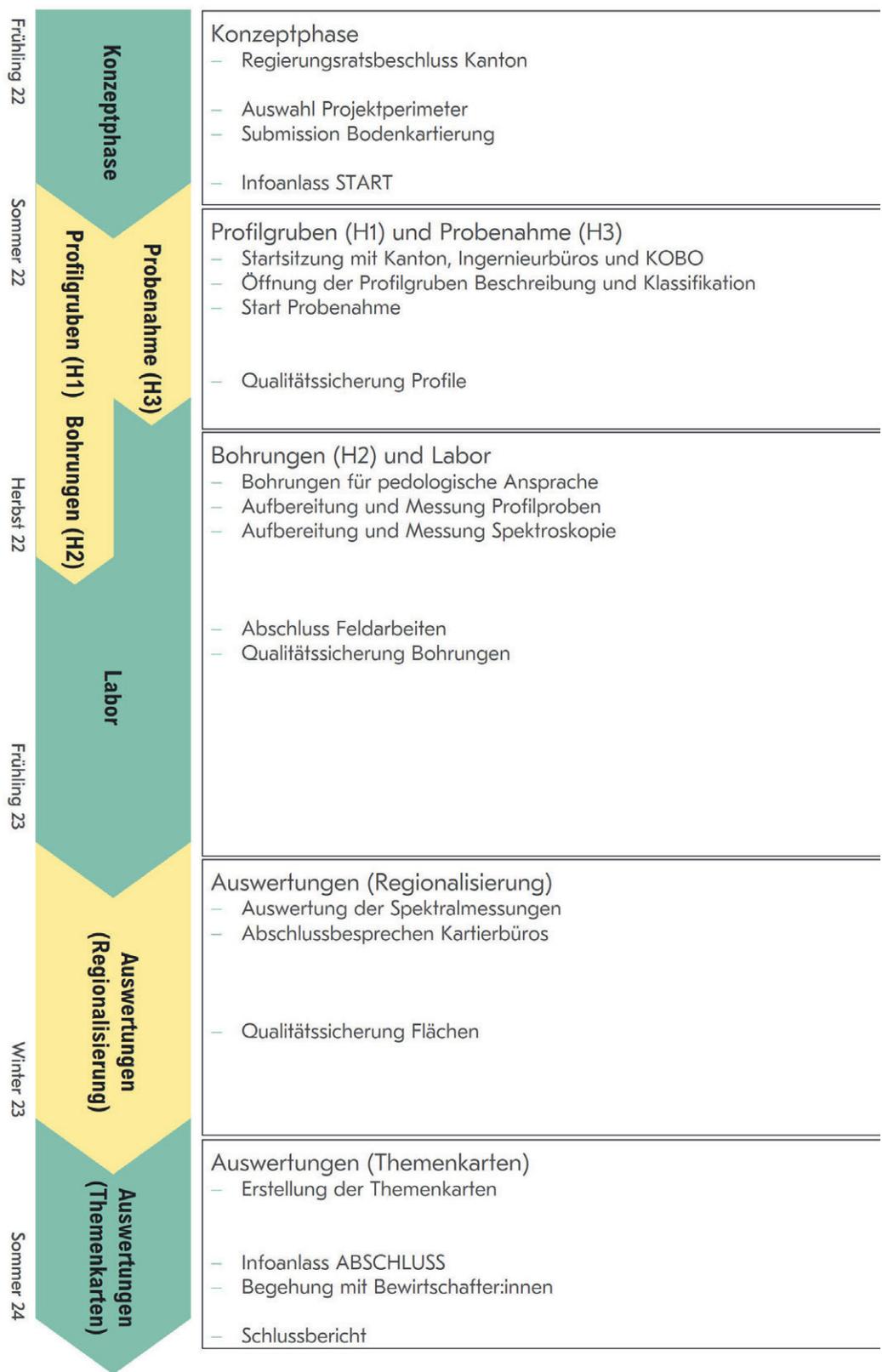


Abbildung 4:  
Zeitlicher Ablauf der begleitenden Kommunikationsmassnahmen im Projekt Lommis.



Abbildung 5:  
Massnahmen zur Kommunikation im Kartierprojekt in Lommis (TG):  
Infoanlass in der Gemeinde Lommis mit Infotafeln für die mündliche Einführung in das Projekt sowie Abschlussanlass für Gemeinde und Landwirte mit Präsentation der Ergebnisse (oben links und rechts); Ausstellung für Böden und Bodenkartierung an der AgriEmotion 2023 sowie kantonaler Informationsanlass für lokale Medien im Kanton TG (unten links und rechts).  
Quelle: KOBO.

Während der Feldarbeiten stand zudem der Kanton und die Projektleitung des KOBO intensiv mit den Bewirtschafter:innen im Austausch, um Details wie die Zugänglichkeit zu den Parzellen oder die zeitliche Planung der Bohrungen mit der Beweidung von Grasland bzw. mit der Ernte abzusprechen. Nachdem die ersten Grundlagen- und Themenkarten zu den Böden in Lommis erstellt waren, wurden im Rahmen eines zweiten Informationsanlasses im März 2024 die Ergebnisse mit den Bewirtschafter:innen sowie dem Kanton diskutiert.

Im Anschluss daran konnten sich alle Interessierten für Feldbegehungen mit dem KOBO in Verbindung setzen und parzellenbezogene Karten anfordern. Die Begehungen mit den Grundlagen- und Themenkarten erlaubten es dem KOBO, die Bedürfnisse der einzelnen Bewirtschafter:innen besser kennenzulernen und Rückmeldungen zu den erstellten Themenkarten direkt einzuholen.

---

## 1.4 Projektvorbereitung und -organisation

Die Projektvorbereitung durch den Kanton und dem KOBO beinhaltete folgende Meilensteine:

- \_ Interne Vorabklärungen im Kanton und Vorbereitung Regierungsratsbeschluss
- \_ Erarbeiten eines Vorgehenskonzeptes für die Ausführung der Feldarbeiten
- \_ Bereitstellung der externen Dienstleistungen inklusive internen Laborressourcen für die Aufbereitung der Bodenproben
- \_ Kommunikation mit der Fachstelle Boden des Kantons Thurgau, der Gemeindeverwaltung Lommis sowie den betroffenen Bewirtschafter:innen und Eigentümer:innen

Die generelle Konzeption des Projektes erfolgte durch das KOBO gemäss seinem Auftrag von Seiten der Bundesämtern und in Zusammenarbeit mit dem Kanton. Zusammen mit dem Kanton wurde das Projektgebiet im Rahmen einer Begehung ausgewählt. Für das Projektmanagement stellte der Kanton TG über das Amt für Umwelt temporär eine Person mit Teilzeitanstellung zur Verfügung. Ein Grossteil der Feldarbeiten wurde durch die beiden Ingenieurbüros Dr. Roland Wyss GmbH und Naturkonzept AG durchgeführt. Zu Beginn der Feldarbeiten fanden für die Ingenieurbüros Einführungen in die neue Vorgehensweise und für die neuen digitalen Feldtools statt.

## 2. Gebietsbeschreibung

Der Projektperimeter für das Gebiet Lommis beträgt rund 278 ha, wovon rund 22 ha im Wald liegen. Nachfolgend wird das Kartiergebiet anhand von direkt verfügbaren Umweltvariablen beschrieben, während in Kapitel 3 auf die Aufbereitung und Prozessierung weiterer Umwelt- und Geodaten eingegangen wird, insbesondere auf Terrain-

analysen und die Prozessierung von Produkten aus der Fernerkundung. Für das Gebiet wurden alle aufbereiteten Geo- und Umweltvariablen in einem GIS zusammengestellt und den Kartierenden während der Feldkartierung mittels Tablets als QField-Projekt zur Verfügung gestellt.

---

### 2.1 Geologie und Geomorphologie

Das Ausgangsmaterial und der Wasserhaushalt sind die wichtigsten Faktoren der Bodenbildung. Diese Faktoren stehen gegenseitig und mit dem Relief in engem Zusammenhang. Insgesamt dominieren im Gebiet Lommis Böden aus Moränenmaterial (Till), insbesondere steilere Lagen zeigen stärkeren Molasseeinfluss. In den Tiefenlagen dominieren hingegen alluviale Bodenbildungen. In gut drainierten Hoch- und Hanglagen sind tiefgründige verbrauchte Böden zu finden, in den Senken nimmt der Grundwassereinfluss zu. Über das gesamte Gebiet hinweg ist mit anthropogenem Einfluss zu rechnen.

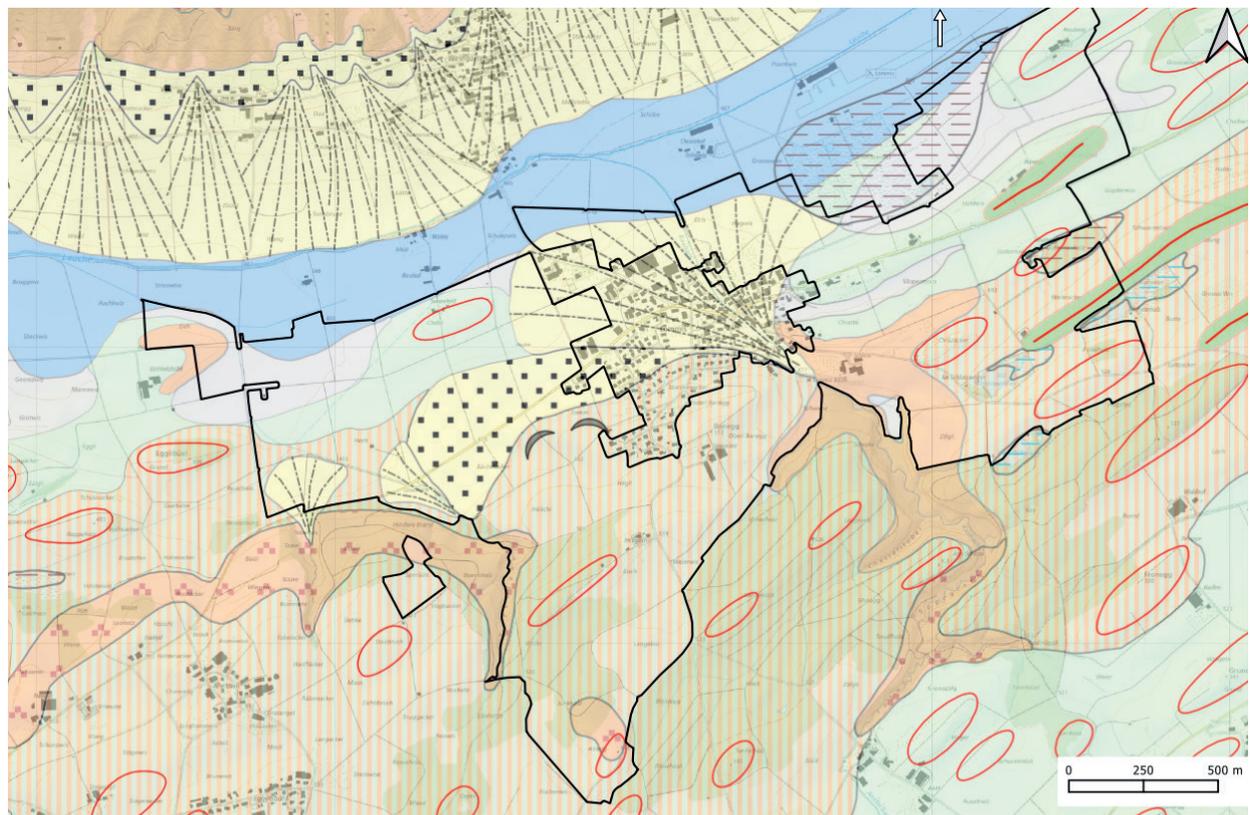
Gemäss der geologischen Karte (Blatt 1073 Will, siehe Abbildung 6), den Bohrdaten des kantonalen Geoinformationssystems sowie gemäss der Felsreliefkarte und der durchgeführten Sondierungen, besteht der Felsuntergrund ausschliesslich aus fluvioterrestrischen Sedimenten des Hörnli-Schuttfächers der Obereren Süsswassermolasse (OSM). Der Felsuntergrund wird von bis zu 35 m mächtigen quartären Ablagerungen überdeckt (Bundesamt für Landestopografie swisstopo). Die Gesteinsserien bestehen überwiegend aus Konglomeraten, Sandsteinen und Mergeln. Die fluviatilen bis limnischen Sedimente (terrestrisches Ablagerungsmilieu) wurden im Zuge der Alpenhebung in das nördliche Vorland (Molassebecken) geschüttet. Im Untersuchungsgebiet liegen die Krinauer Schichten (Konglomerate, die nach oben in Mergel übergehen) unter den Öhninger Schichten (gelbgraue, rostig anwitternde Mergel und

Sandsteine mit einzelnen Konglomeratschichten). Die Grenze dieser beiden Formationen liegt bei ca. 470 m ü. M.

Während des Quartärs wurde das Untersuchungsgebiet mehrmals von Vorlandgletschern überfahren. Preusser et al. (2011) nehmen in ihrer Überblicksdarstellung 15 Vorstösse der Alpengletscher in das nördliche Alpenvorland der Schweiz an. Im Bereich Lommis verliefen die Vorstösse der Ausläufer des Rheingletschers dem tektonisch induzierten präglazialen Relief entsprechend aus ONO in Richtung WSW. Gemäss Keller & Krayss (1999) dürfte das Untersuchungsgebiet um 19 000 v. Chr. (Stein am Rhein-Stadium) unter dem Eiskörper der Lauchezunge gelegen haben, erst um ca. 18 000 v. Chr. war das Gebiet eisfrei und wurde im tiefsten Bereich durch einen sich mehrere km Ost–West erstreckenden See aufgefüllt. Im Spätglazial setzten im eisfreien Gebiet noch Hangprozesse ein (z.B. Solifluktion, Spüldenudation), bevor durch die zunehmende Erwärmung um ca. 14 000 v. Chr. die Wiederbewaldung im Mittelland einsetzte und mit ihr die Fixierung der Landschaft und Bodenbildung.

Während des Neolithikums, der Bronzezeit, der Römerzeit und des Mittelalters kam es in Mitteleuropa zu Phasen tiefgreifender Landnutzungsänderungen, insbesondere Rodungen für den Holzbedarf und Ackerbau. Auch im Untersuchungsgebiet wurden aus diesen Zeiten stammende Kolluvien und korrespondierende erodierte Böden an Oberhängen und Hangschultern angetroffen. Ein Hinweis auf derartige Prozesse sind Ackerrandstufen südwestlich von Lommis. Im Höhenmodell zeigen sich sanfte parallele Scharen von Wellen variabler Orientierung. Hierbei handelt es sich um ehemalige mittelalterliche Wölbäcker

(Hutter 2020). In den Wäldern südlich von Lommis finden sich ausserdem zahlreiche kleine Kanäle, die vermutlich der Entwässerung des Waldes dienen oder aber zuvor vorhandenen Ackerlandes dienten. Wichtig ist daneben die neuzeitliche Urbarmachung der vernässten, moorreichen Tiefländer durch Kanalisierungen und Trockenlegungen. Ein typisches Phänomen drainierter Böden in Tieflagen ist die Aufschüttung mineralisch dominierten Materials im Sinne einer «Bodenverbesserung». Daneben sind im Gebiet dezidierte Auffüllungen zu erwarten, insbesondere in den Tieflagen.



**Fluviale\_Glaziale\_Formen**

- Bachschuttfächer
- +++ Terrassenkante, Erosionsterasse
- Drumlin
- Söll, Toteissee
- Moränen - Kammlinie

**Obere\_Flaechen**

- Sumpf, Ried
- Torfmoor
- Ex - Sumpf
- Ex - Torfmoor
- Gebiet mit Rutschformen
- Wallmoräne

**Untere\_Flaechen**

- Schwemmkegel, Bachschuttfächer
- Schutt trocken
- postglaziale Alluvionen
- Seeablagerungen
- Grundmoräne (>ca. 5m) soweit bekannt
- Würm über Molasse
- Obere Süsswassermolasse (OSM)
- Nagelfluhreiche OSM

Abbildung 6: Auszug aus der Geologischen Übersichtskarte (Kanton Thurgau, Amt für Geoinformation). Der Projektperimeter ist in schwarzer Farbe dargestellt.

## 2.2 Hauptkulturen im Jahr 2022

Das Kartiergebiet wird überwiegend ackerbaulich genutzt, mit einem gewissen Anteil an Futterbau mit Kunstwiesen, Wiesen und Weiden. In Abbildung 7 sind die Hauptkulturen aus dem Jahr 2022 in die drei Bewirtschaftungsarten Wiesennutzung, Weidennutzung sowie acker- und futterbauliche Nutzung unterteilt. Darüber hinaus wurden im Gebiet vereinzelt Spezialkulturen angebaut (Gemüse, Kartoffeln).

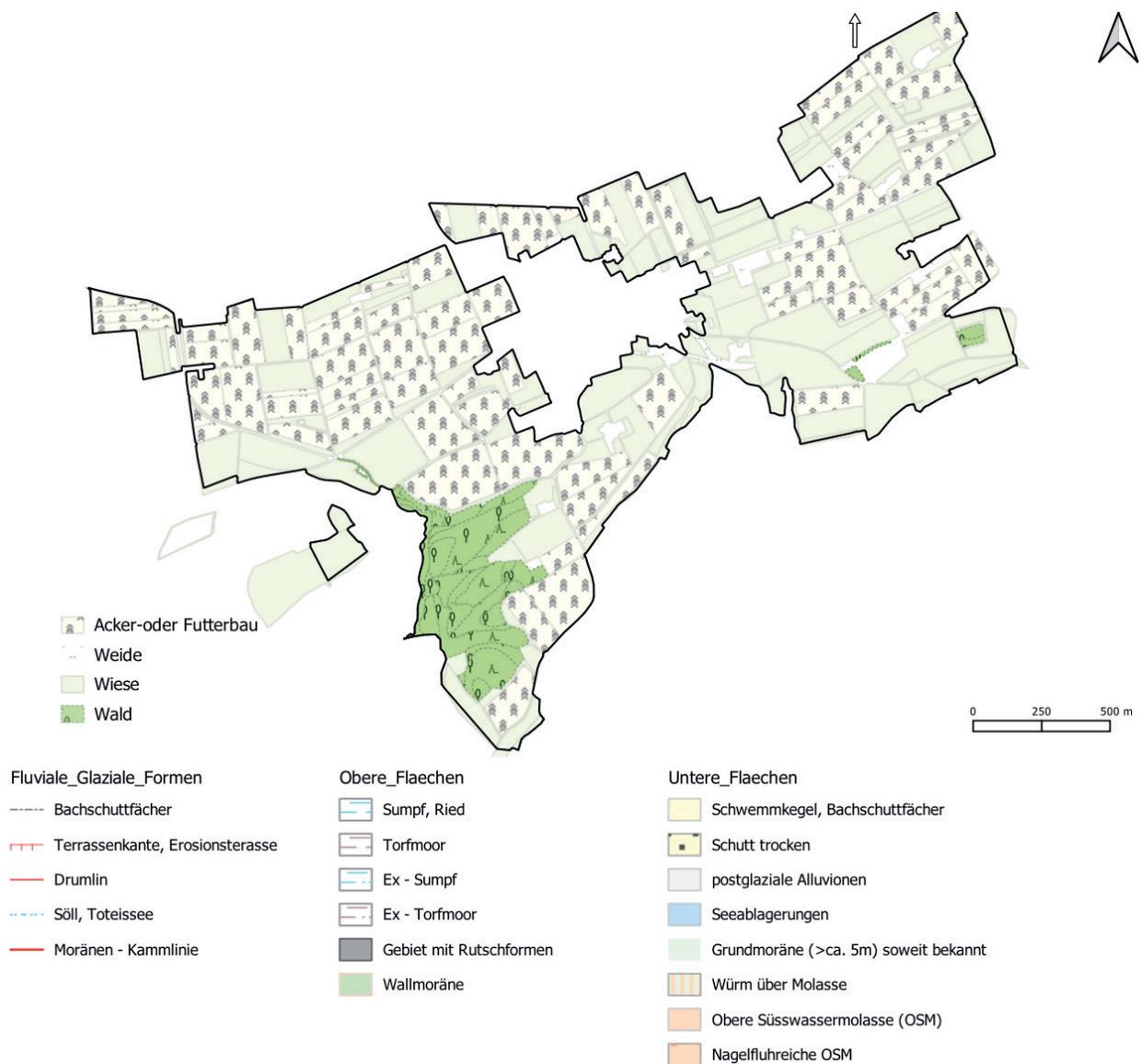


Abbildung 7:  
Hauptkulturen im Projektgebiet im Jahr 2022.

## 2.3 Historische Kartenwerke – Beispiel Siegfriedkarte

Wie in Kapitel 2.1 bereits aufgeführt, fanden im Untersuchungsgebiet diverse anthropogene Eingriffe vor allem im Zusammenhang mit der Trockenlegung und Kanalisierung statt. Laut der Dufourkarte von 1862 war das Lauchetal vor 150 Jahren noch weitgehend sumpfig, die Siegfriedkarte von Anfang des 20. Jahrhunderts zeigt aber bereits eine teilweise begradigte Lauche und künstliche Gräben. Topographische Namen wie Loo-, Herten, Holm-, Grosswiesen sowie Ried und Vespermoos geben den Hinweis auf Standorte mit potenziell hohem Grundwasserpegel, der lokal durch Drainagen abgesenkt wurde.

Abbildung 8 zeigt den Ausschnitt der Siegfriedkarte aus dem Jahr 1880 für das Gebiet. Im Vergleich zu 1880 sind heute viele Äcker drainiert und die Böden zeigen zum Teil nur noch sogenannte reliktsche Vernässungszeichen, die mit den historischen Karten besser eingeordnet werden können. Weiter wird ersichtlich, dass diverse Gewässer begradigt und verfüllt wurden.

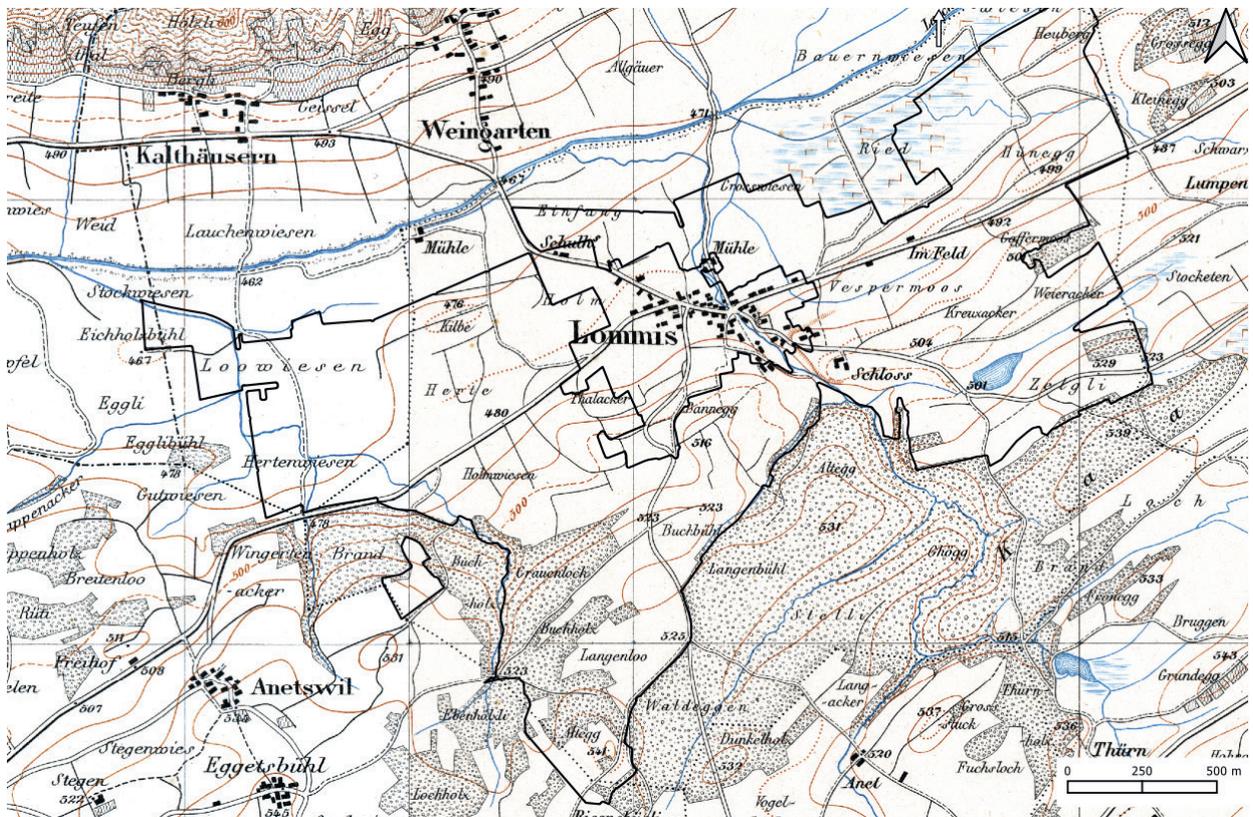


Abbildung 8: Auszug aus dem Topographischen Atlas der Schweiz (Siegfriedkarte) (Bundesamt für Landestopografie swisstopo), Erstausgabe von 1880. Der Projektperimeter ist in schwarz dargestellt.

In der Gegenüberstellung von aktuellen Orthofotos mit einem Luftbild von 1963 geht hervor, dass punktuell ehemalige Flurwege zurückgebaut wurden, und heute wieder landwirtschaftlich genutzt werden. Dies ist bei der Beurteilung von Bohrungen zu beachten. Zudem wurden zur Beurteilung von ehemaligen Wegen und Flussläufen auch Drohnenbilder verwendet (Abbildung 9).



Abbildung 9:  
Vergleich von Luft- und Drohnenbildern aus verschiedenen  
Zeitperioden geben Hinweise auf ehemalige Wege und Fluss-  
läufe. (Quelle: B. Stricker, Dr. Roland Wyss GmbH).

## 3. Aufbereitung Umwelt- und Geodaten

Neben den bereits genannten Umweltvariablen gibt es eine grosse Anzahl weiterer Umwelt- und Geodaten, welche bodenbildende Faktoren räumlich beschreiben oder indirekt Informationen zu bodenbildenden Faktoren beinhalten können. Nachfolgend werden einige Beispiele für das Projektgebiet Lommis zusammengefasst beschrieben: weitere methodische Details finden sich im Schlussbericht des Kartierprojekts Diemerswil (Keller et al. 2023). Um möglichst standardisierte Umwelt- und Geodaten für Bodenkartierungen nutzen zu können, wurden verschiedene Grundlagenkarten im KOBO bereits für die ganze Schweiz prozessiert und interessierten Fachpersonen zur Verfügung gestellt. Beispielsweise sind dies Karten zu multiskaligen Reliefableitungen (TerraPoly) zur Unterstützung der Konzeptphase (Behrens et al. 2023), Karten zur Vegetation und Landnutzung in Raum und Zeit (Stumpf et al. 2023a) sowie landesweit modellierte Karten für Bodeneigenschaften für drei Tiefenstufen (Stumpf et al. 2023b, Stumpf et al. 2024).

Diese Produkte können über die KOBO-Webseiten bezogen werden. Nachfolgend sind einige Beispiele für Umwelt- und Geodaten für das Kartiergebiet Lommis dargestellt, die sowohl für die Konzeptphase als auch zur Kartenerstellung genutzt wurden. Ein ausführliche Beschreibung landesweiter Umwelt- und Geodaten findet sich in Stumpf et al. (2024).

### 3.1 Reliefanalyse

Für eine Auswahl an Reliefparametern und Skalenbereichen wurden die Ergebnisse der multiskaligen Reliefanalyse mittels des digitalen Werkzeugs TerraPoly in Polygondatensätze konvertiert (Behrens et al. 2023). Diese dienen, vorwiegend in der Konzeptphase der Bodenkartierung, als leicht interpretierbare Informationsgrundlage. Relief-eigenschaften sind wichtige bodenbildende Faktoren und wurden für den Perimeter in Lommis aus dem digitalen Höhenmodell für verschiedene Skalen berechnet. Abbildung 10 zeigt ein Teilergebnis der multiskaligen Reliefanalyse am Beispiel der Oberflächenrauheit, der planaren Krümmung und der Abflusskonvergenz für jeweils drei Skalenbereiche.

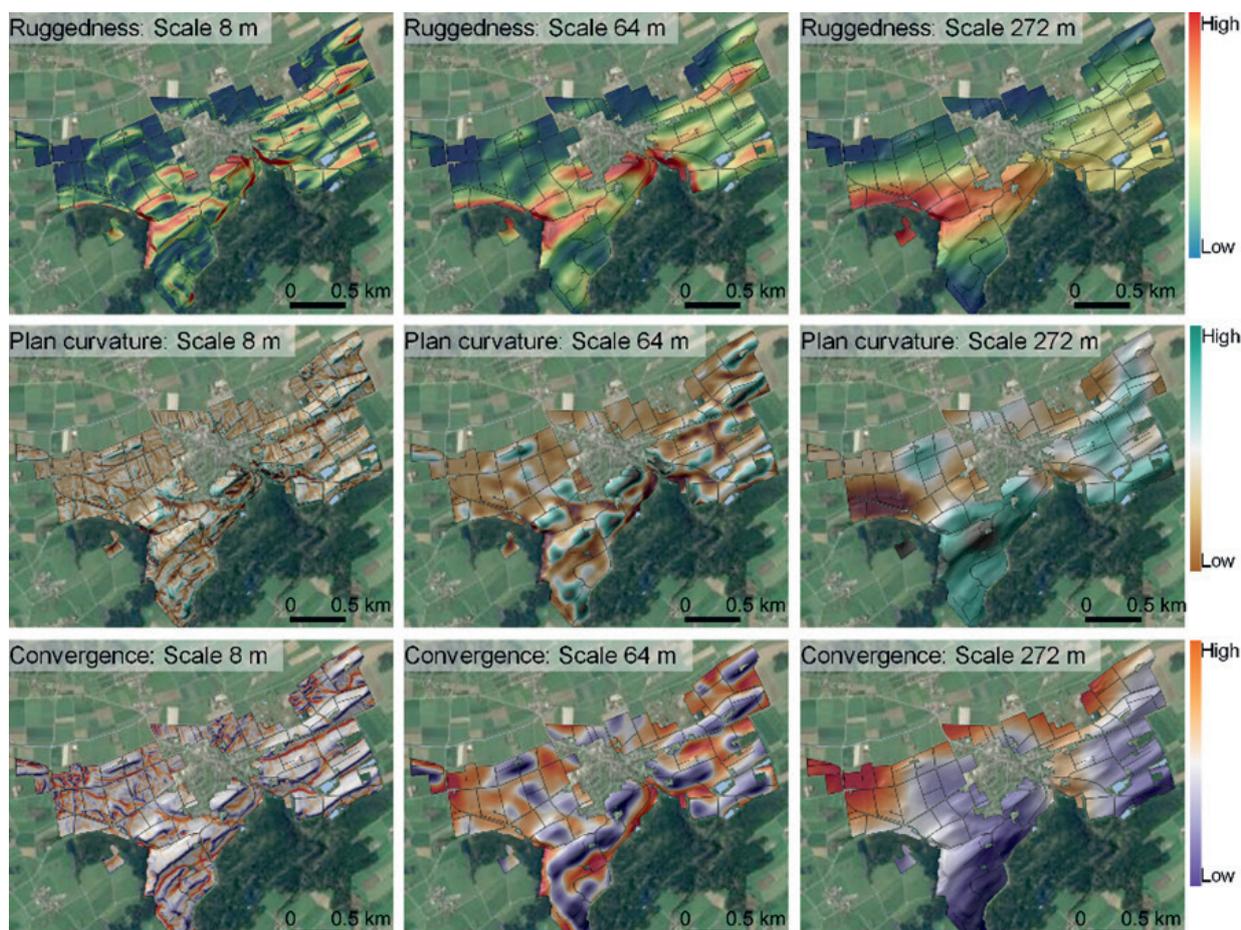


Abbildung 10:  
Bodenkartierung in Lommis: multiskalige Reliefanalyse am Beispiel der Oberflächenrauheit («Ruggedness»; oben), der planaren Krümmung («Plan curvature»; mittig) und der Abflusskonvergenz («Convergence»; unten) für die Skalen 8 m, 64 m und 272 m.

## 3.2 Vegetations- und Landnutzungsdaten

Die Vegetation und Landnutzung über die Zeit sind bedeutende Komponenten für die Beschreibung bodenbildender Faktoren. Mittels einer Vegetations- und Landnutzungsanalyse basierend auf periodisch verfügbaren Satellitenbildern wurden Vegetations- und Landnutzungseigenschaften in Zeit und Raum flächendeckend abgeleitet. Als Datengrundlage dienen satellitenbasierte Rasterzeitreihen des Spektralindex NDVI der Sentinel-Missionen seit 2018. Der NDVI beschreibt einen Indikator für Dichte, Zustand und Produktivität der Vegetation (Stumpf et al. 2024).

Abbildung 11 zeigt ein Teilergebnis der Vegetations- und Landnutzungsanalyse am Beispiel des monatlichen Vegetationszustandes für das Gebiet Lom-

mis, gemittelt für den Zeitraum zwischen 2018 und 2022. Gemittelt über diese Jahre zeigte sich deutlich eine Gruppe von Parzellen östlich und westlich von Lommis, die offensichtlich wesentlich intensiver landwirtschaftlich genutzt werden als die übrigen Parzellen (Abbildung 11). Abbildung 12 zeigt ein weiteres Teilergebnis der Vegetations- und Landnutzungsanalyse am Beispiel der langjährigen Variabilität des Vegetationszustandes und am Beispiel der Abweichung des Vegetationszustandes vom langjährigen Mittel für einzelne Monate des Jahres 2022. Die Datensätze dienen beispielsweise der Bewertung von Landnutzungsintensität auf landwirtschaftlichen Flächen.

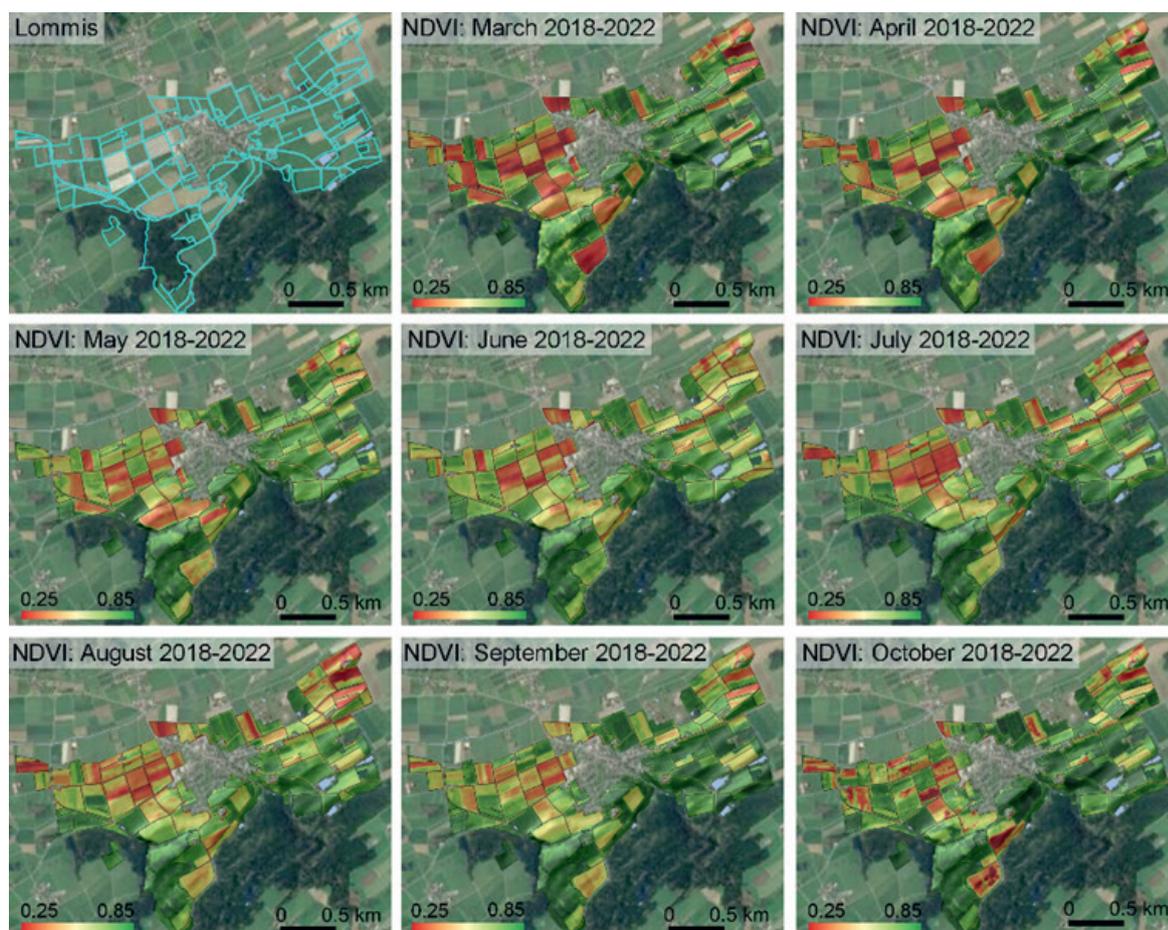


Abbildung 11:  
Bodenkartierung in Lommis: Vegetations- und Landnutzungsanalyse am Beispiel des monatlichen Vegetationszustandes als Mittelwert über die Jahre 2018 bis 2022. Die abgebildete Zeitreihe basiert auf dem Spektralindex «NDVI» (Normalized Difference Vegetation Index) der Sentinel-2-Satellitendaten.

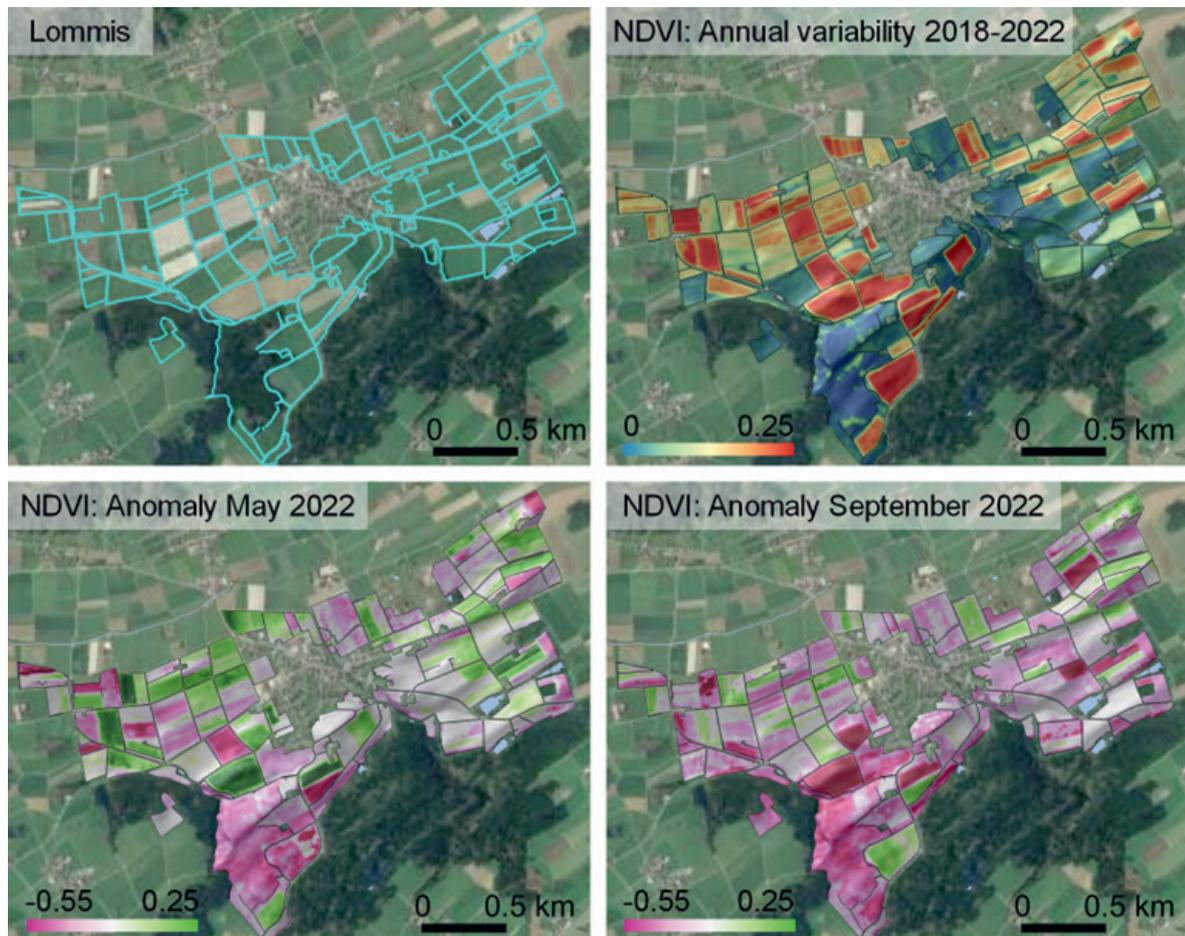


Abbildung 12:  
Bodenkartierung in Lommis: Vegetations- und Landnutzungs-  
analyse am Beispiel der jährlichen Variabilität des Vegetationszustandes  
als Mittelwert über die Jahre 2018 bis 2022 («NDVI: Annual variability 2018–2022») und am Beispiel der Abweichung des Vegetations-  
zustandes vom langjährigen Mittel für die Monate Mai («NDVI:  
Anomaly May 2022») und September («NDVI: Anomaly September  
2022») des Jahres 2022. Als Datengrundlage dienen Zeitreihen des  
Spektralindex «NDVI» (Normalized Difference Vegetation Index) basie-  
rend auf Sentinel-2-Satellitendaten.

### 3.3 Spektrale Bodeninformationen

Bodeneigenschaften mit Bezug zu Mineralogie, Granulometrie und Farbe stehen in engem Zusammenhang zur spektralen Signatur der Bodenoberfläche (Safanelli et al. 2020). Mittels einer spektralen Bodenlandschaftsanalyse basierend auf langjährig und periodisch verfügbaren Satellitenbildern wurde flächendeckend die spektrale Signatur der Bodenoberfläche abgeleitet. Als Datengrundlage dienen satellitenbasierte Rasterzeitreihen des Landsat-Datenarchivs seit 1985 (USGS 2023). Dabei werden zunächst die Rasterzeitreihen pixelbasiert nach vegetationsfreien Flächen gefiltert und anschliessend zeitlich aggregiert. Dementsprechend ist für alle Flächen, die seit 1985 temporär frei von Vegetation waren, die spektrale Signatur verfügbar.

Für Flächen, die kontinuierlich seit 1985 mit Vegetation bedeckt waren (z. B. Wald), wurde die spektrale Signatur mittels maschinellen Lernens modelliert (Stumpf et al., 2023b). Abbildung 13 zeigt ein Teilergebnis einzelner Spektralbänder für verschiedene Wellenlängenbereiche. Gemittelt über die rund vier Jahrzehnte zeigen die Spektralinformationen deutliche räumliche Muster, z.B. eine Gruppe von Parzellen mit tieferen Werten für alle Spektralkanäle im Westen des Gebiets.

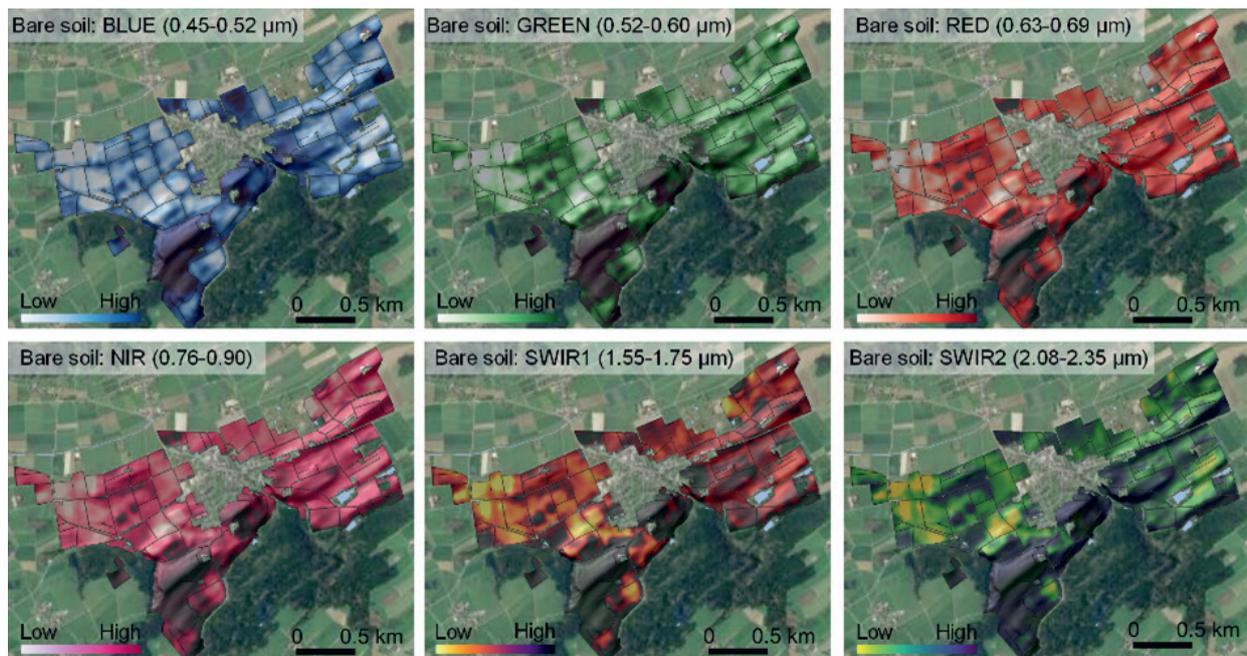


Abbildung 13:  
Bodenkartierung in Lommis: Spektrale Bodenlandschaftsanalyse des unbedeckten Bodens am Beispiel über 37 Jahre gemittelter Landsat-Spektralkanäle «BLUE», «GREEN», «RED», «NIR», «SWIR1» und «SWIR2».

### 3.4 Hinweiskarten für Bodeneigenschaften

Auf Basis der Version 6 der verfügbaren Boden-  
daten des Nationalen Bodeninformationssystems  
NABODAT (NABODAT Servicestelle 2024)  
und bodenrelevanter Umwelt- und Geovariablen,  
wurden Hinweiskarten für Bodeneigenschaften für  
verschiedene Tiefenstufen schweizweit erstellt  
(Stumpf et al. 2023b, Stumpf et al. 2024). Mittels  
Methoden des «Digital Soil Mapping» (DSM),  
wurden pH-Wert, Textur, Humusgehalt und die Katio-  
nenaustauschkapazität flächendeckend in mehreren  
Tiefenstufen modelliert. Die jeweilige Boden-  
eigenschaft wird dabei als eine Funktion aus  
Relief, Klima, Vegetation, Landnutzung und der  
spektralen Signatur des unbedeckten Bodens  
beschrieben und anschliessend in die Fläche pro-  
gnostiziert (Stumpf et al., 2024).

Abbildung 14 zeigt den Ausschnitt für das Kartier-  
gebiet Lommis für den Oberboden. Die Hinweis-  
karten für Bodeneigenschaften sind aufgrund der  
relativ geringen Punktdichte des nationalen Da-  
tensatzes limitiert in der räumlichen Detailtreue,  
Tiefenauflösung und Prognosegüte. Dennoch  
können die Hinweiskarten wichtige Vorinformatio-  
nen im Rahmen der Konzeptphase und der finalen  
Kartenerstellung einer regionalen Detailkartierung  
liefern.

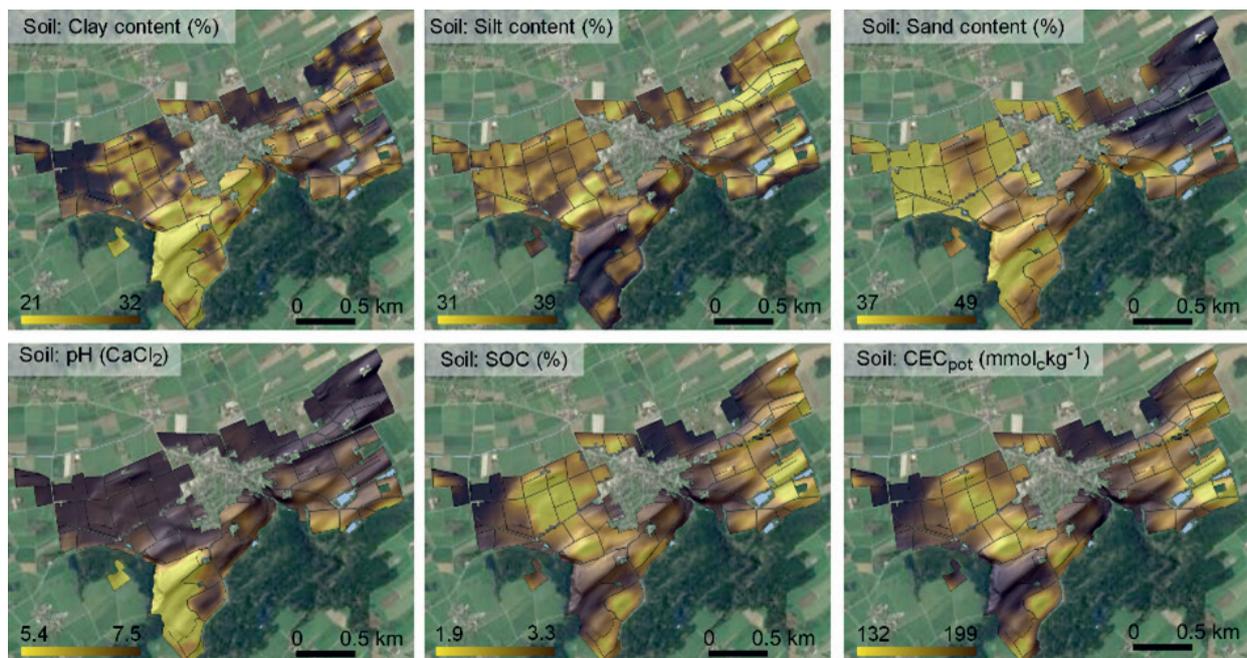


Abbildung 14:  
Indikative Bodeneigenschaftskarten am Beispiel der Tiefenstufe  
0–30 cm und den Bodeneigenschaften Tongehalt («Clay content»),  
Schluffgehalt («Silt content»), Sandgehalt («Sand content»), pH-Wert  
(«pH»), organischer Kohlenstoffgehalt («SOC») und potenzielle  
Kationenaustauschkapazität («CECpot»).

# 4. Konzeptphase

## 4.1 Projektperimeter

Vor der Erstellung des Beprobungskonzepts für die automatisierte Probenahme von Bodenproben wurden sämtlich verfügbaren Pläne für Leitungen und Drainagesysteme digitalisiert und ein räumlicher Puffer für die Objekte berechnet (Abbildung 15). Mit dem Puffer wird das Risiko für mögliche Schäden während den Bohrarbeiten minimiert. Insbesondere die Drainagesysteme in den landwirtschaftlich genutzten Parzellen führten für mehrere Teilflächen zu grösseren Einschränkungen bei der Festlegung möglicher Standorte für die Bohrungen. Der bereinigte Perimeter umfasste insgesamt 278 ha (256 ha Landwirtschaftsland und 22 ha Wald).

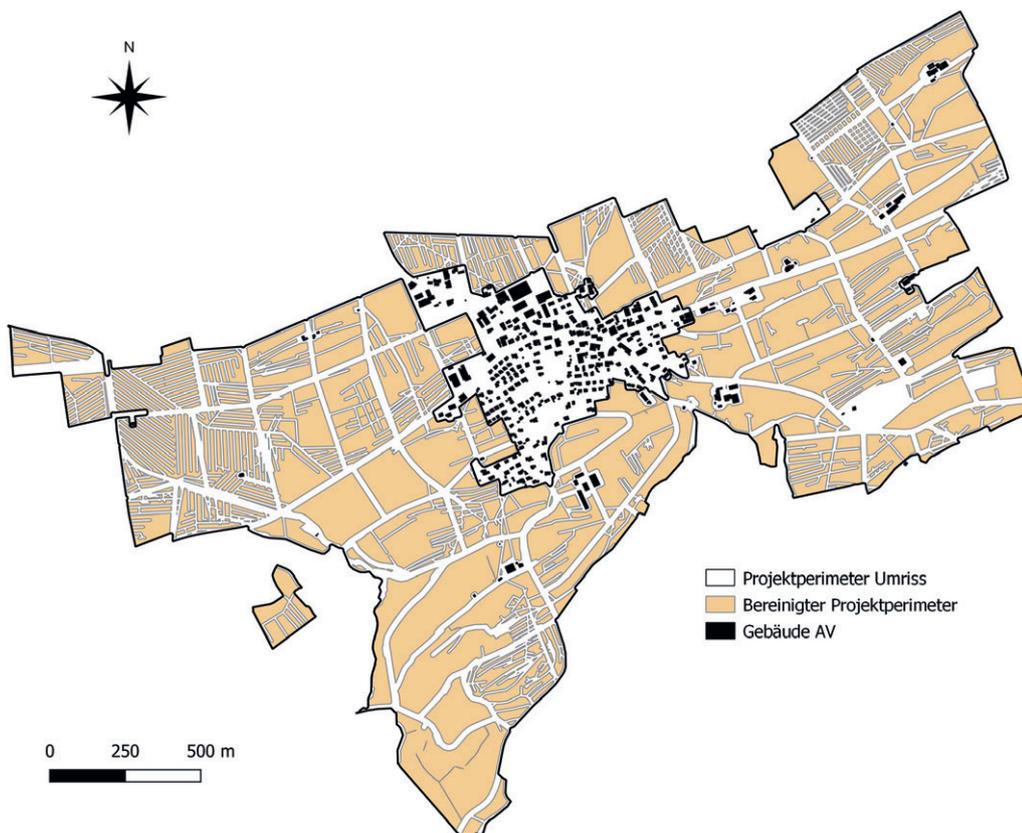


Abbildung 15:  
Bodenkartierung in Lommis: Bereinigter Projektperimeter und räumlicher Puffer für Strassen, Gebäude, Leitungen und Drainagesysteme.

## 4.2 Beprobungskonzept

Nach den Erfahrungen im ersten KOBO-Pilotprojekt in Diemerswil im Kanton Bern wurde das Beprobungskonzept für das zweite KOBO-Pilotprojekt in Lommis angepasst. Generell werden drei Hierarchiestufen betrachtet (H1, H2 und H3). Mit steigender Hierarchiestufe (H1 > H2 > H3) nimmt die Anzahl der Standorte pro Fläche zu, der Detaillierungsgrad der Aufnahme (Umfang minimaler Datensatz) jedoch ab (Abbildung 16).

H1 ist die Stufe der Profile mit dem höchsten Informationsgehalt (Pedologie und Bodenchemie, Bodenphysik, Spektroskopie) und der geringsten räumlichen Dichte (3–7 pro 100 ha), H2 ist die Stufe der pedologischen Bohrungen mit mittlerem Informationsgehalt (Pedologie und Referenzanalysen zu Bodenchemie, Spektroskopie) und mittlerer räumlicher Dichte (1 Standort pro ha) und H3 ist die räumlich dichteste Hierarchiestufe (2–3 Standorte pro ha) mit dem geringsten Informationsgehalt (Spektroskopie).

		Art der Bodenproben	Verwendungszweck der Bodenproben
		H3: Bohrungen für Bodenproben aus fixen Tiefenstufen und spektroskopische Analyse im Labor	Bestimmung von Bodeneigenschaften und Erstellung von Karten für unterschiedliche Tiefenstufen
		H2: Bohrungen für bodenkundliche Beschreibung und Klassifikation (von Hand oder mit Bohrfahrzeug)	Bodenkundliche Beschreibung und Klassifikation der Böden (Erfassung mit der Web-Applikation SoilDat)
		H1: Bodenprofile und Rammkernbohrungen	Bodenkundliche Beschreibung und Klassifikation der Böden  Eichung für Pedolog:innen im Gebiet (Erfassung mit der Web-Applikation SoilDat)

Abbildung 16:  
Hierarchisches Beprobungskonzept im Kartierprojekt in Lommis. Das «H» steht dabei für die Hierarchiestufe und die Zahlen 1–3 geben die Hierarchiestufe an. An den Profilen (H1) wird ein umfangreicher minimaler Datensatz erhoben, an Bohrungen (H2) ein reduzierter Pedologie-Datensatz und an H3-Standorten nur Bodenproben. Die Beprobungsdichte hingegen ist für H3 gross (1–3/ha) und nimmt für H2 (1/ha) und H1 (0.03–0.05/ha) ab.

Das Stichprobenverfahren wurde separat für die landwirtschaftliche Fläche und den Wald durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde eine zufällige Grundgesamtheit an möglichen Standorten gezogen. Für die landwirtschaftliche Fläche wurde das Gebiet vor der Ausweisung der Stichprobe in fünf Cluster unterteilt, um zu verhindern, dass die durch das Beprobungskonzept ausgewiesene Stichprobe, z.B. durch geomorphologische Besonderheiten, zu einer lokalen Anhäufung von Standorten neigt. Hierzu wurde eine k-Means Clusteranalyse verwendet. Aus jedem der Cluster wurden dann entsprechend ihren Flächenanteilen Standorte ausgewählt. Somit konnte eine räumliche Gleichgewichtung der Stichprobe gewährleistet werden. Als Basisdaten für das Beprobungskonzept dienten die Reliefparameter Hangneigung, mittlere Krümmung und Fließakkumulation, Bodeneigenschaftskarten aus den schweizerischen Hinweiskarten, das räumlich flächendeckend modellierte Baresoil SWIR2 Band aus den Landsat-Daten sowie der über fünf Jahre gemittelte Vegetationsindex NDVI und dessen Standardabweichung aus den Sentinel Daten (siehe Kapitel 3). Diese Datengrundlagen bildeten den mehrdimensionalen Merkmalsraum für das Beprobungskonzept.

Ziel des Beprobungskonzepts war es einerseits, dass die Profilstandorte H1 möglichst die Extreme im Merkmalsraum der bodenbildenden Faktoren im Untersuchungsgebiet repräsentieren, und andererseits die pedologischen Bohrungen H2 möglichst die gesamte Bandbreite im Merkmalsraum abdecken. Die Bereiche im Merkmalsraum, die zwischen den H1 und H2 Standorten liegen, werden durch die H3-Bohrungen für die spektroskopischen Messungen abgedeckt. In jeder Stufe kam der Kennard-Stone Algorithmus (KS) zum Einsatz, der den Merkmalsraum gleichmässig abdeckt und spezifisch für die Erstellung von Kalibrierungsdaten genutzt wird (Kennard und Stone 1969). Die Standorte wurden entsprechend der jeweiligen Flächenanteile separat für jedes der fünf Cluster ausgewiesen und dann für die jeweilige Hierarchiestufe zusammengeführt. Für den Wald erfolgte ein analoges Vorgehen, jedoch ohne eine zusätzliche vorgeschaltete Ausweisung von Clustern, da die untersuchte Waldfläche wesentlich kleiner ist. Die Abbildungen 17 bis 19 zeigen das finale Beprobungskonzept für die drei Hierarchiestufen.

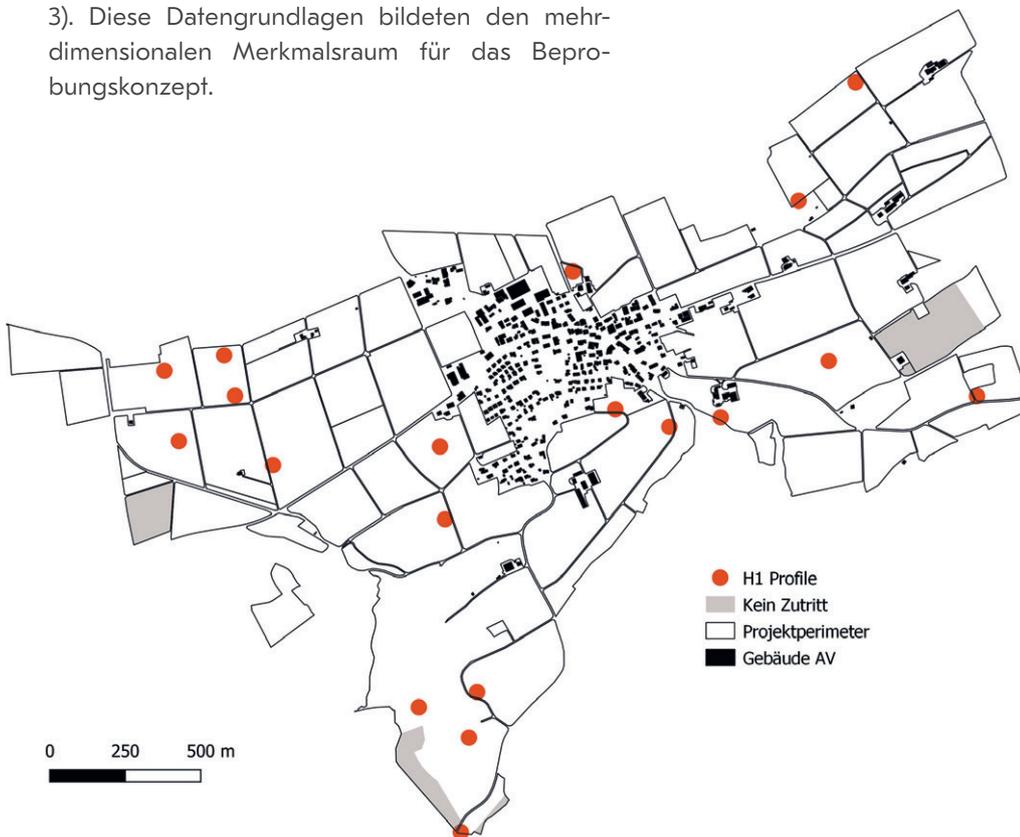


Abbildung 17: Lage der Profilstandorte (H1). Es wurden 17 Landwirtschaftsprofile und 2 Waldprofile beschrieben.

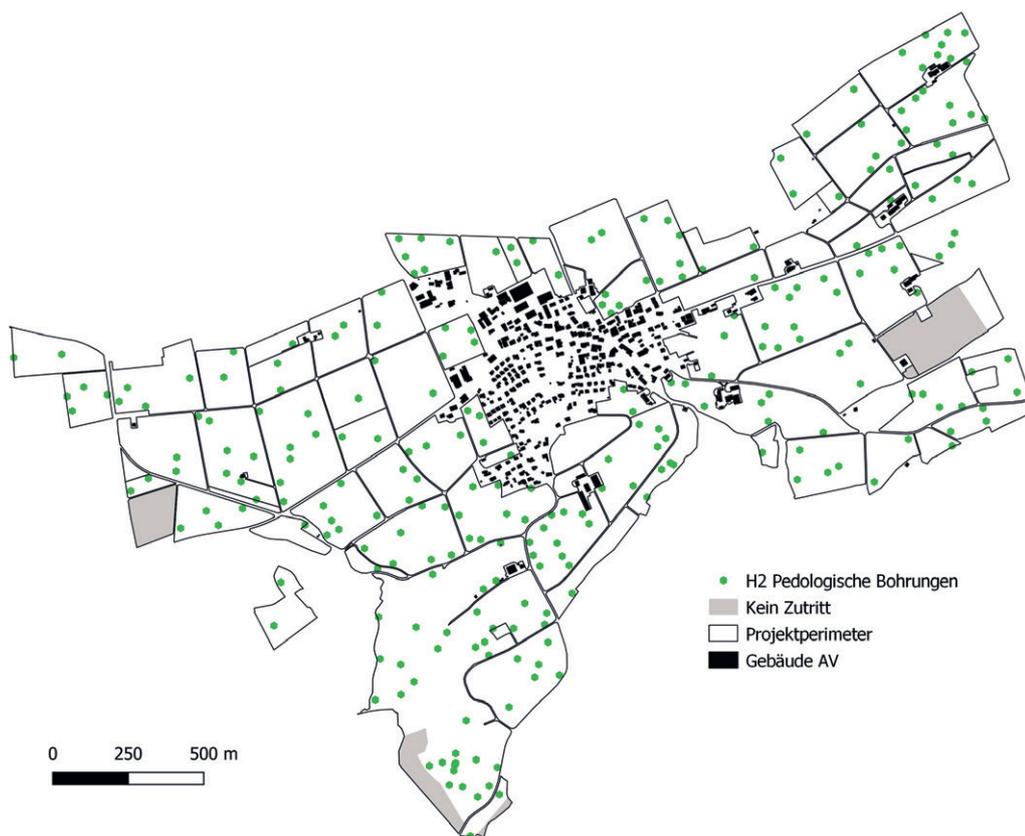


Abbildung 18:  
Lage der Standorte für pedologische Bohrungen (H2).  
Es wurden 242 Bohrungen in der Landwirtschaft und 22 Bohrungen  
im Wald aufgenommen.

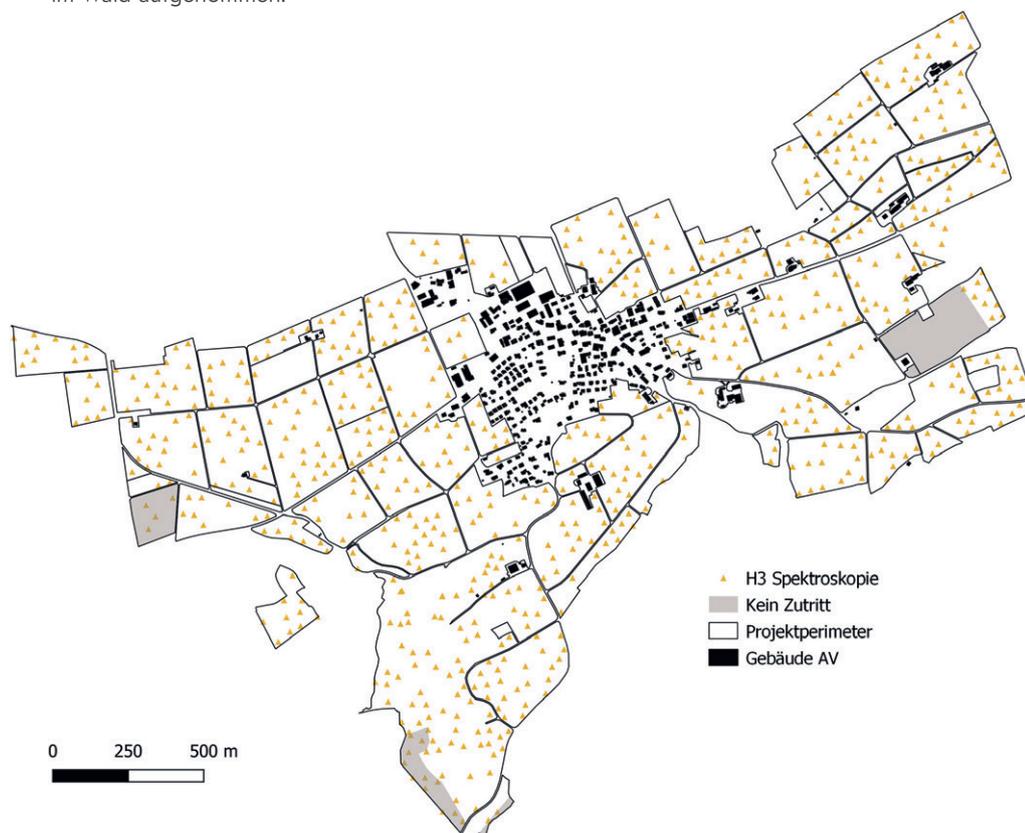


Abbildung 19:  
Lage der Bohrungen mit automatisierter Probenahme für  
spektroskopische Messungen im Labor (H3). Es wurden 745 Standorte  
in der Landwirtschaft und 66 Standorte im Wald beprobt.

## 4.3 Erkundungsphase

In der Erkundungsphase findet eine Begehung des Gebietes statt, um einerseits auf Basis aller vorhandenen aufbereiteten Umwelt- und Geodaten das Gebiet kennenzulernen, und andererseits die Profilstandorte festzulegen. Die Begehungen fanden zusammen mit den Ingenieurbüros und dem KOBO statt. Während der Erkundungsphase erfolgten mehrere Begehungen, um die Lage der Profilstandorte gemäss Vorschlag des Beprobungskonzepts zu prüfen, und wo nötig zu verschieben. In einem ersten Schritt wurden die Punkte gemäss Beprobungskonzept erkundet (gelbe Punkte in Abbildung 20).

Die Begutachtung der Standorte kann aufgrund verschiedener Kriterien zu Anpassungen führen (blaue Punkte in Abbildung 20). In einem weiteren Schritt wurde die Machbarkeit der Profilstandorte hinsichtlich der Einwilligung der Bewirtschafter:innen, Kulturstände sowie anthropogene Einflüsse geprüft. Dies führte schliesslich zu den finalen Standorten für die Bodenprofile (rote Punkte in Abbildung 20). Dieses iterative Vorgehen zur Festlegung der Profilstandorte kann je nach Erreichbarkeit der Bewirtschafter:innen und deren Akzeptanz für die Bodenkartierung relativ viel Zeit in Anspruch nehmen und die nachfolgenden Feldarbeiten verzögern.

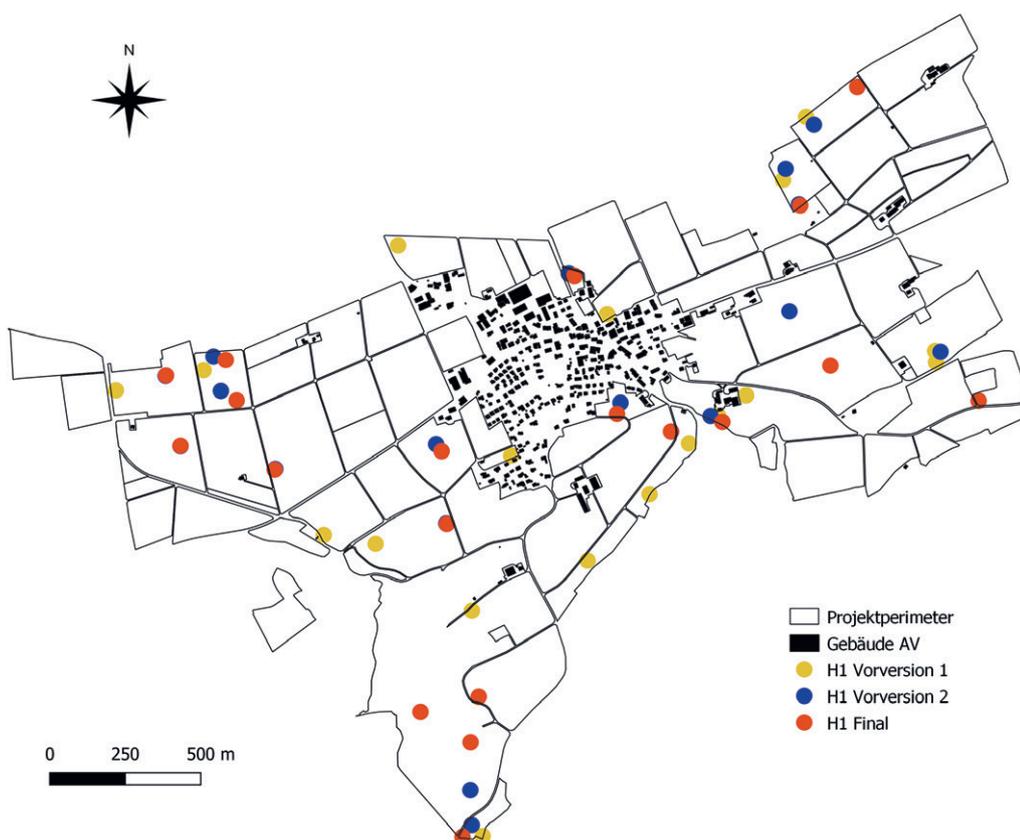


Abbildung 20:  
Versionierung der Lage der Profilstandorte während der Erkundungsphase.

In Abbildung 21 ist beispielsweise ersichtlich, dass auf der gesamten Parzelle zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahme eine Terrainveränderung durchgeführt wurde. Informationen zu anthropogenen Veränderungen des Bodenaufbaus sind oftmals kaum verfügbar und können daher nicht im Beprobungsplan mit einfließen. Aus diesem Grund benötigt es das Zusammenspiel zwischen dem Beprobungsplan und einer Begehung vor Ort, um die Repräsentativität und Machbarkeit des Profilstandorts zu prüfen. In dem Beispiel in Abbildung 21 wurde der Profilstandort auf die Nachbarzelle in ähnlicher Reliefposition und vergleichbarem Ausgangsmaterial für die Durchführung gewählt.



Abbildung 21:  
Iteration für die Festlegung der Profilstandorte anhand zweier Standorte. Oben: Punkt 1: erster Vorschlag gemäss Beprobungskonzept; Punkt 2: zweiter Vorschlag gemäss erster Begehung; Punkt 3: finale Lage des Profils gemäss zweiter Begehung und Prüfung auf Machbarkeit und hinsichtlich Einwilligung der Bewirtschafter:innen. Unten: Punkt 1: erster Vorschlag gemäss Beprobungskonzept; Punkt 2: Vorschlag nach Begehung und finaler Standort, da die Bewirtschafterin mit den Standort einverstanden war.

## 5. Feldarbeiten

Die Etappen der Feldarbeiten gliederten sich gemäss den oben genannten Hierarchiestufen H1 bis H3. In den Kapiteln 5.2 bis 5.4 werden die Etappen dokumentiert: (1) Bodenprofile für die pedologische Ansprache (H1-Standorte); (2) Bohrungen für die pedologische Ansprache (H2-Standorte); (3) Bohrungen zur Probenahme und spektroskopische Messung im Labor (H3-Standorte). Zudem wurden weitere Bohrungen im Rahmen der Erkundungsphase (vor der Feldkampagne, sog. E Standorte) sowie vereinzelt Bohrungen nach

dem Catena Prinzip (sog. V-Standorte) nach Abschluss der H2-Phase durchgeführt. Für alle Profil- und Bohrungsstandorte (H1 und H2) wurden Metadaten, Standort- und Bodendaten direkt im Feld digital erfasst. An den H3-Standorten wurden ebenfalls Meta- und Standortdaten sowie QR-Codes für die Proben direkt im Feld erfasst. Für die Erfassung der Standortdaten wurde die Web-Applikation Soildat verwendet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über das Mengengerüst der Bodenkartierung in Lommis.

	Bodenprofile	Bohrungen für Pedologie	Beprobung für Spektroskopie
Hierarchiestufe	H1	H2	H3
Bohrgerät	Raupenbagger	Bohrfahrzeug GreenGround (LW)/ Handbohrung (WA)	Bohrfahrzeug Bodenproben.ch
Maximale Tiefe [cm]	150	120	90
# Standorte [-]	17 LW / 2 WA	242 LW / 22 WA	745 LW / 66 WA
Punktichte [Standorte/ha]	0.07	0.94	2.91
Pedologie	Ja	Ja	Nein
Attribute Pedologie	Maske H1 (siehe Anhang A1.1)	Maske H2 (siehe Anhang A1.2)	
Beprobungskonzept			
Art der Beprobung	Einzelprobe Zylinder klein und gross	Einzelprobe	Einzelprobe
Durchschnittsgewicht feuchte Probe [g]	ca. 600	ca. 600	ca. 150
Beprobung nach	Horizont	Horizont	fixe Tiefenstufen T1: 0–30 cm T2: 30–60 cm T3: 60–90 cm
# Proben/Standort	3–4	2–3	2–3
# Proben in T1 [0–30 cm]	17 LW / 2 WA	232 LW / 22 WA	729 LW / 64 WA
# Proben in T2 [30–60 cm]	17 LW / 2 WA	232 LW / 21 WA	727 LW / 65 WA
# Proben in T3 [60–90 cm]	17 LW / 1 WA	220 LW / 18 WA	353 LW / 28 WA
# Proben in T4 [situativ]	4 LW / 1 WA	—	—
Anzahl Proben total	61	764	2004
# Referenzproben externes Labor	61	120	0
Prozentsatz der Proben mit Referenzproben [%]	100	16	0

Tabelle 1:  
Übersichtstabelle über die verschiedenen Hierarchiestufen.  
LW = Landwirtschaftsgebiet; WA = Wald. Der Projektperimeter umfasste 278 ha (256 ha LW und 22 ha WA).

## 5.1 Qualitätssicherung der pedologischen Aufnahmen

Die Qualitätssicherung der pedologischen Aufnahmen fand übergreifend über die H1- und H2-Standorte statt. Bei der Qualitätssicherung wird grundsätzlich zwischen einer Prüfung der pedologischen Aufnahme an einem Standort (Punkt-QS) oder im Kontext der Flächenkartierung (Flächen-QS) unterschieden.

### H1-Standorte (Punkt-QS)

Der Ablauf der Punkt-QS bei den Bodenprofilen ist in der Abbildung 22 schematisch dargestellt. Der QS-Prozess beginnt mit der ersten bodenkundlichen Beschreibung und Klassifikation der Profile gemäss einem vorgegebenen minimalen Datensatzes (siehe Anhang A1) durch die Ingenieurbüros. Nach einer ersten Sichtung der Profil-

beschreibungen durch die QS-Verantwortlichen werden profilübergreifende Schwerpunkte festgelegt, welche am Eichtag vertieft diskutiert werden. Im Projekt Lommis waren Pedologen vom KOBO als auch externe Experten für die QS verantwortlich. Der Eichtag für die H1-Standorte wurde gemeinsam mit allen Kartierenden der beauftragten Ingenieurbüros sowie mit externen QS-Experten für Landwirtschaft und Wald durchgeführt. Die Themen und die spezifischen Regelungen für die bodenkundliche Beschreibung der Böden in Lommis wurden in einem Eichprotokoll festgehalten (siehe Anhang A2). Das Eichprotokoll ist zudem Grundlage für die darauffolgende Beschreibung der H2-Standorte.

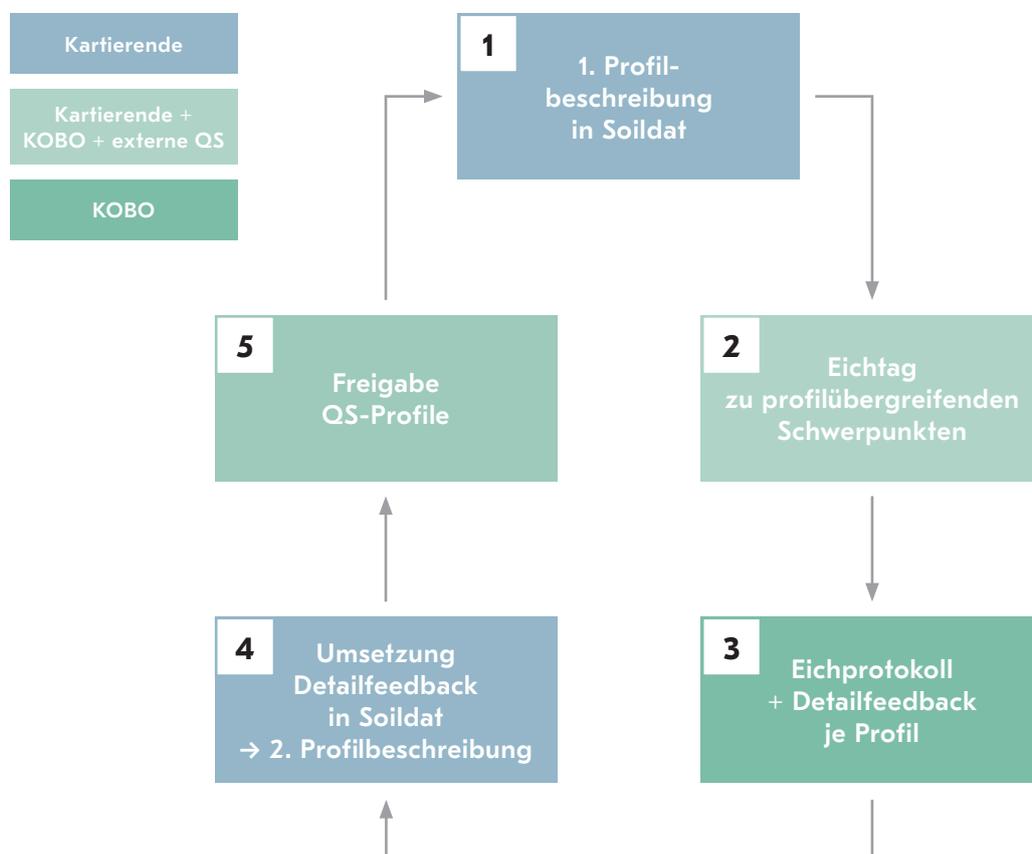


Abbildung 22: Punkt-QS Ablauf bei den Bodenprofilen und farbliche Darstellung der jeweiligen Zuständigkeiten.

Nach dem Eichtag der H1-Standorte erhalten die Kartierenden von den QS-Verantwortlichen eine fachliche Rückmeldung zu jeder Profilbeschreibung. Diese wird mit den Kartierenden diskutiert und nachfolgend durch die Kartierenden in Soildat umgesetzt. Dies umfasst auch Anpassungen, welche durch die Laboranalysen für Bodeneigenschaften begründet sind (z.B. Anpassung des Säure-Untertyps aufgrund der analytisch gemessenen pH-CaCl<sub>2</sub> Werte). Nach einer weiteren Prüfung auf Vollständigkeit der Aufnahmen erfolgt die QS-Freigabe für die Profile in der Web-Applikation Soildat durch die QS-Verantwortlichen. Nach der QS-Freigabe können die Beschreibungen in Soildat nicht mehr verändert werden.

Im Projekt in Lommis waren am Eichtag die Analyseresultate der Profile nicht vollständig vorhanden. Deshalb wurde zu Beginn der H2-Phase ein zweiter Eichtag durchgeführt. Schwerpunkt von dem zweiten Eichtag war die Einschätzung der Variabilität und der systematischen Abweichung der Feldschätzungen von den im Labor gemessenen Bodeneigenschaften durch einzelne Kartierende. Beispielsweise wurde zu Beginn des Projekts die organische Substanz und die Tongehalte in den Senkenböden im Nordwesten des Projektperimeters und die organische Substanz im Waldperimeter systematisch unterschätzt.

### H2-Standorte (Punkt- und Flächen-QS)

Auf der Ebene der pedologischen Bohrungen (maschinell mittels Bohrfahrzeug oder manuell mittels Handbohrung) erfolgt sowohl eine Punkt- als auch eine Flächen-QS. Der Ablauf der Punkt-QS ist in der Abbildung 23 schematisch dargestellt. Die erhobenen Punktdaten wurden mithilfe eines R-Skripts validiert, welches auf die Soildat-Datenbank zugreift (Skript «Datenkontrolle Soildat-Eingaben» Version 0.6). Dieses Skript zur Punkt-QS wurde von der Gruppe Bodennutzung und Bodenschutz an der BFH-HAFL entwickelt und wird in Zusammenarbeit mit dem KOBO laufend weiterentwickelt in Pilotprojekten zur Bodenkartierung. Das Skript enthält zwei Arten von Validierungen: (1) Vollständigkeitsprüfungen (z.B. muss im Datensatz der Bodentyp als Pflichtfeld erfasst werden) und (2) logische Prüfungen (z.B. konsistente Kombination von Untertyp und Bodentyp).

Das R-Skript generiert für die Punkt-QS eine Übersichtstabelle als PDF, in der zeilenweise alle Bohrungen und in den Spalten die Ergebnisse aller Validierungsregeln aufgelistet sind. Die Liste der im Projekt Lommis verwendeten Validierungsregeln findet sich in Anhang A3. Die PDF-Dokumente mit den Korrekturtabellen werden in einem weiteren Schritt durch die Kartierenden bearbeitet und in Soildat umgesetzt.

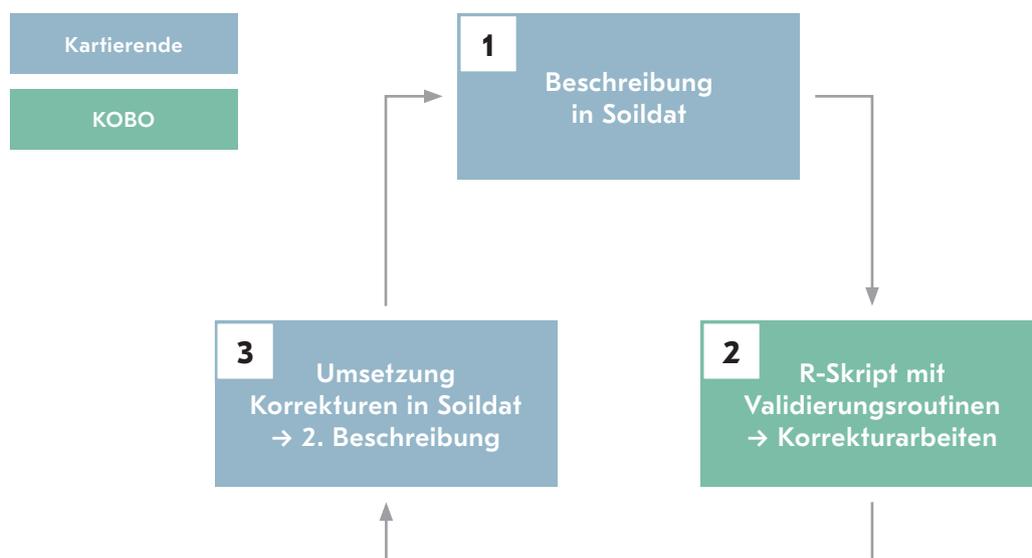


Abbildung 23: Punkt-QS Ablauf bei den pedologischen Bohrungen und farbliche Darstellung der jeweiligen Zuständigkeiten.

---

## 5.2 Profilstandorte (H1-Standorte)

Wie bereits in Kapitel 4.3 beschrieben, wurden in der Erkundungsphase die H1-Standorte iterativ festgelegt. Nach definitiver Festlegung der Profilstandorte wurden in Lommis 17 Landwirtschaftsprofile und 2 Waldprofile mit einem Raupenbagger geöffnet. Anschliessend wurden die Profilwände präpariert, fotografiert und durch die Kartierenden bodenkundlich nach aktuell gültiger Klassifikation aufgenommen (FAL 1997; BGS 2010; AFU Solothurn 2020).

Im Folgenden werden sechs der insgesamt 19 Profile steckbriefartig beschrieben, die einen Einblick in die Vielfalt der Böden im Gebiet geben. Alle vollständigen Profilblätter inklusive der Analyseergebnisse für die Bodenprofile sind im Anhang A4 sowie die Steckbriefe aller Profile im Anhang A5 dokumentiert.

### Steckbrief Profil P03: Regosol

**Lage und Nutzung:** Das Profil P03 liegt auf einer Kuppe mit einer Neigung von rund 7%. Der Boden wird ackerbaulich genutzt.

**Klassifikation:** Es handelt sich um einen ziemlich flachgründigen und normal durchlässigen Boden, der als Regosol (O) klassifiziert wird.

**Horizontierung:** Er besteht aus einem humusreichen, gepflügten Oberboden, der direkt in den noch unverwitterten Untergrund aus Moränenmaterial der letzten Eiszeit übergeht. Der Oberboden ist durch die landwirtschaftliche Bearbeitung mit dem Pflug stark homogenisiert und grenzt sich vom Unterboden scharf ab. Der Untergrundhorizont ist aufgrund der hohen Wurmaktivität bereits mit einigen Humuseinschlüssen durchsetzt.

**Entstehungshypothese:** Das Profil befindet sich in einer Verlustlage, weshalb durch die landwirtschaftliche Nutzung kontinuierlich Bodenmaterial über Oberflächenabfluss (Erosion) hangabwärts verlagert wird. Typisch für erodierte Standorte ist das Fehlen eines Unterbodenhorizonts und eine Kalkgrenze an der Bodenoberfläche.

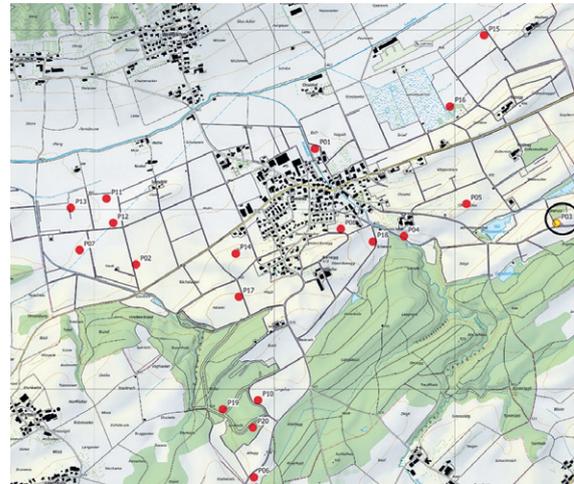


Abbildung 24: Lage des Profils P03.



**Ah,p: Gepflügter Oberboden**  
stark bewurzelt, hohe Wurmaktivität

Körnung [%] (Ton / Schluff / Sand)	Skelett [%]	Humus [%]	pH-Wert	Kalk [%]
18 / 39.4 / 42.6	9	5	7.2	21.1

27cm

**(B)C[h]: Untergrund mit Humuseinschlüssen**  
schwach bewurzelt, hohe Wurmaktivität

Körnung [%] (Ton / Schluff / Sand)	Skelett [%]	Humus [%]	pH-Wert	Kalk [%]
15 / 46 / 39	19	0.7	7.6	31.6

55cm

**C: Untergrund**  
Unverwittertes Moränenmaterial

Körnung [%] (Ton / Schluff / Sand)	Skelett [%]	Humus [%]	pH-Wert	Kalk [%]
14.2 / 50.7 / 35.1	15	0.2	7.8	37.3

118cm

Abbildung 25: Bodenprofil P03 (Regosol). Die Angaben zur Körnung, zum Humus, zum pH-Wert und zum Kalk sind Laboranalysen. Die Skelettgehalte stellen Feldschätzungen dar.

**Auswertungen:**

Die Böden sind multifunktional und erfüllen viele Leistungen für Mensch und Gesellschaft. Beispielhaft zeigt Abbildung 26 eine kleine Auswahl an Auswertungen für das Profil P03, um die Multifunktionalität des Regosols vereinfacht aufzuzeigen. Für die flächenhafte Bewertung der Böden und Methoden zur Bewertung von Böden wird auf Kapitel 8 mit einer Auswahl von Themenkarten verwiesen.

Der Standort P03 ist gut geeignet für die Bewässerung, da er nicht vernässt ist und das geschätzte Speichervermögen für leicht pflanzenverfügbares Wasser zwischen 50 und 70 mm liegt. Nach der Methode der Nutzungseignungsklassen (NEK) wird für den Standort eine futterbauliche Nutzung als langfristig nachhaltig und genügend ertragssicher beurteilt (Nutzungseignungsklasse 7 «vielseitiges Grünland»). Der Standort ist durch seine Flachgründigkeit (Wasserhaushaltsuntergruppe «d») und leichte Einschränkungen bei Vegetationsdauer und Niederschlagsverteilung in der landwirtschaftlichen Nutzungseignung limitiert.

In Bezug zu Themen der Biodiversität eignet sich der Regosol aufgrund seiner Durchlässigkeit und Kuppenlage nicht für ein Feuchtgebiet. Sein Trockenstandortpotenzial wird mit der gewählten Methode knapp im mittleren Bereich bewertet. Zwar ist der Boden ziemlich flachgründig und durchlässig, was einen Trockenstandort begünstigt. Die Hangneigungs- und Niederschlagsverhältnisse sind aber nicht ideal und bestehende, inventarisierte Trockenstandorte sind nicht vorhanden. Der Kohlenstoffvorrat beträgt 94 t/ha und liegt damit im unteren Drittel der Kohlenstoffvorräte in der Region. Für die Bewertung des Kohlenstoffvorrats im Oberboden wurde die Spannweite des im Kartiergebiet maximalen Kohlenstoffvorrats (258 t/ha) und minimaler Kohlenstoffvorrats (34 t/ha) für die Einstufung herangezogen (Abbildung 26). Ein Kohlenstoffanreicherungspotenzial zusätzlich zum bestehenden Kohlenstoffvorrat in Form von stabilen Ton-Humuskomplexen ist im Zusammenhang mit den eher tieferen Tongehalten von unter 20% nicht zu erwarten.

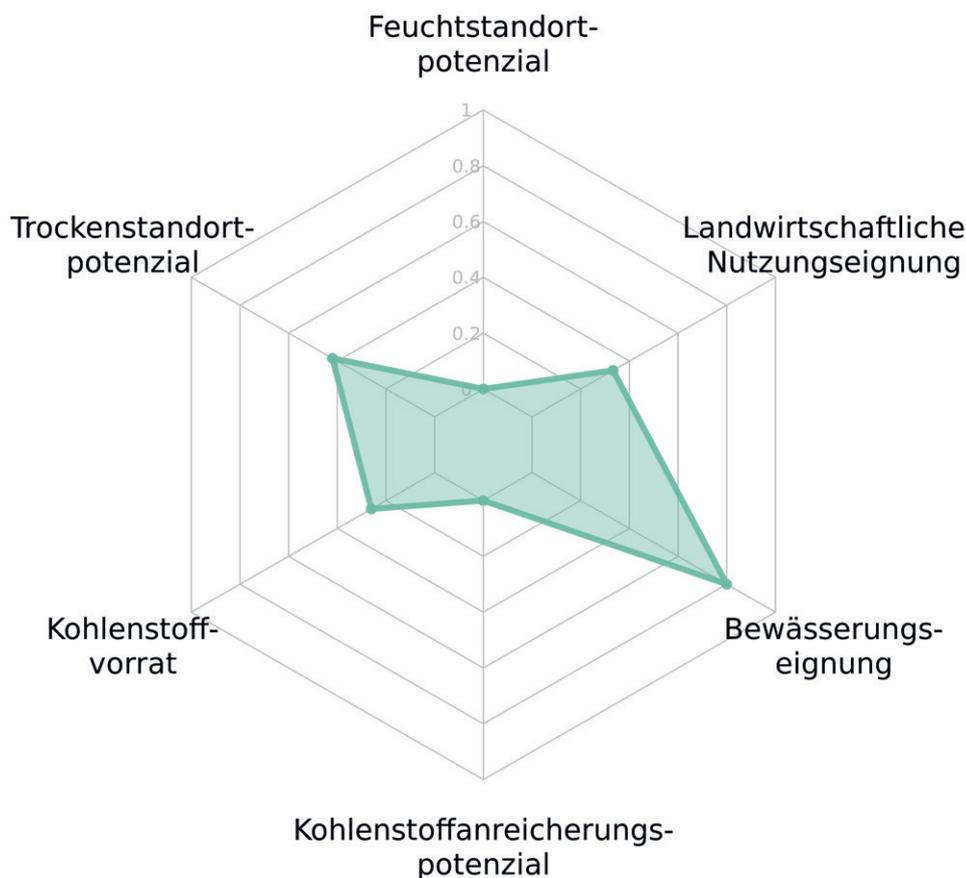


Abbildung 26: Spinnendiagramm mit ausgewählten Bewertungen für das Bodenprofil P03 (Regosol). Die Skalen der unterschiedlichen Bewertungsmethoden wurden normiert (0 = minimales Potenzial oder minimale Eignung, 1 = maximales Potenzial oder maximale Eignung).

### Steckbrief Profil P08: Kalkbraunerde

**Lage und Nutzung:** Profil P08 liegt auf einer Hangterrasse mit einer Neigung von rund 18%. Die Geländeform ist ungleichmässig und das Kleinrelief ist konvex. Der Boden wird als Dauerweide genutzt.

**Klassifikation:** Es handelt sich um einen mässig tiefgründigen und normal durchlässigen Boden (Kalkbraunerde, K).

**Horizontierung:** Er besteht aus einem humosen, kalkhaltigen Oberboden und geht kluftartig in den mit Tonhüllen durchsetzten, ebenfalls kalkhaltigen Unterboden über. In diesem Horizont findet man einige Mangankonkretionen, welche die ersten Anzeichen für eine zeitweise Vernässung durch Wasserstau sind. Darunter, in welligem Übergang, befindet sich der Untergrund aus Moränenmaterial der letzten Eiszeit, der ebenfalls Tonhüllen aufweist.

**Entstehungshypothese:** Typisch für Kalkbraunerden ist, das Kalk durch sekundäre Umlagerungsprozesse, in den durch Bodenbildung bereits verbrauchten Boden gelangt.

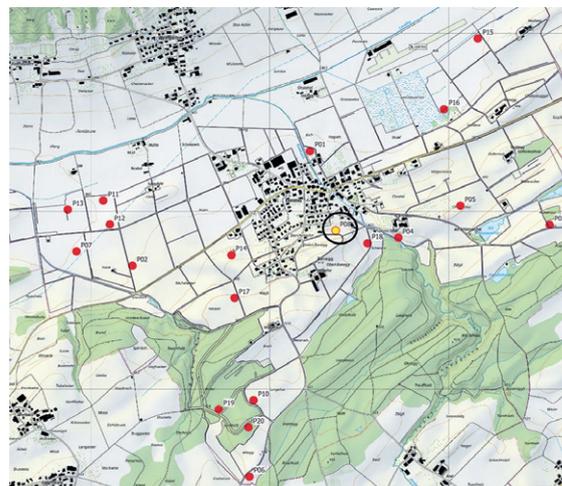


Abbildung 27: Lage des Profils P08.



**Ah: Humoser Oberboden**  
stark bewurzelt, hohe Wurmaktivität, kluftiger Übergang

Körnung [%] (Ton / Schluff / Sand)	Skelett [%]	Humus [%]	pH-Wert	Kalk [%]
18.7 / 33.6 / 47.7	9	6.6	7.2	9.2

17cm

**[Ah)CBt,cn: Unterboden mit Tonhüllen**  
Mangankonkretionen, mittel bewurzelt, hohe Wurmaktivität, tatschiger Übergang

Körnung [%] (Ton / Schluff / Sand)	Skelett [%]	Humus [%]	pH-Wert	Kalk [%]
17.2 / 36.8 / 46	11	1.4	7.5	12.4

40cm

**Bct,(x)cn: Untergrund mit Tonhüllen**  
schwach verdichtet, Mangankonkretionen, schwach bewurzelt, Wurmaktivität

Körnung [%] (Ton / Schluff / Sand)	Skelett [%]	Humus [%]	pH-Wert	Kalk [%]
15.8 / 43.1 / 41.1	20	0.6	7.7	39.2

70cm

**C(x): Untergrund**  
schwach verdichtet, Wurmaktivität

117cm

Abbildung 28: Bodenprofil P08 (Kalkbraunerde). Die Angaben zur Körnung, zum Humus, zum pH-Wert und zum Kalk sind Laboranalysen. Die Skelettgehalte stellen Feldschätzungen dar.

**Auswertungen:**

Für den Standort von Profil P08 zeigt Abbildung 29 eine Auswahl an Auswertungen. Der Standort eignet sich für die Bewässerung, da er nicht vernässt ist und das geschätzte Speichervermögen für leicht pflanzenverfügbares Wasser zwischen 50 und 70 mm liegt. Der Standort eignet sich langfristig nachhaltig zur futterbaulichen Nutzung (Nutzungseignungsklasse 6 «Eingeschränkte, futterbaubetonte Fruchtfolge»). Der limitierende Faktor für die landwirtschaftliche Nutzungseignung ist das umgebende, stark wellige Terrain (Geländeform n).

Der Standort eignet sich aufgrund seiner Hanglage und Durchlässigkeit nicht als Feuchtgebiet. Sein Trockenstandortpotenzial wird fast im mittleren Bereich eingeschätzt. Zwar ist der Boden durchlässig, was einen Trockenstandort begünstigt. Der Wasserhaushalt (Wasserhaushaltsuntergruppe «c»), die Hangneigungs- und Niederschlagsverhältnisse sind aber nicht ideal und bestehende, inventarisierte Trockenstandorte sind nicht in der Nähe. Der Kohlenstoffvorrat im Oberboden liegt mit 85 t/ha im unteren Viertel der Kohlenstoffvorräte in der Region. Ein Kohlenstoffanreicherungspotenzial zusätzlich zum bestehenden Kohlenstoffvorrat in Form von stabilen Ton-Humuskomplexen ist im Zusammenhang mit den eher tieferen Tongehalten von unter 20% nicht zu erwarten.

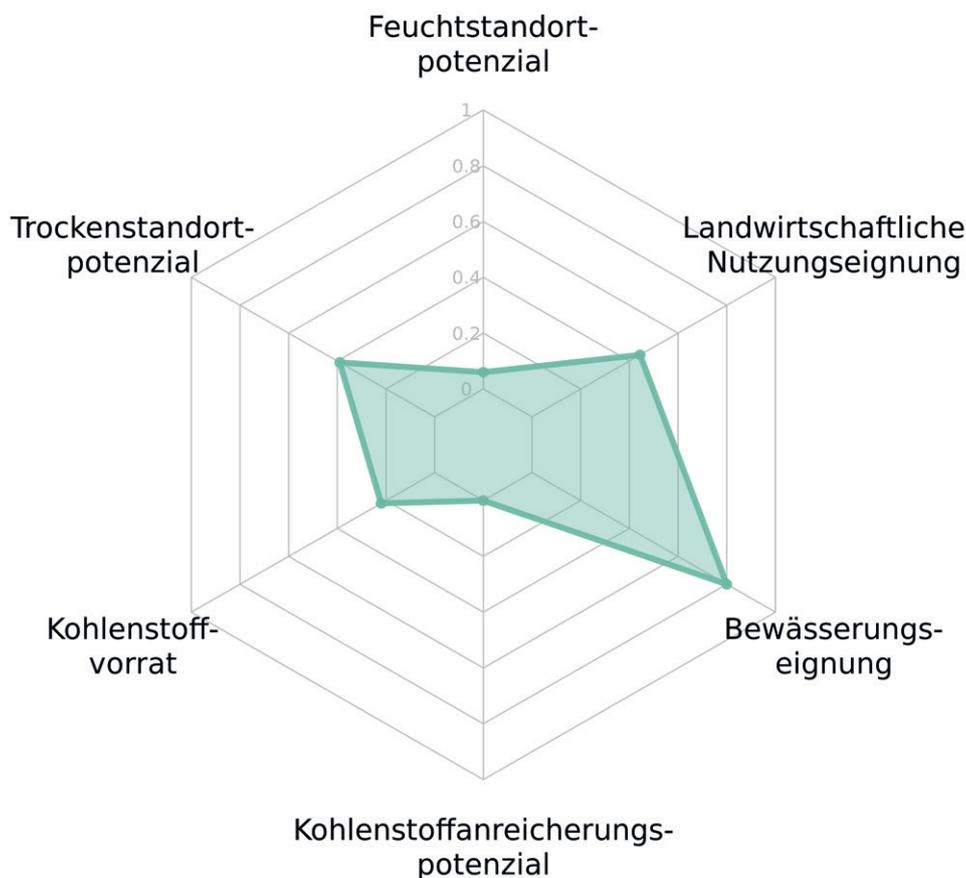


Abbildung 29: Spinnendiagramm mit ausgewählten Bewertungen für das Bodenprofil P08 (Kalkbraunerde). Die Skalen der unterschiedlichen Bewertungsmethoden wurden normiert (0 = minimales Potenzial oder minimale Eignung, 1 = maximales Potenzial oder maximale Eignung).

### Steckbrief Profil P12: Braunerde

**Lage und Nutzung:** Profil P12 liegt auf einer Kuppe mit einer Neigung von rund 3%. Die Geländeform und das Kleinrelief sind konvex (Verlustlage). Der Boden wird ackerbaulich genutzt.

**Klassifikation:** Es handelt sich um einen ziemlich flachgründigen und normal durchlässigen Boden, klassiert als Braunerde (B).

**Horizontierung:** Der Boden besteht aus einem humusreichen, gepflügten Oberboden, der in einen verbrauchten Unterboden übergeht. Dieser Horizont ist leicht verdichtet, was die schwache Rostfleckung und das Vorkommen von Mangankonkretionen erklärt. Dies sind Anzeichen für zeitweise Vernässungen durch Staueffekte im Boden. Bei 45 cm ist ein lithologischer Wechsel, welcher mit einem römischen II gekennzeichnet ist. Dieser Wechsel widerspiegelt sich gut in der Textur und den Skelettgehalten. Die Textur wechselt von sandigem Lehm zu Sand und das Skelett nimmt von 49% Vol. zu 0% Vol. ab. Das Ausgangsmaterial wird als fluvioglazial angesprochen. Die Kalkgrenze liegt bei 85 cm.

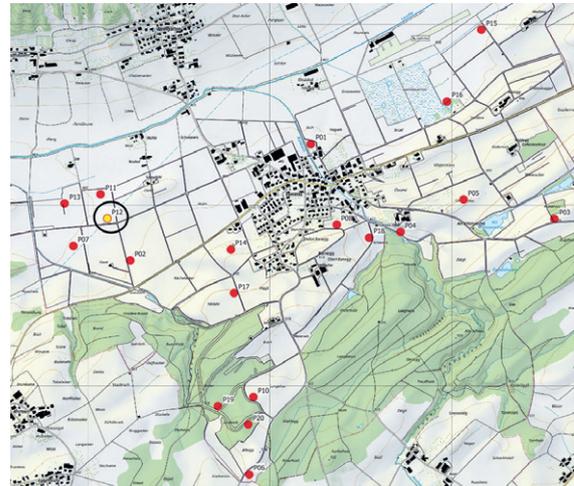


Abbildung 30: Lage des Profils P12.

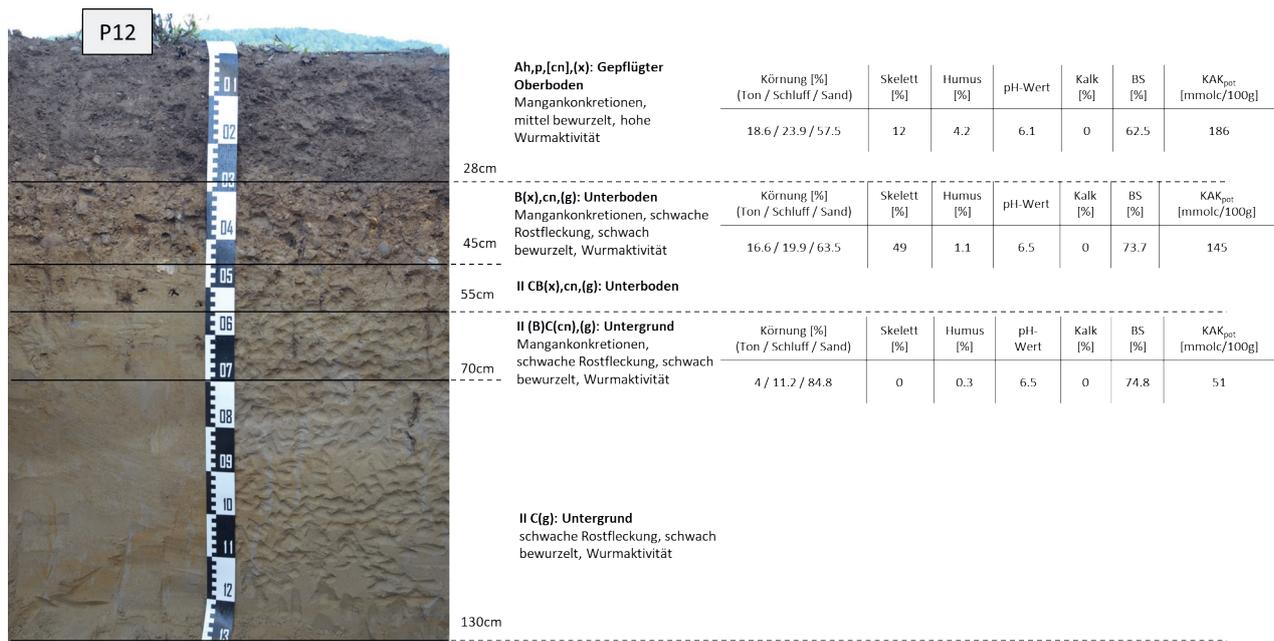


Abbildung 31: Bodenprofil P12 (Braunerde). Die Angaben zur Körnung, zum Humus, zum pH-Wert, KAK und zum Kalk sind Laboranalysen. Die Skelettgehalte stellen Feldschätzungen dar.

Auswertungen:

Für die Braunerde am Standort P12 zeigen die Auswertungen andere Ergebnisse als bei den oben gezeigten Profilen P03 und P08 (Abbildung 32). Der Standort P12 ist gut geeignet für die Bewässerung, da er nicht vernässt ist und das geschätzte Speichervermögen für leicht pflanzenverfügbares Wasser zwischen 50 mm und 70 mm liegt. Nach der NEK-Methode wird P12 als Standort für Getreidebau eingeschätzt, welcher aufgrund der ziemlichen Flachgründigkeit deutliche Ertrags- oder Nutzungseinschränkungen hat (Nutzungseignungsklasse 4 «Getreidebetonte Fruchtfolge mit geringer Ertragsicherheit»). Hackfruchtanbau ist nach dieser Einschätzung auf dem Standort zwar kurzfristig, aber nicht langfristig, nachhaltig möglich.

Der Standort P12 eignet sich aufgrund seiner flachen Kuppenlage und Durchlässigkeit weniger als Feuchtgebiet. Sein Trockenstandortpotenzial wird mit der gewählten Methode knapp im mittleren Bereich eingeschätzt. Zwar ist der Boden ziemlich flachgründig und durchlässig, was einen Trockenstandort begünstigt. Aber auch hier sind die Hangneigungs- und Niederschlagsverhältnisse nicht ideal und bestehende, inventarisierte Trockenstandorte sind nicht in der Nähe. Der Kohlenstoffvorrat im Oberboden liegt mit 71 t/ha im unteren Fünftel der Bandbreite von Kohlenstoffvorräten im Gebiet. Das Anreicherungspotenzial für langfristig stabil gebundenen Kohlenstoff in Ton-Humuskomplexen ist gering und liegt bei 7 t/ha.

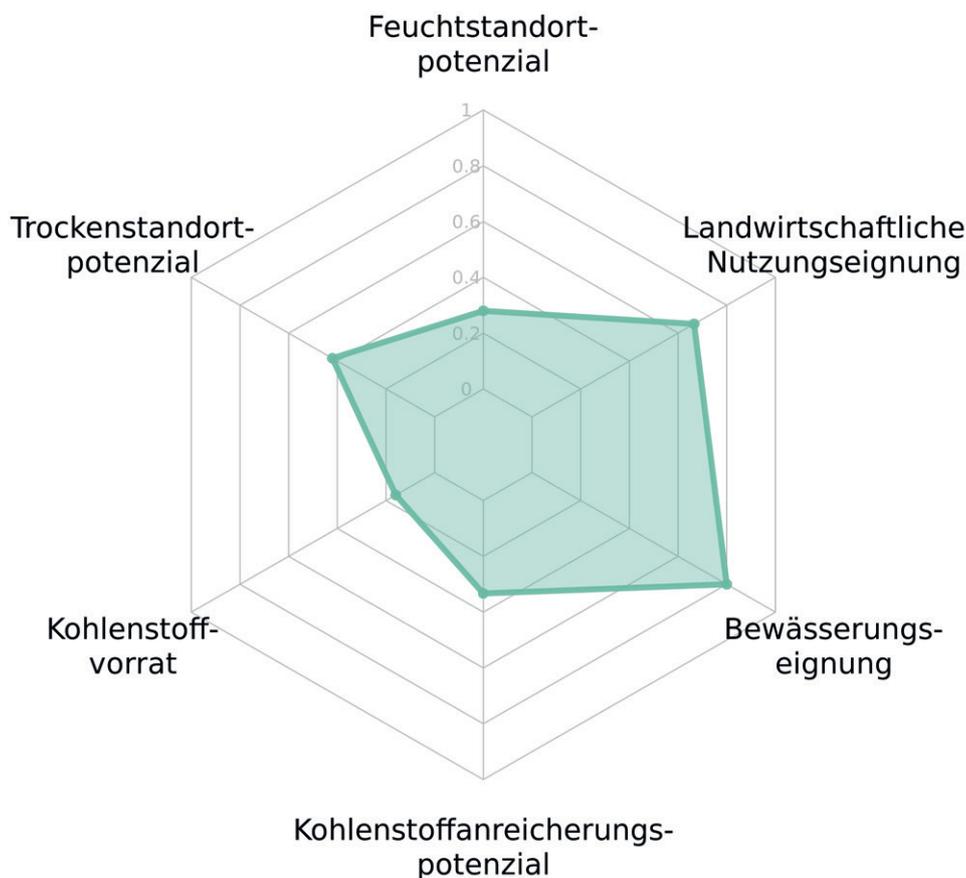


Abbildung 32: Spinnendiagramm mit ausgewählten Bewertungen für das Bodenprofil P12 (Braunerde). Die Skalen der unterschiedlichen Bewertungsmethoden wurden normiert (0 = minimales Potenzial oder minimale Eignung, 1 = maximales Potenzial oder maximale Eignung).

### Steckbrief Profil P13: Buntgley

**Lage und Nutzung:** Profil P13 liegt in einer Ebene mit ausgeglichenem Kleinrelief. Der Boden wird ackerbaulich genutzt.

**Klassifikation:** Es handelt sich um einen ziemlich flachgründigen und sowohl stau- als auch grundwasser-geprägten Boden, einem sog. Buntgley (W).

**Horizontierung:** Er besteht aus einem humusreichen, gepflügten und bewirtschaftungsbedingt verdichteten Oberboden, welcher durch seinen sehr hohen Tongehalt auffällt. Darunter findet man einen verbrauchten, aber bereits mit zahlreichen grossen Rostflecken durchsetzten Unterboden. Diese Vernässung ist auf Staunässe zurückzuführen, weil der Boden aus Seebodenlehm sehr feinkörnig ist und das Bodenwasser lange im Boden durch Kapillarkräfte gebunden ist. Es gibt nur wenig Grobporen, weshalb auch die Wurzeldichte vergleichsweise tief ist. Darunter folgt der tonige Untergrund, bei welchem nebst den grossen Rostflecken zunehmend die fahlen Bereiche dominieren. Diese Vernässung ist ein Zusammenspiel von Stau- und Grundnässe, weil der Boden einerseits sehr feinkörnig ist und andererseits bereits im Bereich des unmittelbaren Kapillarsaumes liegt, d. h. er ist immer wieder im Grundwasser liegend. Bei 64 cm

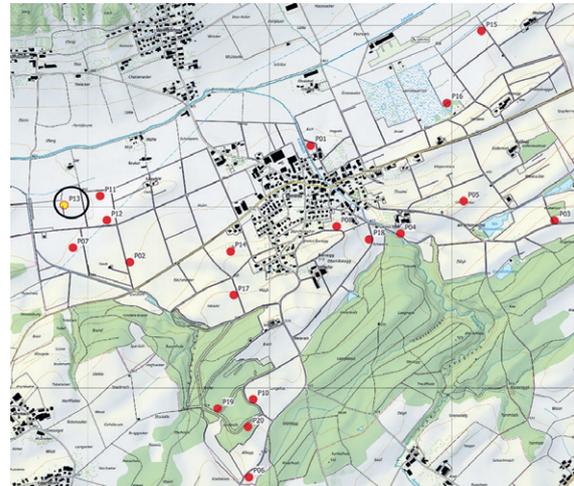


Abbildung 33:  
Lage des Profils P13.

ist ein lithologischer Wechsel, der mit einem römischen II gekennzeichnet ist. Dieser Wechsel widerspiegelt sich auch sehr gut in den Textur- und den Skelettgehalten. Die Textur wechselt von Ton zu sandigem Lehm und das Skelett nimmt von 0% Vol. zu 42% Vol. zu. Das Ausgangsmaterial wechselt von Seebodenlehm zu Schotter mit meist rundlichen Steinen. Der schottrige Untergrund liegt im Grundwasser (Grundwasserleiter) und ist somit dauernd vernässt. Die Kalkgrenze liegt bei 71 cm.

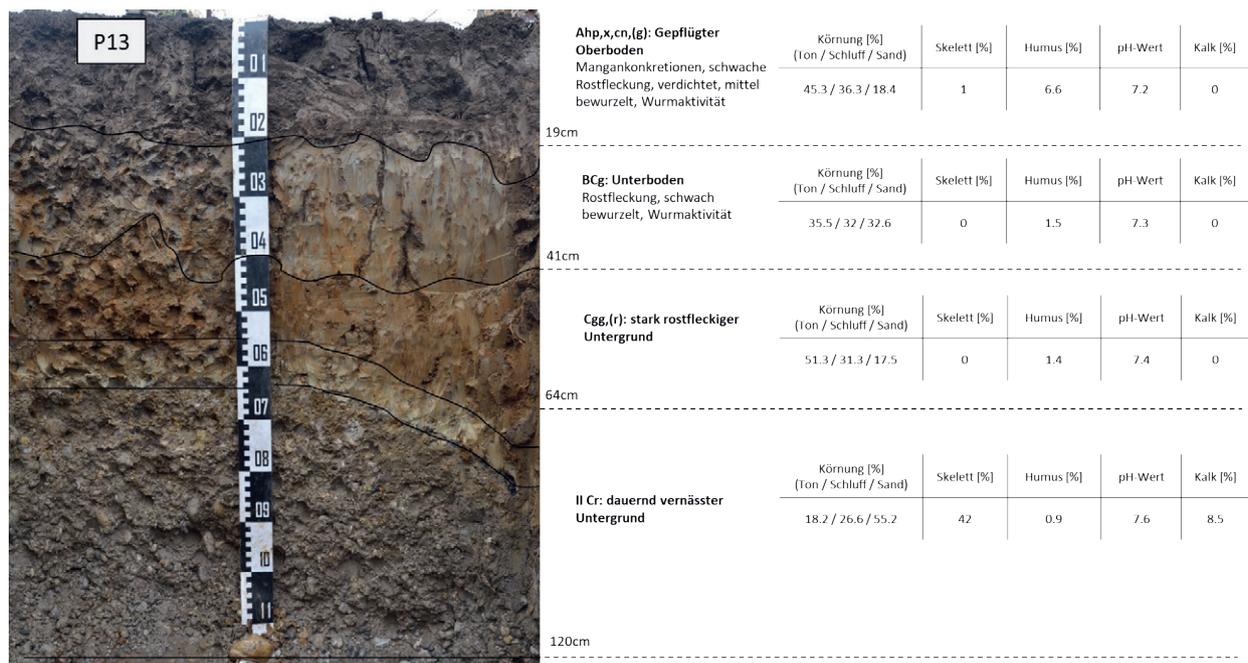


Abbildung 34:  
Bodenprofil P13 (Buntgley). Die Angaben zur Körnung, zum Humus, zum pH-Wert und zum Kalk sind Laboranalysen. Die Skelettgehalte stellen Feldschätzungen dar.

**Auswertungen:**

Das Profil hat als stau- und grundwassergeprägter Boden mit flachem Terrain ein erhöhtes Feuchtstandortpotenzial (Abbildung 35).

Das Trockenstandortpotenzial liegt wegen der Stau- und Grundwasserprägung im unteren Drittel. Der Kohlenstoffvorrat im Oberboden beträgt 120 t/ha und liegt regional gesehen im mittleren Bereich. Das Anreicherungspotenzial für langfristig stabil gebundenen Kohlenstoff in Form von Ton-Humuskomplexen ist wegen des tonigen Bodens hoch und liegt bei 60 t/ha. Die Bewässerungseignung am Standort wird mit der gewählten Methode im mittleren Bereich eingeschätzt. Das Profil P13 ist flachgründig und im Oberboden teilweise sehr tonhaltig. Weil das Raumgewicht der Gesamtprobe beim Profil P13 teilweise sehr tief ist (1.07 g/cm<sup>3</sup>), kann trotzdem recht viel leicht pflanzenverfügbares Wasser gespeichert werden (30–50 mm).

Nach der NEK-Methode zur Beurteilung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung wird der Buntgley für eine ausschliesslich futterbauliche Nutzung mit genügender Ertragssicherheit beurteilt (Nutzungseignungsklasse 7 «vielseitiges Grünland»). Der Standort ist durch seine Flachgründigkeit und den vernäs-senden Merkmalen (Wasserhaushaltsuntergruppe «u») in der landwirtschaftlichen Nutzungseignung limi-tiert.

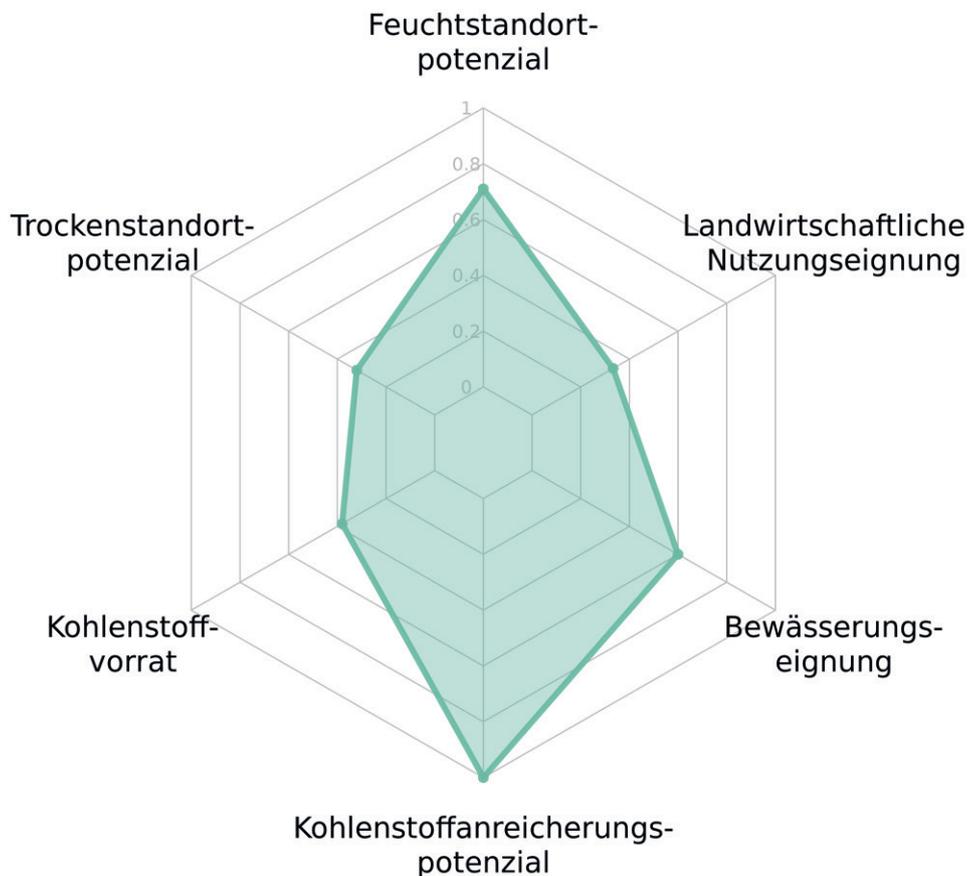


Abbildung 35: Spinnendiagramm mit ausgewählten Bewertungen für das Bodenprofil P13 (Buntgley). Die Skalen der unterschiedlichen Bewertungsmethoden wurden normiert (0 = minimales Potenzial oder minimale Eignung, 1 = maximales Potenzial oder maximale Eignung).

### Steckbrief Profil P16: Fahlgley

**Lage und Nutzung:** Profil P16 liegt in einer Ebene mit ausgeglichenem Kleinrelief. Das Profil liegt im Randbereich des sogenannten «Lommiserriets» (Naturschutzgebiet) und wird landwirtschaftlich genutzt. Der Boden ist drainiert.

**Klassifikation:** Es handelt sich um einen flachgründigen und grundwassergeprägten, als Fahlgley (G) bezeichneten, Boden.

**Horizontierung:** Im Profil befinden sich zwei lithologische Wechsel, welche jeweils mit einer römischen Zahl (II) oder (III) gekennzeichnet sind. Die beiden Oberbodenhorizonte wurden durch den Menschen aufgebracht und sind mit einem «ya» gekennzeichnet. Der dritte Horizont ist ebenfalls durch den Menschen überprägt worden, was man an helleren mineralischen Beimengungen innerhalb des Torfs erkennt. Der Untergrundhorizont, dessen Ausgangsmaterial als Alluvium mit Torfbeimengungen angesprochen wird, grenzt sich vom darüberliegenden Torfhorizont farblich scharf ab. Bereits knapp unter der Bodenoberfläche sind zahlreiche Rostflecken erkennbar. Mit zunehmender Tiefe dominieren wegen der Reduktion der

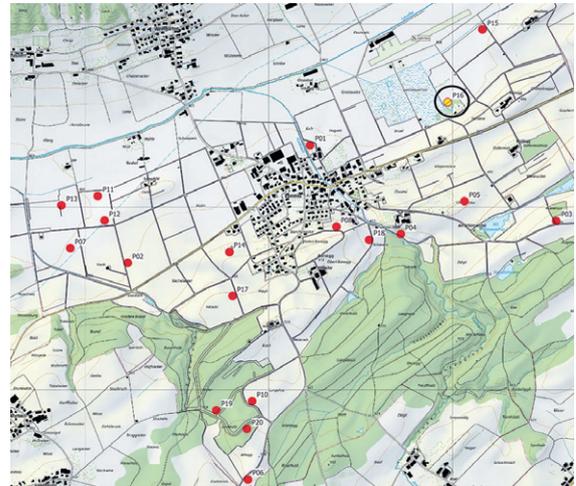


Abbildung 36: Lage des Profils P16.

Eisen- und Manganoxide die fahlen Bodenbereiche und Rostflecken kommen nur noch vereinzelt vor. Der dauernd hohe Grundwasserspiegel (zeitweise sogar an der Bodenoberfläche) führt dazu, dass die hohen Humusgehalte im Torfhorizont erhalten bleiben, bzw. der organische Kohlenstoff nicht mineralisiert wird.



Horizont	Körnung [%] (Ton / Schluff / Sand)	Skelett [%]	Humus [%]	pH-Wert	Kalk [%]
<b>yaAa,gg(g): anthropogener Oberboden</b> Starke Rostfleckung, sehr stark bewurzelt, keine Wurmaktivität	25.5 / 37.2 / 37.3	4	12.2	7.2	21.3
<b>yaCAhgg: anthropogener Oberboden</b> Starke Rostfleckung, stark bewurzelt, keine Wurmaktivität	22.7 / 39.8 / 37.5	8	3.8		26.1
<b>yaC/II Th,gg,(r): anthropogener Unterboden</b> Starke Rostfleckung, mittel bewurzelt, keine Wurmaktivität					
<b>III [Tf]Cr: Dauernd vernässter Untergrund</b>	21.8 / 51.4 / 26.8	0	1.4	7.6	24.9

Abbildung 37: Bodenprofil P16 (Fahlgley). Die Angaben zur Körnung, zum Humus, zum pH-Wert und zum Kalk sind Laboranalysen. Die Skelettgehalte stellen Feldschätzungen dar.

**Auswertungen:**

Für das Bodenprofil P16 zeigen die Auswertungen ein differenziertes Muster im Sinne der Multifunktionalität (Abbildung 38). Der Boden hat aufgrund seiner Vernässung ein sehr hohes Feuchtstandortpotenzial. Im Gegenzug ist das Trockenstandortpotenzial gering. Der Kohlenstoffvorrat im Oberboden liegt regional betrachtet mit 171 t/ha im oberen Drittel. Das Profil P16 hat kein Kohlenstoffanreicherungspotenzial, der Kohlenstoffvorrat ist aufgrund der Nässe erhöht, in Form von stabilen Ton-Humuskomplexen könnte kein zusätzlicher Kohlenstoff langfristig gebunden werden. Langfristig kann der Standort landwirtschaftlich als feuchte Mähwiese genutzt werden (Nutzungseignungsklasse 8 «Feuchte Mähwiesen»). Diese Einschränkung in der landwirtschaftlichen Nutzungseignung ist durch den Wasserhaushalt des Fahlgleys gegeben (Wasserhaushaltsuntergruppe «w»).

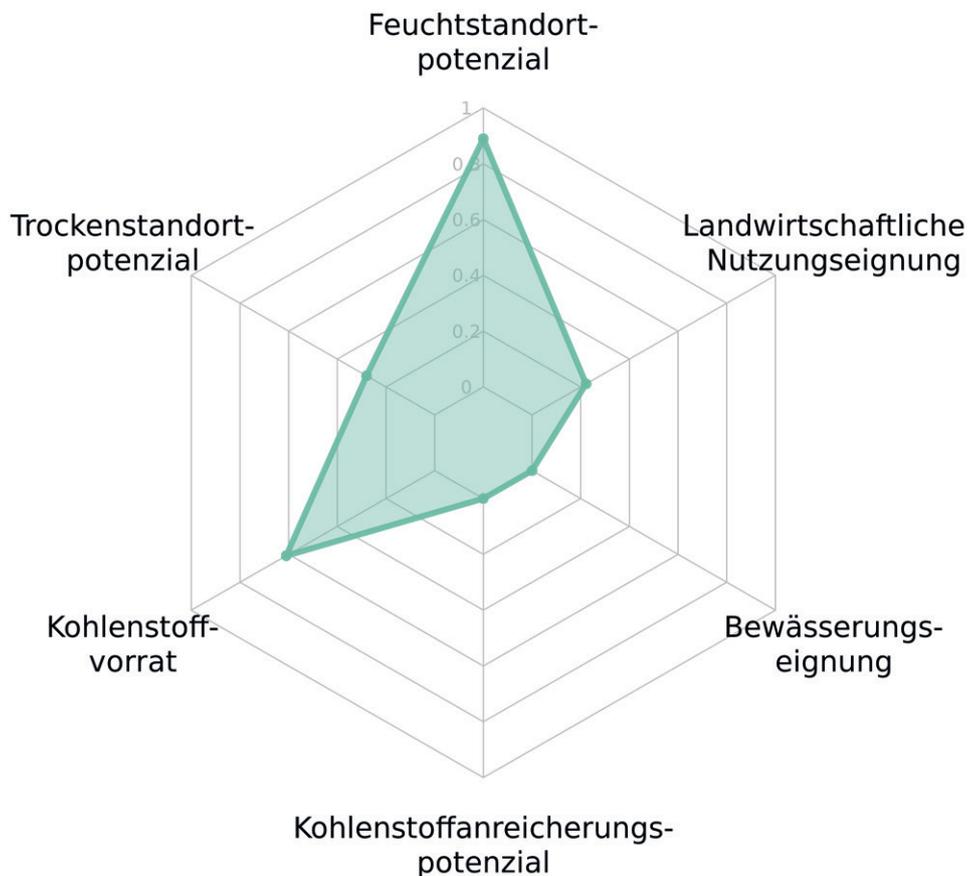


Abbildung 38: Spinnendiagramm mit ausgewählten Bewertungen für das Bodenprofil P16 (Fahlgley). Die Skalen der unterschiedlichen Bewertungsmethoden wurden normiert (0 = minimales Potenzial oder minimale Eignung, 1 = maximales Potenzial oder maximale Eignung).

### Steckbrief Bodenprofil P20: Parabraunerde im Wald

**Lage und Nutzung:** Profil 20 liegt im Wald (Junkholz) auf einer Kuppe mit einer gleichmässigen Neigung von rund 9%. Die Waldgesellschaft ist ein typischer Waldmeister-Buchenwald.

**Klassifikation:** Es handelt sich um einen ziemlich flachgründigen und normal durchlässigen Boden, einer Parabraunerde (T).

**Horizontierung:** Typisch für Waldböden ist die Humusaufgabe. In diesem Bodenprofil besteht die organische Auflage aus einem Ol- und Of-Horizont, was als Mull-Auflage klassifiziert wird. Typisch für die Parabraunerden ist die Tonverlagerung innerhalb des Bodenprofils mit der entsprechenden Horizontabfolge. In diesem Profil ist die Tonverlagerung gut ersichtlich: der Tongehalt steigt zwischen den beiden Unterbodenhorizonten um einen Faktor von 1.9 an. Darunter folgt mit einem lithologischen Wechsel der Untergrund aus Konglomerat (Nagelfluh). Das darüberliegende Material wird als Moränenmaterial aus der letzten Eiszeit angesprochen.

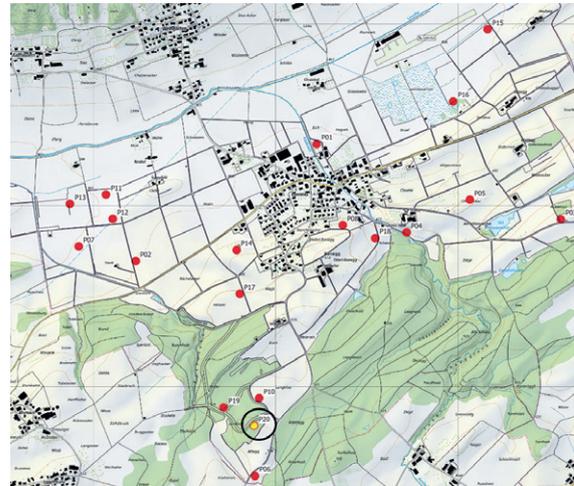


Abbildung 39:  
Lage des Profils P20.



Horizont	Körnung [%] (Ton / Schluff / Sand)	Skelett [%]	Humus [%]	pH-Wert	Kalk [%]	BS [%]	KAK <sub>pot</sub> [mmolc/100g]
<b>Ol - Of: Mull</b>							
<b>Ah: Oberboden</b>							
0cm							
10cm	14.6 / 27.1 / 58.4	8	4.4	5.2	0	41.9	157
<b>[A]EB: Unterboden Tonauswaschungshorizont</b>							
30cm	17.3 / 25.4 / 57.3	8	1.8	5.1	0	56.4	158
<b>It, cn, (g): Unterboden Toneinwaschungshorizont, Rostflecken, Mangankonkretionen</b>							
60cm	32.9 / 15.4 / 51.7	23	1.4	6.3	1	69.5	245
<b>II R: Untergrund</b>							
100cm							

Abbildung 40:  
Bodenprofil P20 (Parabraunerde). Die Angaben zur Körnung, zum Humus, zum pH-Wert, KAK und zum Kalk sind Laboranalysen. Die Skelettgehalte stellen Feldschätzungen dar.

Auswertungen:

Für das Waldprofil P20 wird statt der landwirtschaftlichen Nutzungseignung der Säurestatus beurteilt (Abbildung 41). Der Boden ist schwach sauer, der minimale pH(CaCl<sub>2</sub>) liegt bei 5.1. Die Basensättigung ist in Relation zum pH-Wert relativ hoch. Der dominante Pufferprozess, die Silikatverwitterung, ist hinsichtlich der Menge an Feinerde in den oberen Horizonten in grossen Mengen verfügbar, schreitet aber langsam voran. Die Säurepufferungskapazität ist beschränkt und somit die Zeitdauer, die die Parabraunerde bei weiterer Versauerung sich in diesem Säurestatus befinden wird.

Das Feuchtstandortpotenzial ist am Standort P20 sehr gering und ein mittleres Trockenstandortpotenzial liegt vor, weil der Boden durchlässig und flachgründig ist. Ein Kohlenstoffvorrat von 75 t/ha im Oberboden liegt im unteren Bereich der Bandbreite in Lommis (die organische Auflage wurde hier nicht berücksichtigt). Es besteht an Profil P20 ein geringes Anreicherungspotenzial für langfristig stabil gebundenen Kohlenstoff in Ton-Humuskomplexen (17 t/ha).

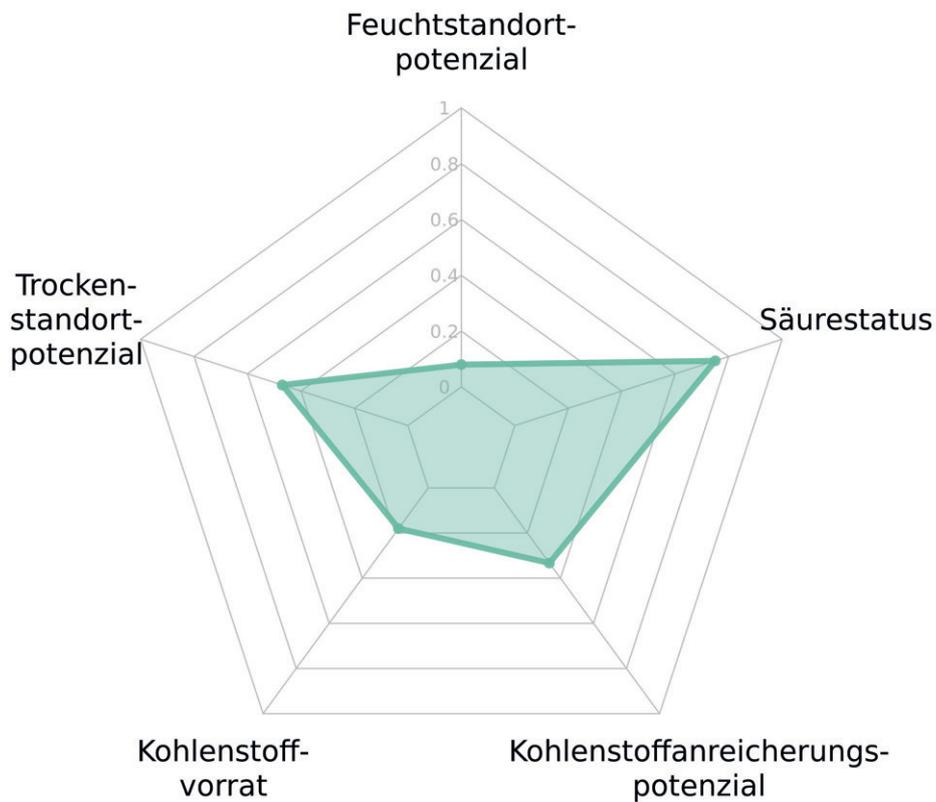


Abbildung 41: Spinnendiagramm mit ausgewählten Auswertungen zum Waldbodenprofil P20 (Parabraunerde). Die Skalen der unterschiedlichen Bewertungsmethoden wurden normiert (0 = minimales Potenzial oder minimale Eignung, 1 = maximales Potenzial oder maximale Eignung).

## 5.3 Bohrungen für Pedologie (H2-Standorte)

Im Anschluss an die Profilaufnahmen erfolgten die Bohrungen für die bodenkundliche Beschreibung und Klassifikation der Böden mit einer Dichte von rund einer Bohrung pro Hektare (Tabelle 1). Die Bohrungen wurden von Mitarbeitenden des KOBO durchgeführt, wobei die durchschnittliche tägliche Bohrleistung mit der volumenbezogenen Probenahme (Hülsen) bei ca. 15 Bohrungen lag. Die Hülsen wurden anschliessend von den Mitarbeitenden der beiden Ingenieurbüros pedologisch aufgenommen (Abbildung 42).

Die Einwilligung der Bewirtschafter:innen zum Befahren der Flächen wurde jeweils vorab individuell eingeholt. Ein solches Vorgehen mit aktueller Information für die Bewirtschafter:innen hatte den Vorteil, dass die Bohrungen auf den Parzellen zu meist ohne Zugangsprobleme durchgeführt werden konnten. Bei dem Bohrfahrzeug, das in Lommis zum Einsatz kam, handelt es sich um denselben Aebi TT75 mit Bohrturm, der bereits in OP1 in Diemerswil eingesetzt wurde (Abbildung 42). Mit dem System wurden Bohrkern mit einem Durchmesser

von 8 cm und einer Länge von 1.2 m in fünf Teilstücken entnommen. Die Bohrkern werden mithilfe von PVC-Hülsen entnommen, die auch eine einfache Lagerung der Kerne erlauben und genügend Material für die Beprobung liefern.

Standorte, die aufgrund grosser Nässe oder Neigung für das Fahrzeug nicht zugänglich waren, wurden manuell beprobt. Ebenso alle Waldstandorte. Die Bohrkern wurden tiefengetreu ausgelegt und bodenkundlich nach aktueller Klassifikation angesprochen. Im Vergleich zu den Profilen (H1) wurde jedoch an den H2-Standorten ein reduzierter Attributdatensatz erhoben (siehe Anhang A1.2). Nebst der pedologischen Beschreibung wurden aus bis zu drei Horizonten Proben für nasschemische Referenzanalysen (rund 16% der Proben) sowie für spektroskopische Messungen im Labor (100% der Proben) entnommen (Tabelle 1). Nach erfolgter Ansprache und Beprobung wurde das Bohrloch mit dem verbleibenden Bodenmaterial vor Ort wieder verfüllt.



Abbildung 42: Bohrfahrzeug (Aebi TT75) und Bohrturm für die H2-Standorte im Kartierprojekt Lommis (links), sowie die Hülsen, die aufgeschnitten wurden, zur bodenkundlichen Beschreibung und Klassifikation der Böden (rechts).

Bodenkundliche Aufnahmen wurden im Rahmen der Erkundungsbohrungen (V), an den Profilen (H1) und an den H2-Standorten durchgeführt (Tabelle 2). Insgesamt wurden im Projekt in Lommis an 295 Standorten rund 1283 Horizonte bodenkundlich erfasst.

	Bodenprofile	Bohrungen für Pedologie	Bohrungen-Catena
Hierarchiestufe/Abkürzung	H1	H2	V
Bohrgerät	Raupenbagger	Bohrfahrzeug GreenGround (LW) / Handbohrung (WA)	Handbohrung
Maximale Tiefe [cm]	150	120	100
# Standorte [-]	17 LW / 2 WA	242 LW / 22 WA	12 LW / 0 WA
# Horizonte [-]	104	1121	58
# Anzahl Horizonte/Standort	5.5	4.3	4.8

Tabelle 2:  
Übersichtstabelle der für die deskriptive Statistik berücksichtigten pedologischen Aufnahmen.

### Bodentyp

Abbildung 43 zeigt die grosse Variabilität der Bodentypen im Projektgebiet und der Wasserhaushaltsklassen. Die Abbildung zeigt die Bodentypen vor der Qualitätssicherung. Die häufigsten Böden im Projektgebiet Lommis sind normal durchlässige Braunerden (B, 37%) und Regosole (O, 22%) sowie

Auffüllungen (X, 13%). Grund- oder hangwasser-geprägte mineralische Böden (Braunerde-Gley, V, und Buntgley W, Fahlgley, G) sind vereinzelt anzutreffen (11%). Seltener wurden grundnasse organische Böden wie das Halbmoor (N) angesprochen (2%), oder stauwasser-geprägte Böden (Braunerde-Pseudogley, Y, und Pseudogley, I).

**Bodentyp, n = 292**  
Relative Anzahl

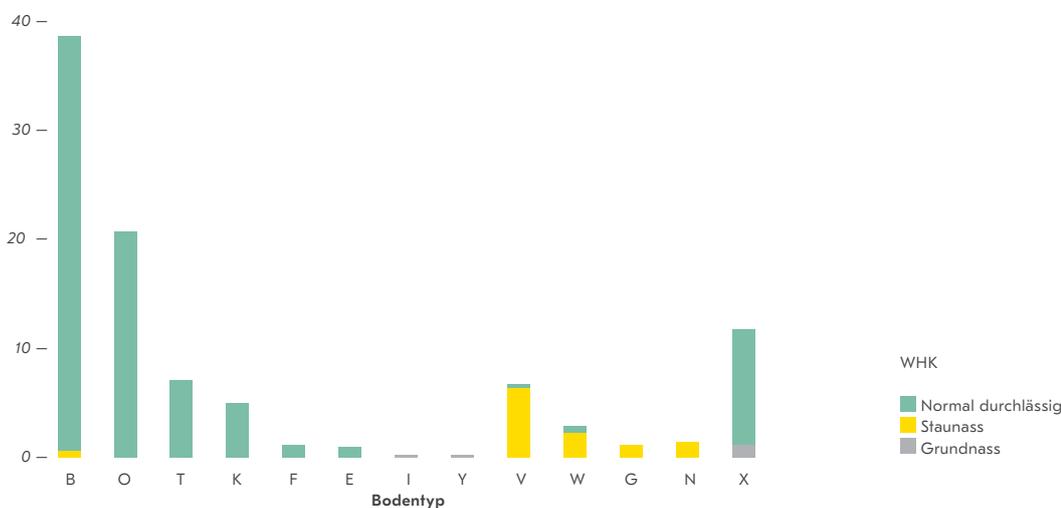


Abbildung 43:  
Relative Häufigkeiten der Bodentypen im Projektgebiet Lommis, farblich dargestellt nach den Wasserhaushaltsklassen WHK (Anzahl Beobachtungen n = 292, davon n = 19 Profile).

### Pflanzennutzbare Gründigkeit (pnG)

Abbildung 44 zeigt die Häufigkeitsverteilung der berechneten pflanzennutzbaren Gründigkeit (pnG) für die 295 pedologischen Bohrungen. Der pnG-Werte liegen im Bereich von 9 cm bis 108 cm, der Mittelwert liegt bei 50 cm. Abbildung 45 und Abbildung 46 illustrieren die grosse Variabilität der pnG der Böden im Gebiet Lommis eindrücklich. Die sehr flachgründige Bohrung (B238) hat beispielsweise aufgrund der Vernässung starke

Abzüge ab dem 1. Horizont erhalten, und weist bereits ab dem 2. Horizont einen Grundwasserspiegel auf. Bei der sehr tiefgründigen Bohrung (B71) handelt es sich um eine kolluviale Braunerde.

Im Projektperimeter liegen 75% der pnG-Werte im Bereich von 35 cm bis 69 cm (ziemlich flachgründig bis mässig tiefgründig). Die tiefgründigen bis sehr tiefgründigen Böden machen rund 25% der Böden im Projektgebiet aus.

### Pflanzennutzbare Gründigkeit, n = 292

Häufigkeit

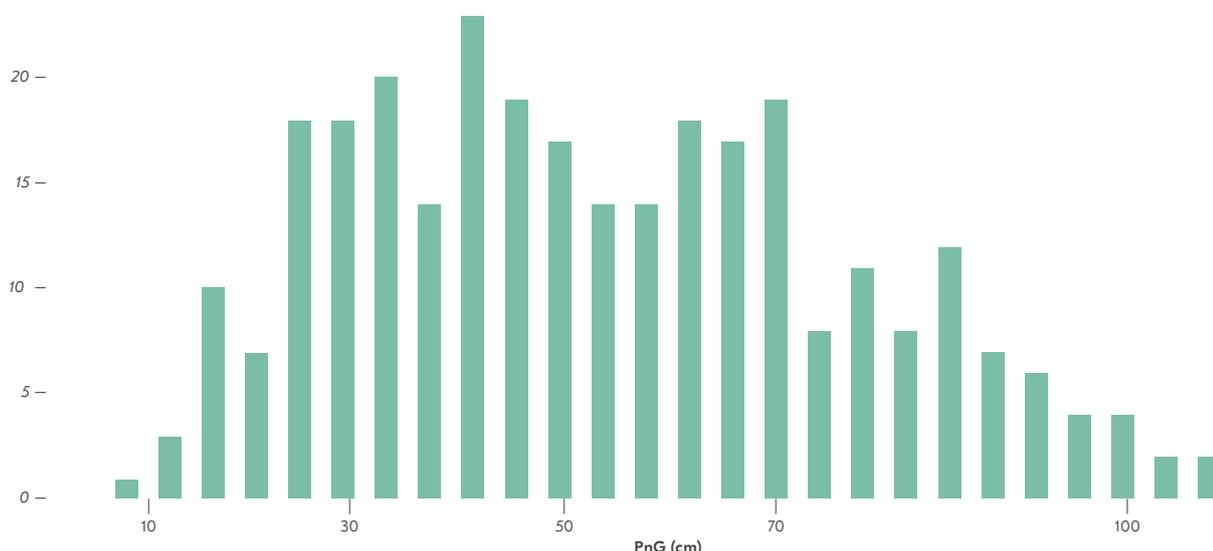


Abbildung 44: Histogramm der pflanzennutzbaren Gründigkeit (pnG) im Projektgebiet Lommis (die X-Achse gibt die Klassengrenzen der pnG an: 0–10 cm = sehr flachgründig, 10–30 cm = flachgründig, 30–50 cm = ziemlich flachgründig, 50–70 cm = mässig tiefgründig, 70–100 cm = tiefgründig, > 100 cm = sehr tiefgründig).

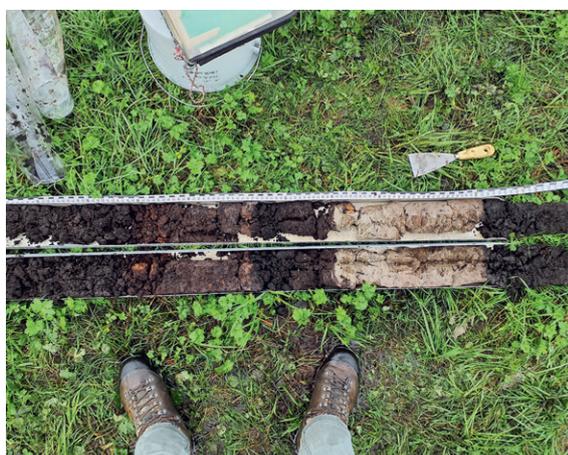


Abbildung 45: H2-Bohrung B238: sehr flachgründiges, extrem gleyiges, sehr stark grundnasses, tieftorfiges Halbmoor (pnG 9 cm, Bohrkern 120 cm).



Abbildung 46: H2-Bohrung B71: sehr tiefgründige, grundfeuchte, kolluviale, drainierte Braunerde (pnG 108 cm, Bohrkern 120 cm).

Die folgenden Tabellen 3–5 zeigen einige Lageparameter der Verteilung ausgewählter Bodeneigenschaften, die anhand von Feldschätzungen an den H1-Profilen und H2-Bohrungen bestimmt wurden. Die Wertebereiche werden separat für alle Horizonte aus dem Oberboden, dem Unterboden und dem Untergrund aufgeführt. Bei Horizonten mit einem geschätzten Humusgehalt  $\geq 10\%$  wurden keine Schätzungen der mineralischen Feinerde vorgenommen. Dies war jedoch nur in weniger als 20 Horizonten der Fall.

Attribut	Anzahl	Minimum	1. Quantil	Median	Mittelwert	3. Quantil	Maximum
Tongehalt [%]	350	3	18	21	21.7	25	48
Sandgehalt [%]	350	6	41	45	45.1	50	95
Schluffgehalt [%]	350	2	30	33	33.3	38	65
Humusgehalt [%]	356	1	3	3.8	4.7	5	82
Kiesgehalt [Vol. %]	356	0	3	5	5.5	7	25
Steingehalt [Vol. %]	322	0	0	0	0.9	1	10

Tabelle 3:  
Deskriptive Statistik des Horizontdatensatzes für alle Oberbodenhorizonte (= Bodenbereich OB). Es handelt sich ausschliesslich um Feldschätzungen.

Attribut	Anzahl	Minimum	1. Quantil	Median	Mittelwert	3. Quantil	Maximum
Tongehalt [%]	450	2	21	25	25.4	29	54
Sandgehalt [%]	450	3	37	43	41.4	48	78
Schluffgehalt [%]	450	15	28	33	33.3	38	60
Humusgehalt [%]	465	0	0.4	0.8	1.5	1.5	45
Kiesgehalt [Vol. %]	465	0	4	7	8.7	12	35
Steingehalt [Vol. %]	415	0	0	1	2.1	3	22

Tabelle 4:  
Deskriptive Statistik des Horizontdatensatzes für alle Unterbodenhorizonte (= Bodenbereich UB). Es handelt sich ausschliesslich um Feldschätzungen.

Attribut	Anzahl	Minimum	1. Quantil	Median	Mittelwert	3. Quantil	Maximum
Tongehalt [%]	403	0	14	21	21.8	28	75
Sandgehalt [%]	403	5	36.5	47	47.6	56	100
Schluffgehalt [%]	403	0	25	30	30.5	38	90
Humusgehalt [%]	416	0	0	0.1	4.4	0.5	95
Kiesgehalt [Vol. %]	418	0	1	8	12	17	70
Steingehalt [Vol. %]	385	0	0	2	4.1	6	100

Tabelle 5:  
Deskriptive Statistik des Horizontdatensatzes für alle Untergrundhorizonte (= Bodenbereich UG). Es handelt sich ausschliesslich um Feldschätzungen.

Im landwirtschaftlichen Kontext bestimmt u. a. die Bodenart die Qualität und Bearbeitbarkeit des Bodens. In Abbildung 47 sind die Horizontdaten im Körnungsdiagramm für jeden Bodenbereich dargestellt (OB = Oberboden, UB = Unterboden, UG = Untergrund). Die Körnungsklassen sind im Körnungsdreieck farblich grob nach den drei Klassen «leichte Böden» (gelb), «mittelschwere Böden» (grün) sowie «schwere Böden» (orange) eingefärbt. Ideal ist ein mittelschwerer Boden mit einem ausgewogenen Gemisch aus Sand, Schluff und Ton (grüne Klassen). Böden mit einem hohen Tongehalt sind schwierig bearbeitbar (orange Klassen). Dagegen sind Böden mit geringem Tonanteil instabil (gelbe Klassen), d. h. Bodenkrümel tendie-

ren dazu beim Aufprall von Regentropfen zu zerfallen («Verschlammung»). In Hanglage sind solche Böden somit erosionsanfällig.

In Abbildung 47 ist ersichtlich, dass die meisten Horizonte im Oberboden in der Klasse der «mittelschwere Oberböden» liegen, vereinzelt findet man vor allem im Bereich der Alluvionen im nördlichen Teil des Projektperimeters auch «schwere Oberböden». Im Unterboden verhält es sich ähnlich wie im Oberboden. Im Untergrund ist die Bandbreite der anzutreffenden Körnungsklassen hingegen deutlich grösser (Punktwolke fast über alle Körnungsklassen). Es kommen vermehrt auch Körnungen in der Klasse der «leichten Böden» vor.

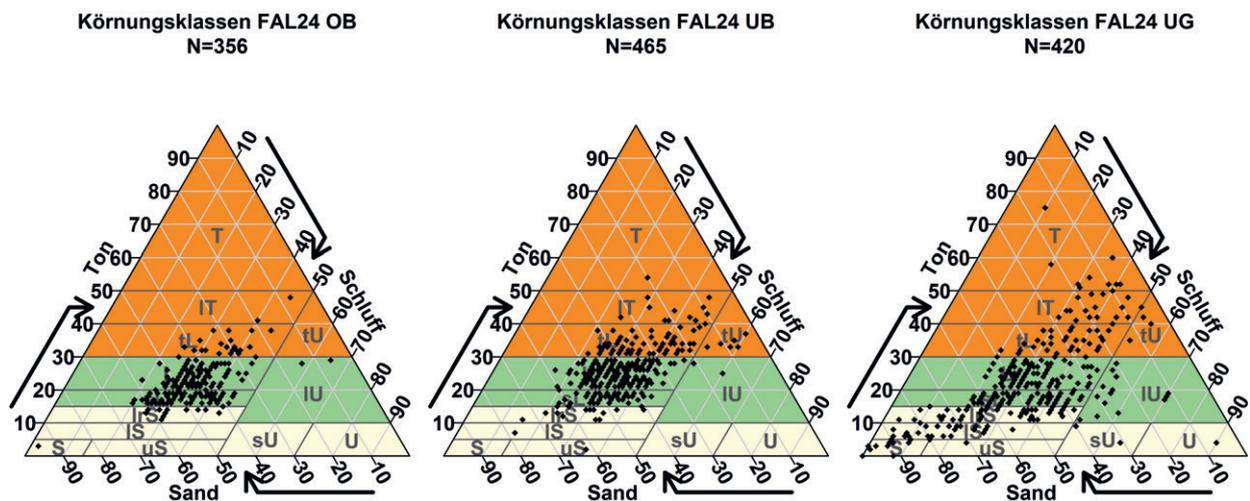


Abbildung 47: Körnungsdiagramme der Horizontdaten für die drei Bodenbereiche OB = Oberboden, UB = Unterboden, UG = Untergrund (N: Anzahl der Horizonte im jeweiligen Bodenbereich).

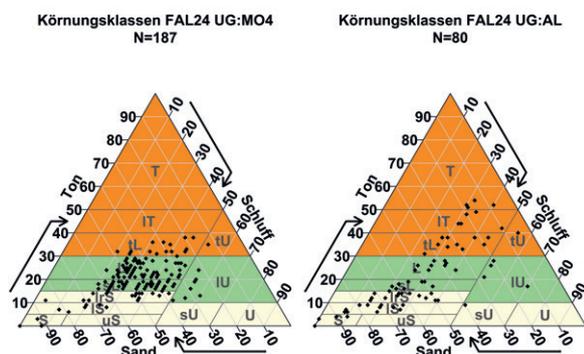


Abbildung 48: Links: Körnungsdiagramme der Horizontdaten für den Bodenbereich Untergrund in unterschiedlichen Ausgangsmaterialien. Die Anzahl der Horizonte ist in der Legende des Dreiecks mit N angegeben. Rechts: Fotoausschnitt der Bohrung B243 mit tonigem Untergrund.

## 5.4 Bohrungen für Probenahme und spektroskopische Analysen im Labor (H3-Standorte)

Die Proben der 3. Hierarchiestufe (H3) wurden entsprechend dem Beprobungskonzept mit drei Bohrungen pro Hektare für die drei Tiefenstufen 0–30 cm, 30–60 cm und 60–90 cm entnommen (Tabelle 1). Die Proben wurden im Labor aufbereitet und spektroskopisch (unter Laborbedingungen) gemessen. Aufgrund der geringen Probenmengen wurden keine Referenzanalysen an H3-Proben vorgenommen, die Referenzanalysen mit konventionellen Labormethoden wurden für Bodenproben der H2-Standorte angewendet. Die Probenentnahme wurde von der Firma bodenproben.ch mittels eines Wintex MCL3-Systems ausgeführt. Das Bohrsystem war auf einem leichten Geländefahrzeug installiert.

Das Bohrsystem ist in verschiedenen Längen verfügbar (90 cm und 200 cm). Es kann sowohl mit einem Hohlmeissel gebohrt werden (Durchmesser 35 mm) als auch mit einem PVC-Innenrohr (40 mm Durchmesser, nur 90 cm-Variante). Ausserdem kann das System auf einem Kleinfahrzeug, einem Grossfahrzeug oder einem Anhänger eingerichtet werden. Da es über einen separaten Antrieb verfügt, ist es sehr flexibel einsetzbar.



Abbildung 49:  
Bohrgerät Wintex MCL3 der Firma WintexAgro zur automatisierten Probenahme von Bodenproben.

## 6. Labor

Im Rahmen des Pilotprojekts wurden chemische, physikalische und an wenigen Standorten biologische Bodeneigenschaften bestimmt (Abbildung 50). Da sich das Boden-Versuchslabor an der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL) zum Zeitpunkt des Pilotprojekts noch im Aufbau befand, wurde die Durchführung von Bodenanalysen nach den Referenzmethoden der Agroscope an ein externes Labor vergeben. Analysiert wurden die Textur (Ton-, Schluff- und Sandgehalt), pH-CaCl<sub>2</sub>, Kalk (Kalziumkarbonat), Humusgehalt und für eine Auswahl an Bodenproben zusätzlich die Kationenaustauschkapazität (KAK). Sämtliche bodenphysikalischen und spektroskopischen Messungen wurden hingegen an der HAFL durchgeführt.

Eine Übersicht der chemisch-, physikalisch- und biologischen Bodenanalysen ist in Tabelle 6 aufgelistet. Nachfolgend wird auf einige neue bodenphysikalische Bestimmungsmethoden und ausgewählte Ergebnisse eingegangen, sowie auf die Ergebnisse der Regenwurmextraktion mit Senf-lösung an wenigen Profilstandorten. Für Details zu der Probenaufbereitung und zu den Bestimmungsmethoden (vgl. weitere Details zu den Methoden im Anhang Teil A des Schlussberichts des Kartierprojekts Diemerswil (Keller et al. 2023)) im Labor wird auf den Anhang A6 verwiesen.

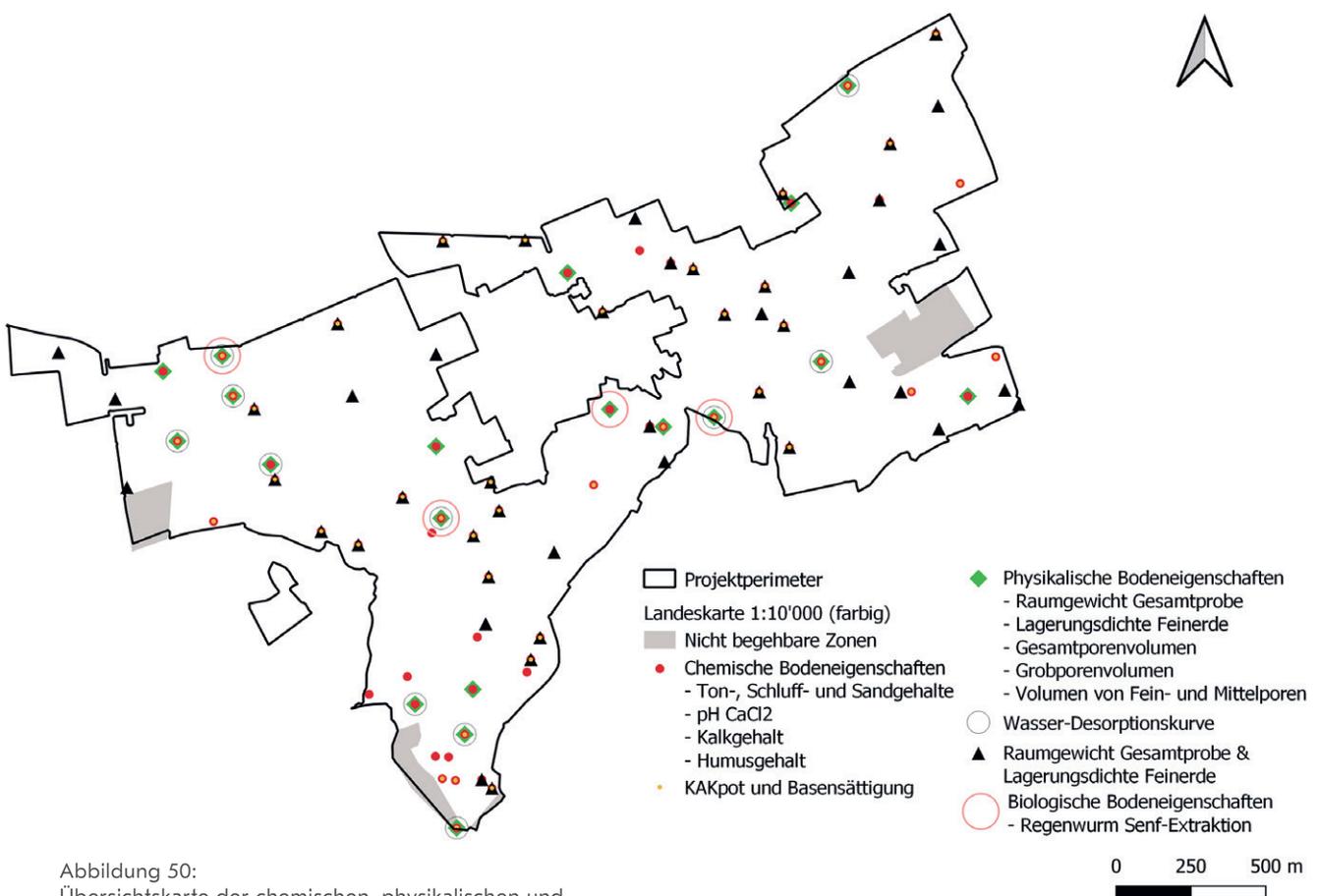


Abbildung 50: Übersichtskarte der chemischen, physikalischen und biologischen Analysen im Projektperimeter von Lommis.

	<b>Bodenprofile</b>	<b>Bohrungen mit dem Bohrfahrzeug</b>	<b>Beprobung für Spektroskopie</b>
Hierarchiestufe/Abkürzung	H1	H2	H3
# Standorte [-]	Landwirtschaft: 17 Wald: 2	Landwirtschaft: 242 Wald: 22	Landwirtschaft: 745 Wald: 66
Analysen: Chemische Bodeneigenschaften			
Referenzanalysen im Labor:	LW:	LW:	—
– Ton-, Schluffgehalt	17 Standorte	37 Standorte	
– pH CaCl <sub>2</sub>	54 Proben	107 Proben	
– Kalkgehalt	WA:	WA:	
– C <sub>org</sub>	2 Standorte	5 Standorte	
	7 Proben	13 Proben	
Referenzanalysen im Labor:	LW:	LW:	—
– KAK <sub>pot</sub>	9 Standorte	32 Standorte	
– Basensättigung BS	27 Proben	59 Proben	
Spektroskopie			
Labor mittleres Infrarot (MIR), Wellenlängen 1330 nm–16660 nm	LW:	LW:	LW:
	17 Standorte	241 Standorte	750 Standorte
	54 Proben	703 Proben	1843 Proben
	WA:	WA:	WA:
	2 Standorte	22 Standorte	66 Standorte
	7 Proben	61 Proben	161 Proben
Analysen: Physikalische Bodeneigenschaften			
Kleine Stechzylinder:	LW:	—	—
– Raumgewicht	17 Standorte		
– Lagerungsdichte Feinerde	77 Zylinder		
– Skelett	WA:		
	2 Standorte		
	10 Zylinder		
Grosse Stechzylinder:	LW:	—	—
– Wasser-Desorptionskurve	10 Standorte		
– Grobporenvolumen	56 Zylinder		
– Volumen Fein- und Mittelporen	WA:		
– Raumgewicht	2 Standorte		
– Skelett	7 Zylinder		
– Lagerungsdichte Feinerde			
Hülsen 8 cm Durchmesser:	LW:	LW:	—
– Raumgewicht	17 Standorte	46 Standorte	
– Skelett	43 Hülsen	129 Hülsen	
– Lagerungsdichte Feinerde	WA:		
	2 Standorte		
	6 Hülsen		
Analysen: Biologische Eigenschaften			
Regenwurmbiomasse mit Senf-Extraktion	LW:		
	4 Standorte		
	11 Bestimmungen		

Tabelle 6:  
Übersicht der Standorte und chemisch-,  
physikalisch- und biologischen Bodenanalysen im  
Projektgebiet Lommis.

## 6.1 Bestimmung von physikalischen Bodeneigenschaften

Bodenphysikalische Eigenschaften sind für die Erstellung von vielen Themenkarten essenziell, wie beispielsweise für Themenkarten im Bereich der Naturgefahren, Bewässerung, Wasserspeichervermögen, Hochwasserschutz oder Beurteilung des Trockenheitsrisikos (siehe Kapitel 8). Bisher wurden aus Zeit- und Kostengründen in Bodenkartierungen physikalische Bodeneigenschaften aber kaum erhoben. Neue Techniken erlauben es bodenphysikalische Eigenschaften im Labor schneller und mit einer viel höheren Präzision als bisher zu messen (Weiss et al. 2021). Parallel zu KOBO-Pilotprojekten wird daher an der Implementierung neuester Techniken zur Messung von bodenphysikalischen Eigenschaften im Labor gearbeitet. Nachfolgend wird auf neue Methoden für die Messung der Wasserretentionskurve (auch pF-Kurven genannt), der (gesättigten) hydraulischen Leitfähigkeit eingegangen, sowie Ergebnisse für die Bestimmung von Raumgewicht und Lagerungsdichte im Feld vorgestellt.

### Ermittlung der Wasserretentionskurve mit dem System KSAT-HYPROP-WP4C

An insgesamt 12 der 19 Bodenprofile wurden 63 Zylinderproben mit einem Volumen von 250 cm<sup>3</sup> für die Bestimmung des Wasserretentionsverhaltens im Labor entnommen (Tabelle 6). Je nach Heterogenität der pedologischen Horizonte wurden an bis zu 4 Zylindern pro Horizont die ungestörten Volumenproben entnommen. Im Labor wurden die bodenphysikalischen Kennwerte mit den Geräten HYPROP, WP4C und KSAT der Firma METER-Group bestimmt (Schindler et al. 2015, Peters et al. 2021, Hohenbrink et al. 2023). Das HYPROP-Gerät misst die Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserpotential in der Bodenmatrix, das WP4C-Gerät bestimmt das Wasserpotential von Bodenproben im trockenen Bereich (Abbildung 51). Anhand der Retentionskurve können wichtige bodenphysikalische Kennwerte bestimmt werden, wie beispielsweise der Anteil an Fein-, Mittel- und Grobporenvolumen oder die für Pflanzen nutzbare Wasserspeicherkapazität im Boden (auch nutzbare Feldkapazität genannt). Die Messung mit dem KSAT-Gerät basiert auf der Darcy-Gleichung und ermöglicht eine präzise Messung des Wasserflusses durch gesättigte Bodenproben (Abbildung 51).

In den HYPROP-Messeinheiten sind auf der unteren Seite des Zylinders zwei kleine unterschiedlich lange Tensiometer integriert. Diese werden minimal-invasiv in die ungestörte Zylinderprobe eingeführt. Der Gewichtsverlust über die Zeit (durch die Verdunstung des Wassers in der Bodenprobe) wird kontinuierlich mit einer Waage gemessen. Das System zeichnet die Saugspannungen der beiden Tensiometer und die Gewichtsänderung der stetig austrocknenden Probe über die Zeit auf. Dies ermöglicht im Anschluss die Berechnung von hochaufgelösten Retentionskurven für den nassen Bereich (Schindler et al. 2015, Hohenbrink et al. 2023). Da sich die beiden Tensiometer auf unterschiedlichen Höhen befinden, kann neben der Wasserretentionskurve ebenfalls die Kurve der (ungesättigten) hydraulischen Leitfähigkeit für den nassen Bereich aufgezeichnet werden (Peters et al. 2021). Die Messdaten der KSAT-Methode im gesättigten Bereich, als auch die Messdaten mit dem WP4C-Gerät im trockenen Bereich ergänzen den Wertebereich der gesamten Retentionskurve.



Abbildung 51: Ansicht der HYPROP-Geräte zur Messung der Wasserretentionskurve im «feuchten» Bereich (oben), des WP4C zur Messung im «trockenen» Bereich (unten links) sowie der KSAT-Geräte zur Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (unten rechts).

Exemplarisch sind nachfolgend für das Bodenprofil P12 (siehe Abbildung 31), eine ziemlich flachgründige und normal durchlässige Braunerde, jeweils für den  $A_{hp}$ -Horizont (Abbildung 52) und für den tiefer liegenden  $C_{\alpha g}$ -Horizont (Abbildung 53) die gemessenen Wasserretentionskurve sowie die Funktion der hydraulischen Leitfähigkeit dargestellt. Anhand der Kurve des Wassergehalts in Abhängigkeit der Saugspannung wurde das Grobporenvolumen, die Anteile der Grob-, Mittel- und Feinporen bestimmt und damit das für Pflanzen leicht bzw. schwer verfügbare Wasser im Boden abgeleitet.

Der humusreiche und gepflügte Oberboden am Standort P12 wies einen sehr hohes Grobporenvolumen von rund 65 Vol.-% auf. Das leicht pflanzenverfügbare Wasser in den groben Mittelporen ( $pF$  1.8–2.5) betrug lediglich 6 Vol.-%, das schwerer pflanzenverfügbare Wasser ( $pF$  2.5–4.2) hingegen 34 Vol.-% für diesen Horizont (Abbildung 52). Der A-Horizont am Standort P12 weist eine relativ hohe nutzbare Feldkapazität (Bereich  $pF$  1.8–4.2) von 40.5 Vol.-% auf. Dies war mit 37 Vol.-% auch für den tiefer liegenden  $C_{\alpha g}$ -Horizont der Fall.

Damit verfügt die Braunerde an dem Standort P12 über eine hohe Wasserspeicherkapazität für Pflanzen. Die Wasserleitfähigkeit in diesem Bodenprofil ist im A-Horizont bei nahezu gesättigten Verhältnissen ( $pF < 0.5$ ) mit rund 30 cm/d im normalen Bereich, während im C-Horizont die Wasserleitfähigkeit bei gesättigten Verhältnissen gehemmt bis stark gehemmt ist (hydraulische Leitfähigkeit im Bereich 0.3–0.01 cm/d). Für insgesamt 63 Zylinderproben wurde die bodenphysikalischen Eigenschaften bestimmt. Die Auswertung aller Zylinderproben von dem Projekt Lommis ist im Rahmen einer projektübergreifenden Auswertung der gemessenen bodenphysikalischen Eigenschaften für alle bisher durchgeführten Pilotprojekte bis Ende 2025 geplant.

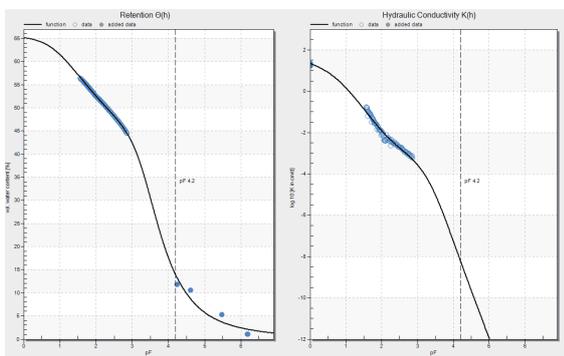


Abbildung 52: Wasserretentionskurve (links) und hydraulische Leitfähigkeit (rechts) für den  $A_{hp}$ -Horizont von Bodenprofil 12 (Tiefe Zylinder 12–17 cm). Der  $pF$ -Wert ist der dekadische Logarithmus der Saugspannung in hPa. Messpunkte im gesättigten Bereich ( $pF < 0.1$ ) stammen vom KSAT-System, im feuchten Bereich ( $pF$  1–3.5) vom System HYPROP und im trockenen Bereich ( $pF > 4$ ) vom System WP4C.

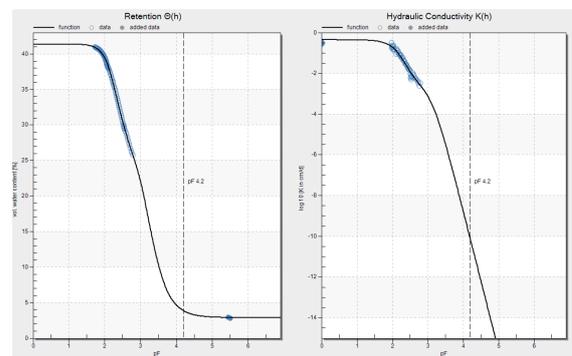


Abbildung 53: Wasserretentionskurve (links) und hydraulische Leitfähigkeit (rechts) für den  $C_{\alpha g}$ -Horizont von Bodenprofil 12 (Tiefe Zylinder 60–65 cm). Der  $pF$ -Wert ist der dekadische Logarithmus der Saugspannung in hPa. Messpunkte im gesättigten Bereich ( $pF < 0.1$ ) stammen vom KSAT-System, im feuchten Bereich ( $pF$  1–3.5) vom System HYPROP und im trockenen Bereich ( $pF > 4$ ) vom System WP4C.

### Raumgewicht und Lagerungsdichte

Die Dichte eines Bodens in natürlicher Lagerung einschliesslich dem Porenvolumen wird als Raumgewicht ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) angegeben. Zur Berechnung des Raumgewichtes eines Bodens wird eine bestimmte Bodenmenge mit klar definiertem Volumen entnommen und anschliessend bei  $105^\circ\text{C}$  getrocknet und gewogen, sowie der Skelettanteil der Probe bestimmt. Die Definitionen des Raumgewichtes (RG) und der Lagerungsdichte (LD) ist in Tabelle 7 aufgeführt. Diese sind konsistent mit den Methoden der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) (Schwab und Gubler 2016).

Je nach Fragestellung kann das Raumgewicht der Gesamtprobe (RGGP) oder die Lagerungsdichte der Feinerde (LDFE) relevant sein. In der Bodenmechanik ist die Ermittlung des Raumgewichtes z.B. von Bedeutung, wenn man die Gefahr von Bodenrutschungen an Hängen bzw. die Scherfestigkeit von Böden am Hang ermitteln will. Dabei wird auch der Wassergehalt des Bodens in die Berechnungen miteinbezogen. Aus der Lagerungsdichte können das Porenvolumen, die Porenziffer und der volumetrische Wasseranteil berechnet werden, zudem ist sie ein wichtiger Aspekt für die Durchwurzelbarkeit des Bodens. Die Lagerungsdichte ist auch für die Berechnung von Vorräten im Boden, wie beispielsweise für Kohlenstoff und Nährstoffe, erforderlich.

Erhebung	Probe	Bearbeitung	Berechnung
Raumgewicht (RGGP)	Gesamtprobe	Trocknen $105^\circ\text{C}$	$\text{TS}(\text{G})/\text{V}(\text{G})$
Skelettgehalt	Skelett	Nasssieben 2 mm Trocknen $105^\circ\text{C}$	$\text{TS}(\text{S})/\text{V}(\text{G})$
Lagerungsdichte (LDFE)	Feinerde	Trocknen $105^\circ\text{C}$ Sieben 2 mm	$\text{TS}(\text{G}) - \text{T S}(\text{S})/\text{V}(\text{G}) - \text{V}(\text{S})$

Tabelle 7: Definition und Berechnung Raumgewicht (RG), Skelettgehalt (S) und Lagerungsdichte (LD). (V: Volumen; G: gesamte Probe; TS: Trockengewicht der Probe).

Je höher der Skelettgehalt im Boden, desto ungenauer wird die Messung des Raumgewichtes und der Lagerungsdichte. In skelettreichen Böden ist oftmals eine Probenahme mittels Zylinder oder Hülsen nicht möglich, für solche Böden ist es bisher kaum möglich ohne grösseren Aufwand das Raumgewicht und die Lagerungsdichte quantitativ zu bestimmen. Im Projektgebiet Lommis wurden mit dem Bohrfahrzeug an 19 Profilen und an 46 H2-Standorten insgesamt 178 Volumenproben mittels Hülsen (Durchmesser 5 cm und 8 cm) entnommen, um das Raumgewicht sowie die Lagerungsdichte Feinerde und der Skelettgehalt zu bestimmen. Die Hülsen wurden entsprechend den pedologischen Horizonten entnommen. Im Anschluss wurden die Bohrkern im Labor zunächst bei  $105^\circ\text{C}$  getrocknet und nach dem Wägen nassgesiebt. Zudem wurden an Profilen und an ausgewählten H2-Standorten Stechzylinder aus den gleichen Horizonten wie die Hülsenproben entnommen. Für Details der Probenahme wird auf den Anhang A6 verwiesen.

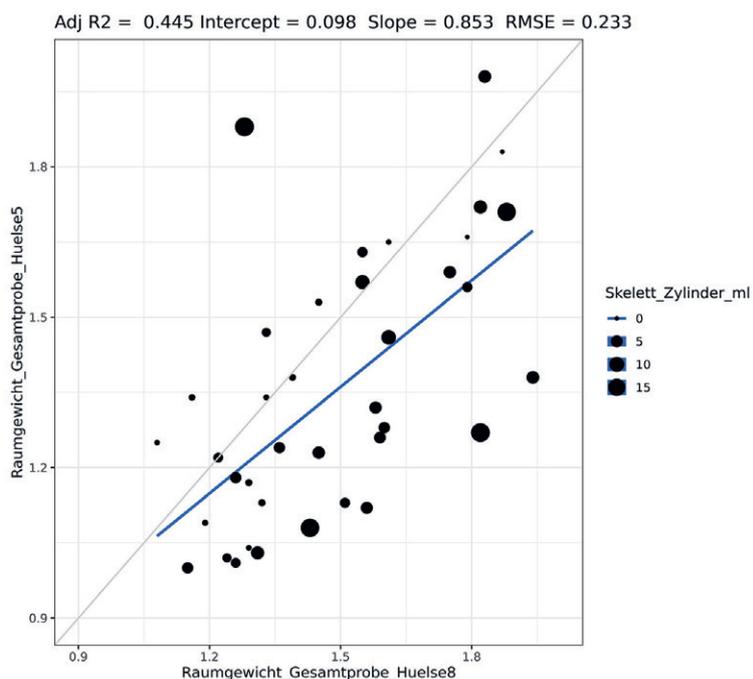


Abbildung 54: Direktvergleich Raumgewicht Hülsenproben mit 5 cm und 8 cm Durchmesser.

Im Vergleich zwischen den Messwerten der 100 ml-Zylinderproben und der Hülsen mit 5 cm und 8 cm Durchmesser waren Raumgewicht und Lagerungsdichte wie erwartet mit den Hülsen systematisch höher als die entsprechenden Zylinderproben. Diese Überschätzung der Werte ist in mehreren Versuchsreihen in der Nationalen Bodenbeobachtung untersucht und dokumentiert (Schwab und Gubler 2016). Der Bohrprozess für die Beprobung mit Hülsen verursacht, dass an der Bohrkronen zu viel Feinerde in die Hülse gelangt. Auf das Volumen bezogen errechnet sich im Durchschnitt somit eine höhere Bodenmasse in den 5 cm und 8 cm Hülsen als in den 100 ml Zylindern, wobei die Werte mit den 8 cm Hülsen eine bessere Korrelation mit den Werten der 100 ml Zylindern zeigten als diejenigen der 5 cm Hülsen. Der systematische Fehler kann durch einen Faktor korrigiert werden (Abbildung 55).

Mittels der einfachen linearen Regression durch den Ursprung wurde ein Korrekturfaktor von 1.165 für das Bodenvolumen der 8 cm Hülsenproben bestimmt. Sämtliche Messwerte für das Raumgewicht und die Lagerungsdichte der 178 Volumenproben an den 19 Profilen und den 46 H2-Standorten wurden mit diesem Faktor korrigiert und für die nachfolgende räumliche Modellierung verwendet (siehe Kapitel 7).

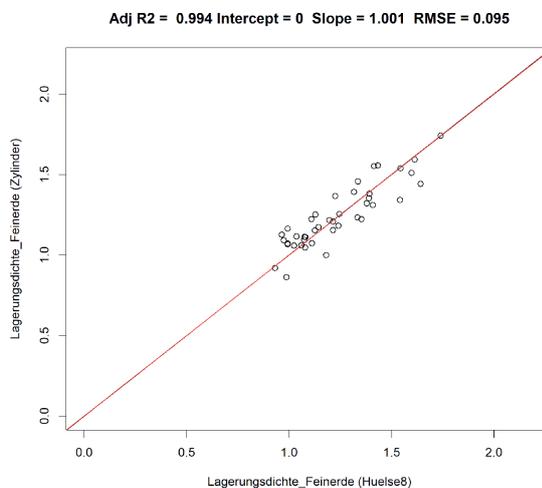
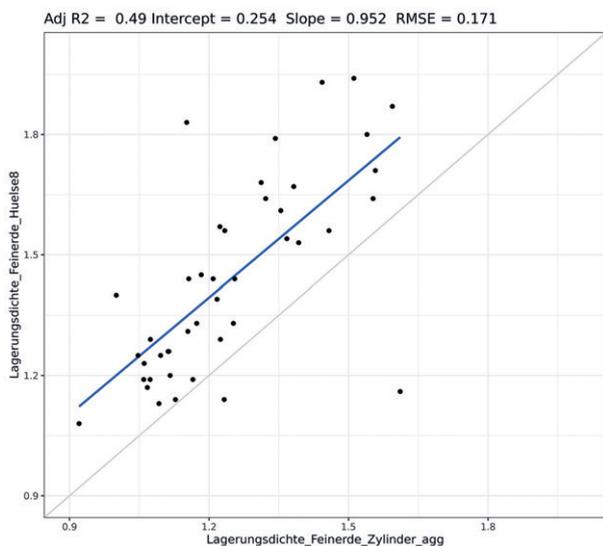


Abbildung 55:  
 Vergleich der Lagerungsdichte Feinerde bestimmt mit 8 cm Hülsen und 100 ml Zylinderproben (links);  
 Korrigierte Lagerungsdichte der 8 cm Hülsenproben und Lagerungsdichte bestimmt mit 100 ml Zylinderproben (Korrekturfaktor: 1.165).

## 6.2 Regenwurmbiomasse

Regenwürmer gehören zur Makrofauna und spielen eine wichtige Rolle bei der Zersetzung toter Pflanzenreste, der Erhöhung des Gehalts an organischer Substanz und der Anreicherung von Nährstoffen, der Verbesserung der Aggregatstabilität, der Belüftung des Bodens und der Anregung der mikrobiellen Aktivität (Campiche 2022). In der Schweiz kommen rund 40 Arten vor. Diese lassen sich durch ihr Verhalten und ihre Nahrungswahl in drei ökologische Gruppen einteilen (epigäische, endogäische und anözische Regenwürmer). Die Bedeutung der Regenwürmer für unterschiedliche Bodenfunktionen hängt stark mit diesen unterschiedlichen Gruppen zusammen. Häufig werden Regenwürmer als biologische Indikatoren für das Monitoring und die Beurteilung der Bodenqualität sowie für die Bewertung der Biodiversität eingesetzt (Hug et al. 2012).

In Lommis wurden an vier Profilstandorten (zwei Grasland- und zwei Ackerstandorte) je eine Regenwurmextraktion mit Senflösung nach der Methode von Lawrence and Bowers (2002) und Campiche (2022) durchgeführt. Es wurden jeweils pro Standort drei Wiederholungen beprobt. Diese Methode wurde gewählt, weil der materielle Aufwand, verglichen mit molekularbiologischen

Methoden, gering ist und die Methode auch mit wenig Vorwissen und Übung angewandt werden kann. Das genaue Vorgehen ist im Anhang A6 beschrieben. Abbildung 56 zeigt die Ergebnisse der Biomassebestimmung der Regenwürmer an den vier Standorten, Abbildung 57 die Verteilung der ökologischen Gruppen.

Auffällig ist die erhöhte Gesamtmasse der Würmer in den Graslandstandorten (Profil Nr. 4 und 8), als auch die höhere Anzahl an anözische Individuen für diese Standorte. Bei der Verteilung von Adulten und Juvenilen Regenwürmern war keine eindeutige Tendenz zu erkennen. Als Referenz für die Regenwurmbiomasse in Grasslandböden kann die nationale Untersuchung von Cuendet et al. (1997) herangezogen werden. Die in Lommis bestimmten Werte für die Regenwurmbiomasse liegen im Bereich der Vergleichswerte von Cuendet et al. (1997) für Grasslandböden (250 bis 400 g/m<sup>2</sup> Interquartil-Bereich). Für weiterführende Informationen zur Bodenbiologie wird auf die Nationale Bodenbeobachtung (NABO) an der Agroscope in Zürich verwiesen, die seit 2012 ein Monitoring von bodenbiologischen Eigenschaften an 30 Standorten in der Schweiz durchführt (Hug et al. 2018; Hug et al. 2021).

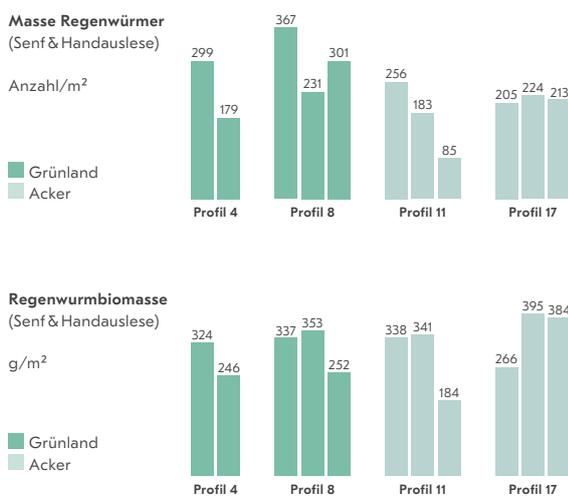


Abbildung 56: Regenwurmbiomasse an den Standorten der Profile 4, 8, 11 und 17. Dargestellt werden jeweils die Summen aus Senfextraktion und Handauslese für drei Wiederholungen pro Profil (für Profil 4 fehlt eine Handauslese, weshalb nur zwei Wiederholungen dargestellt sind). Oben: Gesamtgewicht aller Würmer in g/m<sup>2</sup>. Unten: Gesamtanzahl der Würmer.

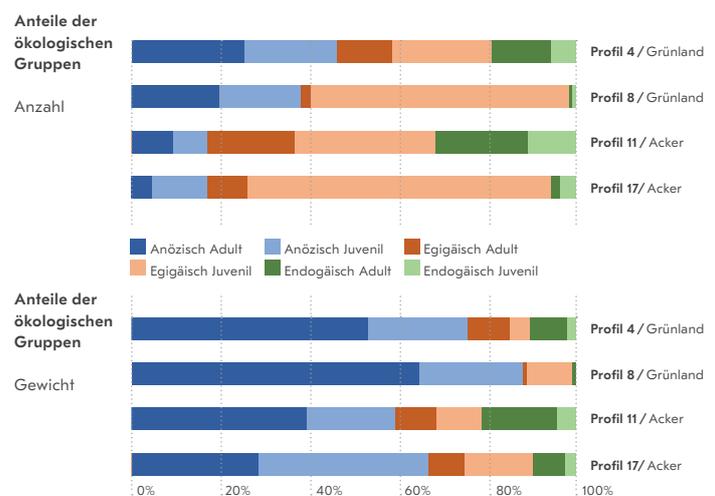


Abbildung 57: Verteilung der ökologischen Gruppen der Regenwürmer pro Profil, differenziert nach Anzahl (oben) und Gewicht (unten). Es wurde jeweils die Summe aus der Senfextraktion und der Handauslese von drei Wiederholungen gemittelt (bei Profil 4 mit 2 Wiederholungen).

---

## 6.3 Messung der MIR-Spektren im Labor

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. Im Projekt Lommis wurden insgesamt 2829 Proben von den Profilen (H1) und Bohrungen (H2 und H3-Standorte) spektroskopisch gemessen (Tabelle 6). Diese wurden anhand von 181 Referenzanalysen für die oben genannten Bodeneigenschaften kalibriert.

Im Labor wurden hierzu die gemahlten Bodenproben in jeweils vier Wiederholungen gemessen. Für die Messung der Spektren im mittleren Infrarotbereich (MIR) mit Wellenlängen im Bereich von 1330 nm bis 16 660 nm wurde ein Bruker INVENIO mit einem High-Throughput Modul (HTS-XT) verwendet.

## 7. Kartenerstellung

In diesem Arbeitsschritt der Bodenkartierung werden die am Punkt erhobenen Bodeninformationen in die Fläche interpoliert und sowohl Rasterkarten als auch Polygonkarten erstellt. Im Ablauf der Bodenkartierung im Pilotprojekt Lommis ist die Kartenerstellung eng mit den vorangehenden Arbeitsschritten der Aufbereitung der Umwelt- und Geodaten (Kovariablen) und mit der Erstellung des Beprobungskonzepts verbunden. Zudem werden in diesem Arbeitsschritt der Bodenkartie-

rung datenwissenschaftlich-methodische Ansätze zur Auswertung der Spektroskopie und zur räumlichen Modellierung von Bodeneigenschaften und -kennwerten eingesetzt. Im KOBO-Pilotprojekt in Lommis wurden diese zur Regionalisierung von Bodeneigenschaften und -kennwerten angewendet und optimiert. Das Datenmanagement und die Qualitätssicherung der Bodendaten erstreckt sich über alle Arbeitsschritte der Bodenkartierung hinweg.

---

### 7.1 Datenmanagement

Analog zu dem ersten KOBO-Pilotprojekt in Diemerswil wurde zur Datenerfassung im Feld die Web-Applikation Soildat genutzt, die fortlaufend am KOBO weiterentwickelt wird. Soildat steht den Kantonen und Ingenieurbüros zur Verfügung, Anleitungen und Einführungen finden sich auf der KOBO-Webseite ([www.ccsols.ch](http://www.ccsols.ch)). Für die Probenlogistik in Feld und Labor wurden konsequent QR-Codes in allen Arbeitsabläufen genutzt. Die Spektraldaten aus dem Labor werden über eine neu entwickelte Schnittstelle für das Bruker-INVENIO Gerät in einer Datenbank abgelegt. Somit stehen alle für die spektroskopische und räumliche Modellierung relevanten Feld- und Labordaten für die weitere Verarbeitung über eine einheitliche Datenbankschnittstelle zur Verfügung.

Mit Abschluss des Projekts kann der Transfer der homogen erfassten Daten ohne grossen Aufarbeitungsaufwand in NABODAT erfolgen, so dass diese den kantonalen und nationalen Fachstellen Bodenschutz zeitnah zur Einsicht und Weiterbearbeitung im Nationalen Bodeninformationssystem NABODAT zur Verfügung stehen. Zudem werden alle Produkte der KOBO-Pilotprojekte in Form von Raster- und Polygonkarten den kantonalen GIS-Fachämtern zur Verfügung gestellt. Für die Bereitstellung aller frei verfügbaren Bodendaten in der Schweiz ist zudem bis Ende 2025 der Aufbau eines öffentlichen Webportals geplant. Das Webportal soll zukünftig als zentrale Informations- und Serviceplattform für Bodeninformationen dienen. Das Webportal wird aus einem Produkte-Portal für die Bereitstellung von Metadaten, Dokumentationen, Skripte und Methoden und einem Web-GIS für die Bereitstellung von Punktdaten, Polygon- und Rasterkarten bestehen. Die Plattform soll nicht nur Ingenieurbüros, Kantonen und Bundesämtern sondern auch für die Öffentlichkeit verfügbar sein.

## 7.2 Auswertung der MIR-Spektren

Wie oben erwähnt werden die gemessenen chemischen Referenzanalysen mit den an diesem Proben ebenfalls gemessenen Spektren korreliert und daraus Kalibrierungsmodelle erstellt. Anhand dieser Modelle werden die gemessenen Bodeneigenschaften auf alle Bodenproben der H3-Standorte übertragen. Die Prozessierung der MIR-Spektren erfolgte über eine Gauss'sche Pyramide und die erste Ableitung der Spektren (Behrens et al. 2022). Für die spektrale Modellierung wurde ein Stacking von Basislernern über ein glm-Modell in R (R Core Team, 2024a,b) erstellt. Als Basislerner wurden Cubist (Quinlan, 1992; Kuhn, 2023), extreme gradient boosting (Yuan, 2024), bagged multivariate adaptive regression splines (Friedman, 1991; Kuhn, 2023; Milborrow, 2024) und radial basis

function support vector machines (Karatzoglou et al., 2024) verwendet. Die Optimierung basiert auf den R-Paketen caret (Kuhn, 2023) und caret Ensemble (Deane-Mayer, 2023). Alle Modelle wurden mittels  $5 \times 10$ -facher Kreuzvalidierung evaluiert. Abbildung 58 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung. Im Mittel liegt die erklärte Varianz der Kreuzvalidierten Modelle bei einem Bestimmtheitsmass  $R^2$  von 0.86 und zeigt damit eine sehr hohe Güte der Kalibrierung. Die hohen Bestimmtheitsmasse lassen sich unter anderem auf die Weiterentwicklung der Qualitätssicherung im Labor zurückführen (z. B. Protokolle für Probenaufbereitung, Mahlen und Probenlogistik mit QR-Codes, vierfache MIR-Messung der Einzelproben und Ausreisseranalysen).

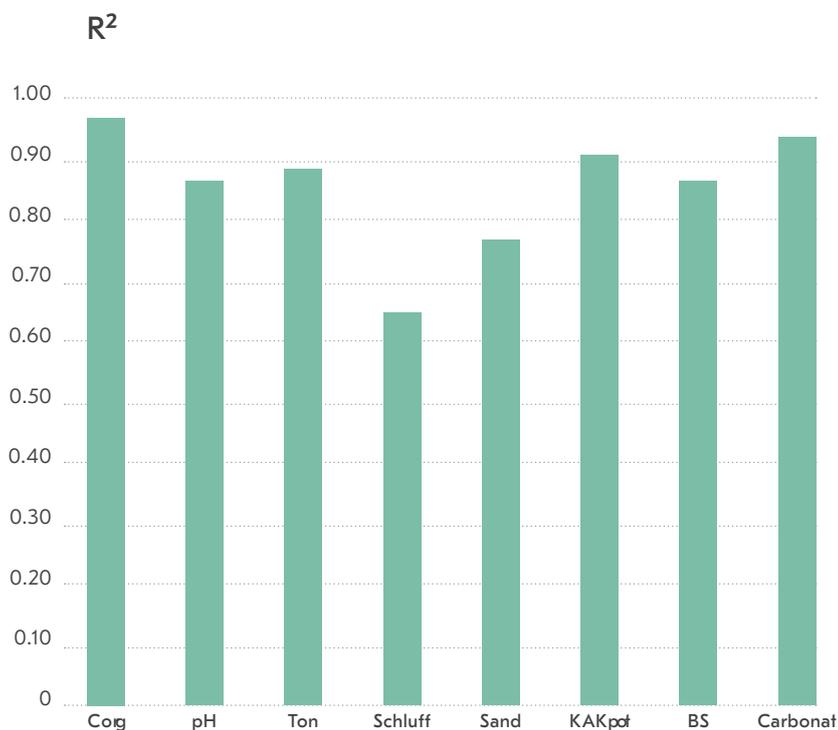


Abbildung 58: Qualität der Kalibrierungsmodelle der MIR-Spektren auf die mit Referenzanalysen gemessenen Bodeneigenschaften. Dargestellt sind die Kreuzvalidierungsgüten der spektralen Modelle.

## 7.3 Karten für Bodeneigenschaften

Mit der räumlichen Modellierung bzw. Regionalisierung der am Punkt erhobenen Bodendaten lassen sich Raster- und Polygonkarten für Bodeneigenschaften und -kennwerte generieren. Hierzu kommen mathematisch-statistische Methoden aus dem Bereich der Pedometrie zum Einsatz (McBratney et al. 2003; Behrens et al. 2017). Dies umfasst unter anderem geostatistische Methoden, Regressions- und Klassifikationsansätze sowie Verfahren aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (Maschinelles Lernen). Kernziel der räumlichen Modellierung ist es, die räumliche Beziehungen zwischen den am Punkt gemessenen Bodeneigenschaften und Kovariablen quantitativ abzubilden. Konzeptionell orientiert sich die Vorgehensweise an dem Zustands-Faktoren-Modell von Jenny (1941), d. h. die vorhergesagte Bodeneigenschaft wird als eine Funktion aus den Faktoren (Kovariablen) Boden, Klima, Vegetation und Landnutzung, Relief, Ausgangsmaterial, Zeit und Raum quantitativ berechnet. In der Literatur finden sich zahlreiche Fallstudien und Varianten der digitalen Kartierung von Bodeneigenschaften (z. B. Behrens et al. 2017, 2018; Chen et al. 2022).

Tabelle 8 gibt eine Übersicht der modellierten Bodeneigenschaftskarten. Alle Karten für die verschiedenen Tiefenstufen sind in Anhang A7 zu

finden. Für 12 Bodeneigenschaften für jeweils drei Tiefenstufen resultieren 36 Karten für Bodeneigenschaften. Die räumliche Variation für jede Bodeneigenschaft und Tiefenstufe kann somit individuell dargestellt und genutzt werden. Die Modellgüten für die Karten der Bodeneigenschaften waren durchwegs gut und lagen im Schnitt bei einem Bestimmtheitsmass ( $R^2$ ) von 0.6. Es wird vermutet, dass der starke anthropogene Einfluss im Projektgebiet teilweise limitierend war auf die Güte der Modellierung.

Die räumliche Modellierung der Bodeneigenschaftskarten erfolgt für die 12 Bodeneigenschaften in mehreren iterativen Stufen. Schrittweise werden dazu aufeinander aufbauende Modelldurchläufe berechnet. Für jede Bodeneigenschaft werden dabei zu Beginn separate Ausreisseranalysen durchgeführt und die Ergebnisse anschließend statistisch und pedologisch bewertet. Nach einem ersten Gesamtscreening wird danach entschieden, ob gegebenenfalls die verwendeten Kovariablen angepasst werden müssen. Dies basiert wiederum auf einer pedologischen und statistischen Analyse der Ergebnisse. Im Projekt Lommis wurden für das Projektgebiet für die räumliche Modellierung mehr als 600 Kovariablen verwendet (siehe Kapitel 3). Die Modellierungsauflösung lag bei  $2 \times 2$  m.

Bodeneigenschaften	Einheit	Tiefenstufen
Tongehalt	Massen-%	0–30, 30–60, 60–90 cm
Schluffgehalt	Massen-%	0–30, 30–60, 60–90 cm
Sandgehalt	Massen-%	0–30, 30–60, 60–90 cm
Skelettgehalt	Volumen-%	0–30, 30–60, 60–90 cm
Kalkgehalt	Massen-%	0–30, 30–60, 60–90 cm
Gehalt an organischem Kohlenstoff (C <sub>org</sub> )	Massen-%	0–30, 30–60, 60–90 cm
Humusgehalt	Massen-%	0–30, 30–60, 60–90 cm
pH-Werte (CaCl <sub>2</sub> )	–	0–30, 30–60, 60–90 cm
Raumgewicht der Gesamtprobe	g/cm <sup>3</sup>	0–30, 30–60, 60–90 cm
Lagerungsdichte der Feinerde	g/cm <sup>3</sup>	0–30, 30–60, 60–90 cm
Basensättigung	%	0–30, 30–60, 60–90 cm
Potenzielle Kationenaustauschkapazität (KAK <sub>pot</sub> )	cmolc/100 g	0–30, 30–60, 60–90 cm

Tabelle 8:  
Liste der Karten für Bodeneigenschaften im  
Projekt Lommis. Alle Karten finden sich im Anhang A7.

In einem weiteren Schritt wird anschliessend eine Korrektur der Koordinaten vorgenommen, was durch Daten- und GPS-Ungenauigkeiten indiziert sein kann (Random-Corruption-Analyse, Grimm und Behrens, 2010). Dabei wurde ein kleiner räumlicher Radius von zwei Pixeln verwendet. Danach erfolgt wiederum eine pedologische und statistische Bewertung. Nach einem erfolgreichen ersten Gesamtdurchlauf der Modelle, Analysen und Korrekturen, wird die Güte der verschiedenen Modelle für eine Bodeneigenschaft verglichen. Hierbei wird insbesondere auf den Tiefengradienten geachtet, da mit zunehmender Tiefe die Stichprobendichte und somit auch die Modellgüte oftmals abnimmt. Letzteres ist dem Umstand geschuldet, dass die gewünschte Bohrtiefe wegen dem Skelettgehalt oder aus anderen Gründen nicht immer erreicht werden kann.

In einem weiteren Schritt wird über eine Transferfunktion versucht die Modelle für diejenigen Bodeneigenschaften zu verbessern, die eine geringere Modellgüte aufweisen. Beispielsweise können für die räumliche Modellierung der Lagerungsdichte die Humusgehalte und die Tongehalte als Eingangsgrössen einfließen. Auf diese Art und Weise werden für die Modellierung einer Bodeneigenschaft bereits gewonnene Informationen hinzugezogen. Die Berechnungen basieren jeweils auf sechs unterschiedlichen Verfahren des Maschinellen Lernens (ML), die für jede Bodeneigenschaft in jeder Tiefenstufe separat angewendet und im Anschluss zu einem Gesamtergebnis zusammengefasst werden. Für die Analyse wurde die gleiche Kreuzvalidierung und die gleichen Basis-Learner wie im KOBO-Pilotprojekt in Diemerswil (Keller et al. 2023) angewandt und zusätzlich um die Methode Random Forest ergänzt (Breiman, 2001; Grimm et al., 2008; Liaw, 2022).

Durch die vielen iterativen Schritte, die vielen Modellverfahren, die hohe räumliche Auflösung der Rasterdaten von  $2 \times 2$  m und aufgrund der vielen Kovariablen ist die räumliche Modellierung relativ zeitaufwendig. Ein kompletter Durchlauf für die Modellierung von 12 Bodeneigenschaften für 3 Tiefenstufen für ein Gebiet von mehreren Hundert Hektaren kann mehrere Wochen bis zu zwei Monate in Anspruch nehmen. Diese Vorgehensweise ist insgesamt wesentlich aufwendiger als eine Modellierung einzelner Bodeneigenschaften mit einem einzelnen Verfahren des Maschinellen

Lernens und erfordert die Modellierung von vielen Vorversionen einer Karte für eine einzelne Bodeneigenschaft. Der Mehrwert dieser Vorgehensweise liegt aber in der Qualität der Karten für Bodeneigenschaften, die eine vielfach bessere Güte aufweisen und untereinander abgestimmt und konsistent sind. Zudem ist dieser Arbeitsschritt leicht skalierbar. Für grössere Gebiete ist der Zeitaufwand kaum grösser, es werden lediglich mehr Rechenkapazitäten benötigt.

### **Ton- und Schluffgehalte**

Der Ton- und Schluffgehalt beeinflussen massgeblich den Luft-, Wärme- und Wasserhaushalt im Boden. Die Gehalte variieren in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial der Bodenbildung. Die Tongehalte liegen im Projektgebiet Lommis überwiegend zwischen 10–25%, daher handelt es sich hier um leichte bis schwere Oberböden. Für einzelne Teilgebieten im Westen und Norden sind auch Tongehalte zwischen 30–45% anzutreffen. Die mittleren Tongehalte in den Unterböden und im Untergrund (vgl. Abbildung 59) sind vergleichbar mit den Oberböden. Allerdings ist der Wertebereich breiter, da Ton in senkrecht durchwaschen Böden zum Teil nach unten verlagert wird, und auch die Ausgangsmaterialien im Unterboden stärker variieren. Die Schluffgehalte weisen im Oberboden mit Gehalten zwischen 30–40% eine geringere horizontale Variation auf als mit der Tiefe. Für die Tiefenstufe 60–90 cm liegen die Schluffgehalte im südlichen Projektperimeter bei rund 30–50% (siehe Anhang A7).

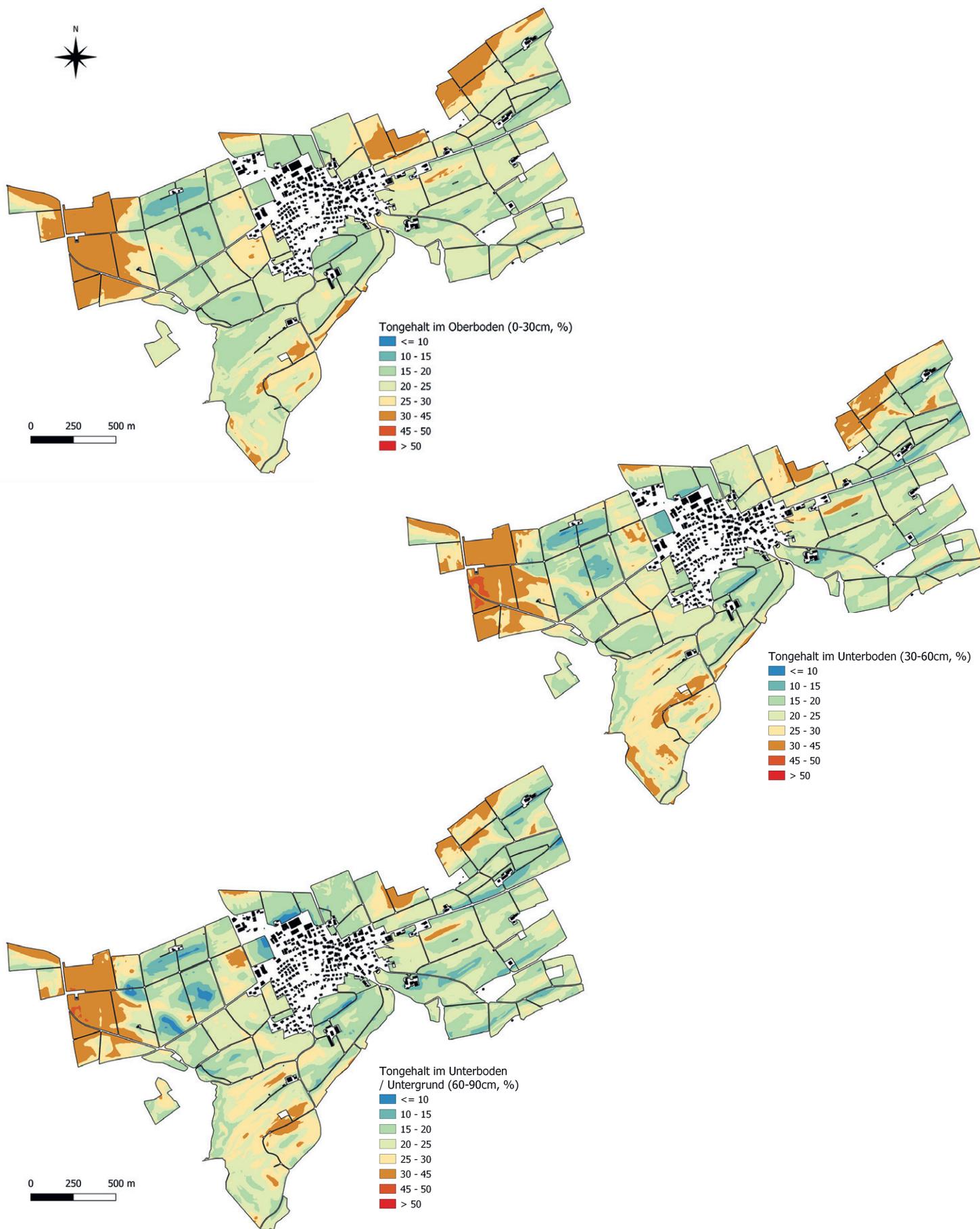


Abbildung 59:  
Regionalisierte Karte der Tongehalte für 3 Tiefenstufen:  
0–30 cm, 30–60 cm, 60–90 cm Tiefe.

### Gehalt an organischem Kohlenstoff (C<sub>org</sub>)

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff in Böden ist eine zentrale Bodeneigenschaft und beeinflusst viele Funktionen des Bodens, insbesondere den Stoff- und Wasserhaushalt sowie die biologische Aktivität. Im Labor wird C<sub>org</sub> gemessen und für die Angabe als Humusgehalt (bei mineralischen Böden) mit dem Faktor 1.725 multipliziert. Im Bereich des Halbmoors finden sich teils noch unzersetzte Torfe, daher liegen die C<sub>org</sub>-Gehalte dort teilweise über 15%. Im Grünland und den feuchteren Senkenlagen ist mehr organischer Kohlenstoff gespeichert (3–6%) als im Ackerland, wo insbesondere in erosionsanfälligen Kuppenlagen geringe C<sub>org</sub>-Gehalte zu verzeichnen sind (0.5–2%; Abbildung 60). Mit zunehmender Tiefe (Abbildung 60) nehmen die C<sub>org</sub>-Gehalte deutlich ab. Nur in den feuchteren Senken ist auch in tieferen Bodenbereichen mehr organischer Kohlenstoff vorhanden. Im über 1 m mächtigen Halbmoor ist der C<sub>org</sub>-Gehalte durchgehend sehr hoch, im Oberboden durch mineralische Überdeckung etwas geringer.

### pH-Wert

Der pH-Wert zeigt den Säuregehalt im Boden und bestimmt unter anderem die Nährstoffverfügbarkeit in Böden. In Ackerböden liegt er in Verbindung mit der Erhaltungskalkung mehrheitlich im neutral-basischen bis schwach-sauren Bereich (pH 5.5–7); im Grünland sind die pH-Werte nahe am natürlichen Zustand (pH 5–5.5). Die Böden im Wald sind durch niedrige pH-Werte gekennzeichnet. Im Unterboden und im Untergrund ist der Effekt der Landnutzung weniger deutlich sichtbar: es herrschen in Kuppen- und Hanglagen gleichmäßig saure Bedingungen vor. Im Wald nimmt der pH-Wert in der Regel mit der Bodentiefe zu, was jedoch von Standort zu Standort unterschiedlich sein kann (Abbildung 61).

### Kationenaustauschkapazität (KAK)

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) ist ein Mass für die Fähigkeit eines Bodens, Kationen (positiv geladene Ionen) zu binden und auszutauschen. Diese Eigenschaft ist entscheidend für die Bodenfruchtbarkeit, da sie die Verfügbarkeit von Nährstoffen wie Kalium (K<sup>+</sup>), Magnesium (Mg<sup>2+</sup>), Calcium (Ca<sup>2+</sup>) und Natrium (Na<sup>+</sup>) beeinflusst. Ein Boden mit hoher KAK kann mehr Nährstoffe speichern und sie den Pflanzenwurzeln zugänglich machen. Die KAK hängt von der Art und Menge der Tonminerale sowie vom Gehalt an organischer Subs-

tanz im Boden ab. Böden mit hohem Anteil an Tonmineralen und organischer Substanz weisen in der Regel eine höhere KAK auf. Dies trägt zur Verbesserung der Nährstoffversorgung und des Wasserhaltevermögens des Bodens bei. Im Projektperimeter Lommis liegen die KAK-Werte im Oberboden mehrheitlich im Bereich von 100–200 mmol/kg, im Bereich des ehemaligen Halbmoors teilweise über 300 mmol/kg (Abbildung 62). In der Tiefenstufe 60–90 cm nehmen die mittleren KAK-Werte deutlich ab.

### Basensättigung

Die Basensättigung ist der Anteil der KAK, der durch basische Kationen wie Calcium (Ca<sup>2+</sup>), Magnesium (Mg<sup>2+</sup>), Kalium (K<sup>+</sup>) und Natrium (Na<sup>+</sup>) belegt ist. Sie wird in Prozent ausgedrückt und gibt Auskunft über die Bodenfruchtbarkeit und hängt eng mit dem pH-Wert des Bodens zusammen. Ein hoher Basensättigungsgrad weist auf einen fruchtbaren Boden mit ausreichender Versorgung der Pflanzen mit den notwendigen Nährstoffen hin. Im Projektgebiet Lommis weisen die Böden mehrheitlich eine Basensättigung von über 80% auf, auch für die tiefer gelegenen Bodenschichten (siehe Anhang A7). Böden mit niedriger Basensättigung sind tendenziell saurer und weniger fruchtbar, da sie mehr saure Kationen wie Wasserstoff (H<sup>+</sup>) und Aluminium (Al<sup>3+</sup>) enthalten. Für die Waldböden im westlichen Teil des Gebiets Lommis liegen die Basensättigung im Oberboden bei rund 20–60%. Die Basensättigung ist ein wichtiger Parameter für die Bodenbewirtschaftung und die Düngungsplanung, da sie Aufschluss darüber gibt, welche Nährstoffe im Boden ergänzt werden müssen, um optimale Wachstumsbedingungen für Pflanzen zu gewährleisten (siehe Anhang A7).

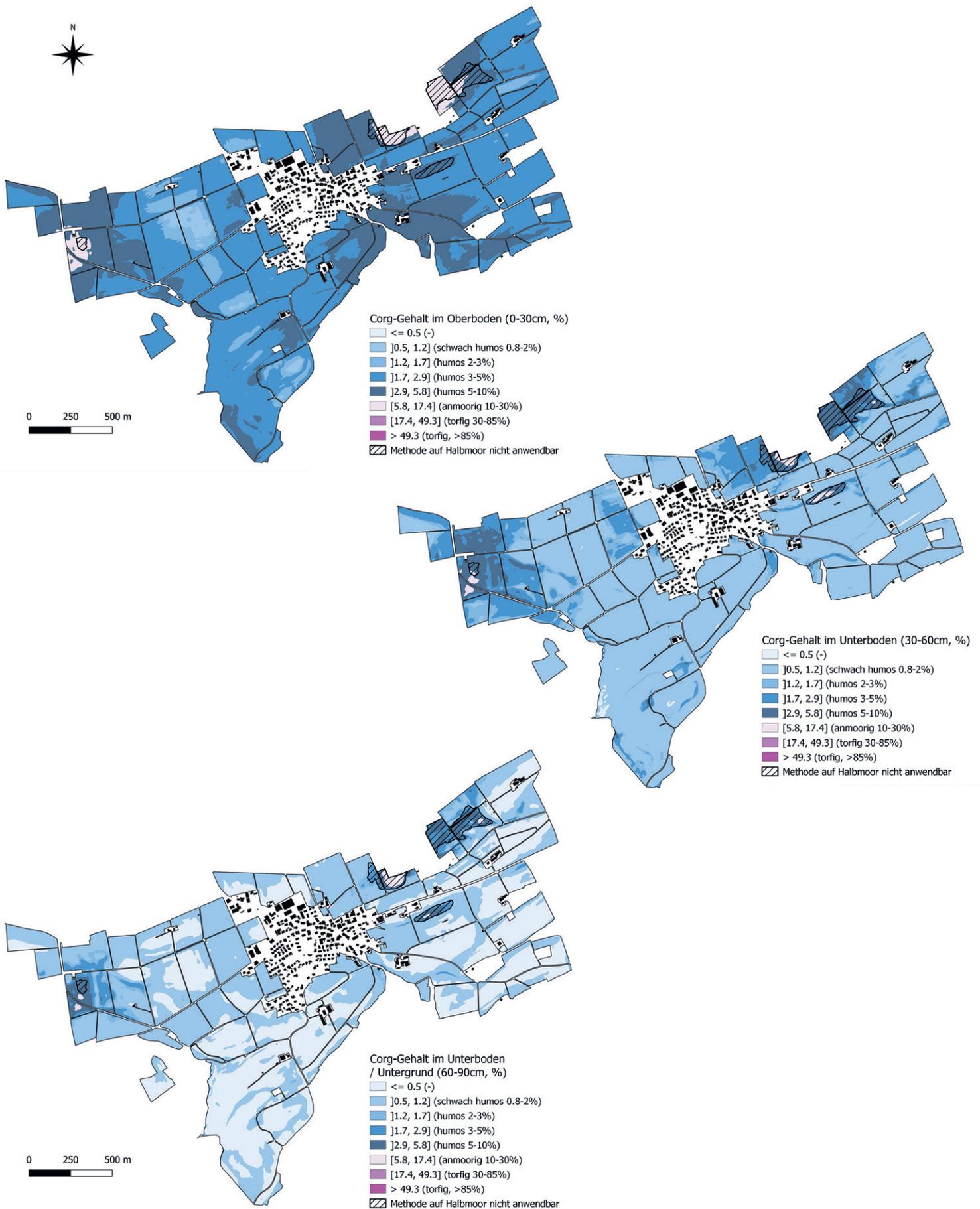


Abbildung 60:  
Regionalisierte Karte der Corg-Gehalte für 3 Tiefenstufen:  
0–30 cm, 30–60 cm, 60–90 cm Tiefe.

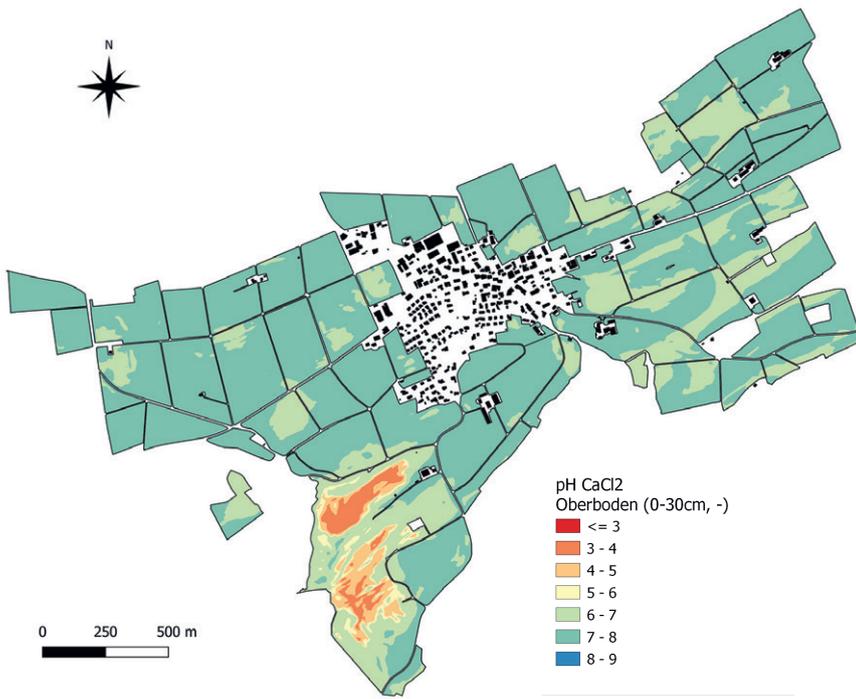


Abbildung 61:  
Regionalisierte Karte der pH-(CaCl<sub>2</sub>) Werte  
für die Tiefenstufe 0–30 cm.

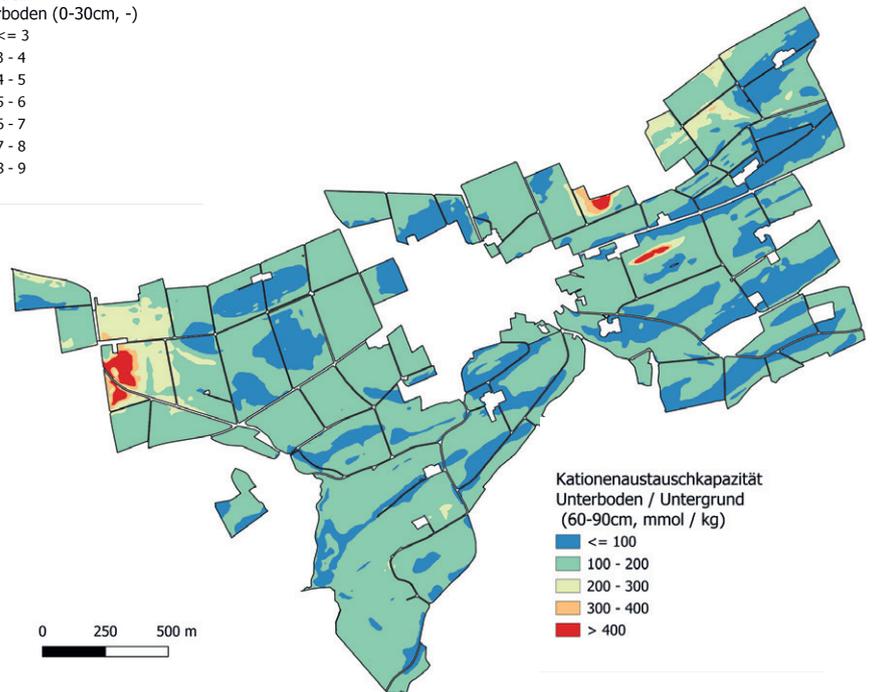


Abbildung 62:  
Kationenaustauschkapazität für Tiefenstufe 60–90 cm  
(in mmol/kg).

## 7.4 Karten für pedologische Kenngrößen

Neben der Regionalisierung für die Bodeneigenschaften wurde ebenfalls die räumliche Modellierung für die in Tabelle 9 pedologischen Kenngrößen durchgeführt. Zudem wurden für die Plausibilisierung der Feldarbeiten und der modellierten Bodenkarten noch weitere Karten erstellt. Beispielsweise für den Untertyp kolluvial (PK), Untertyp alluvial (PA), Untertyp erodiert (PE) und Untertyp überschüttet/anthropogen (PU/PM) als binomiale Grösse.

Pedologische Kenngrößen	Einheit
Bodentyp	Kategorien
Pflanzennutzbare Gründigkeit (pnG)	cm
Wasserhaushaltsgruppe	9 Kategorien
Untertyp I	5 Kategorien
Untertyp G	7 Kategorien
Untertyp R	6 Kategorien
Tiefe bis zum ersten g-Horizont	cm
Tiefe bis zum ersten gg-Horizont	cm
Tiefe bis zum r-Horizont	cm
Tiefe bis zum Untergrund	cm
Mächtigkeit Ober- und Unterboden	cm

Tabelle 9:  
Modellierte Karten der pedologischen Kenngrößen.  
Alle Karten sind im Anhang A8 verfügbar.

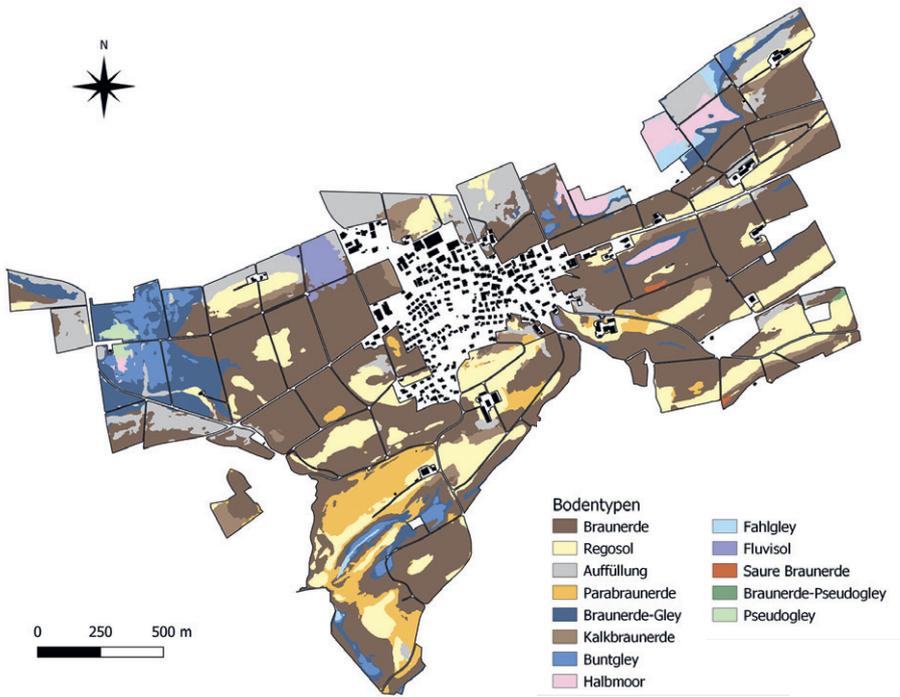


Abbildung 63:  
Bodentypen nach FAL24.

Im Projektgebiet Lommis dominieren verbrauchte, lehmige Braunerden. In den Kuppenlagen finden sich kieshaltige flachgründige wenig entwickelten Böden (Regosole), während in den tiefsten Lagen grundwassergeprägte Böden (Gleye) vorkommen (Abbildung 63). Diese weisen zum Teil noch organische Schichten auf. Insgesamt ist das räumliche Muster der Verbreitung der Böden auch stark anthropogen beeinflusst, z.B. durch Aufschüttungen, Drainagen und ehemalige Wölbäcker. Für die bodenkundliche Beschreibung und Interpretation der Böden wird auf die Profilbeschreibungen in Kapitel 5.2 verwiesen.

Der Wasserhaushalt und der Vernässungsgrad in Böden ist zentral. Hierbei wird in senkrecht durchwaschene (perkolierte) Böden, durch Stauwasser geprägte Böden (Abbildung 64, I-Untertypen) oder durch Grund- oder Hangwasser geprägte Böden unterschieden. Der G-Untertyp (Abbildung 65) drückt die Ausprägung der wechselnden Fremdnässe aus, während der R-Untertyp die Tiefenlage des Grund- oder Hangwassers beschreibt (siehe Anhang A7). Die Unterteilung der Wasserhaushaltsklassen in neun Gruppen (Abbildung 66) stützt sich im Wesentlichen auf das Vorhandensein beziehungsweise die Tiefenlage und den Ausprägungsgrad von Vernässungszeichen im Boden ab. Der Vernässungsgrad gibt an, ob die Durchlässigkeit der Böden gehemmt ist. In Senkenbereichen

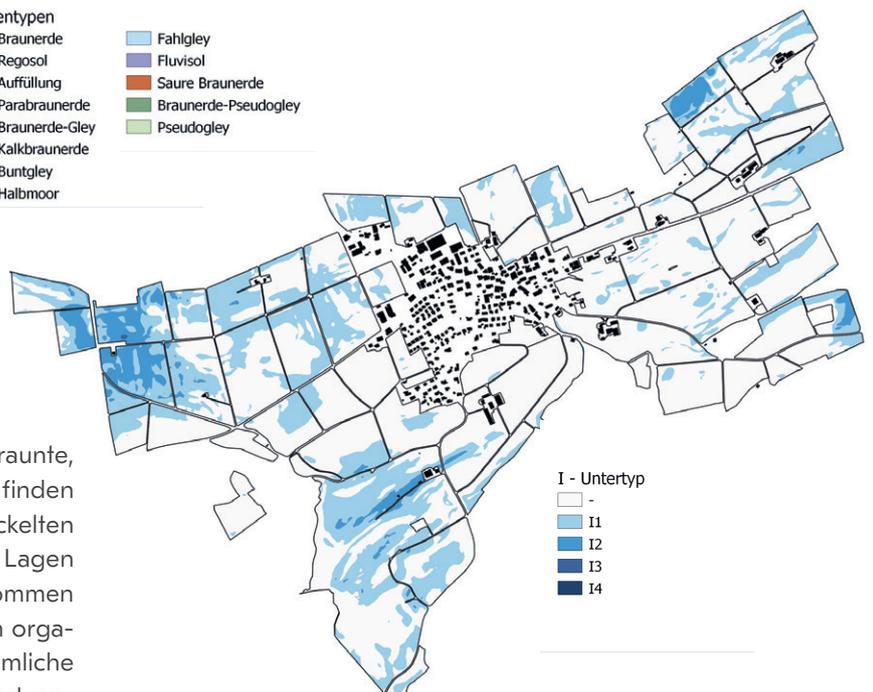


Abbildung 64:  
I-Untertyp (Stau-nässe) nach FAL24.

oder tonigen Böden kann es dauerhaft oder zumindest zeitweise zu Wassersättigung kommen. Diese reduzierten Bedingungen beeinträchtigen das Bodenleben sehr, behindern das Pflanzenwachstum und die Befahrbarkeit ist zeitweise eingeschränkt.

Andererseits verfügen Böden mit einem Stau- oder Grundwassereinfluss in tieferen Bodenbereichen in sehr trockenen Jahren – wie beispielsweise in den Jahren 2018 oder 2022 – über einen grossen Vorteil: sie verfügen auch in Trockenperioden im Sommer länger über pflanzenverfügbares Wasser für tiefwurzelnde Pflanzen. Mit Hinblick auf den Klimawandel verfügen solche Böden über eine höhere Resilienz gegenüber Trockenheit.

Die pflanzennutzbare Gründigkeit (pnG) stellt eine wichtige Kenngrösse zur Beurteilung für die landwirtschaftliche Nutzung dar. Das Wachstum der Pflanzenwurzeln kann in Böden in der Tiefe durch Stau- und Grundwasser, Bodenskelett (Kies, Steine, Fels) und schlechte Struktureigenschaften gehemmt bzw. vollständig eingeschränkt werden.

Im Untersuchungsgebiet liegen Böden mit geringer pnG im Bereich der Senken (Grundwassereinfluss) und in erodierten Kuppenlagen (10–50 cm) vor, während Böden im Unterhangbereich durch Bodenverlagerung häufig sehr tiefgründig (70–100 cm) sind (Abbildung 67). Die hohe räumliche Auflösung der Rasterkarte zeigt wie räumlich heterogen die pnG-Klassen in einem Gebiet verteilt sein kann. Innerhalb von einer grösseren Parzelle kann die pnG zwischen 30–100 cm variieren (siehe zum Vergleich auch Abbildung 44). Je nach Fragestellung können die hochaufgelösten Rasterkarten auch vereinfacht und auf Ebene der Parzellen aggregiert werden.

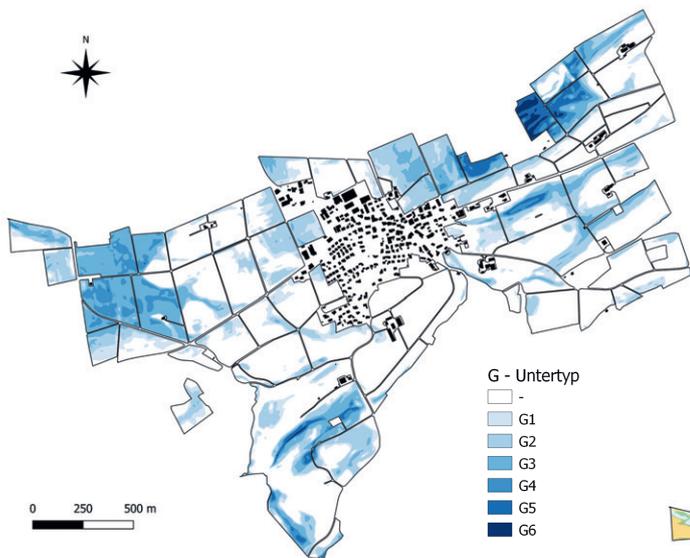


Abbildung 65: G-Untertyp (Grund- und Hangnässe) nach FAL24.

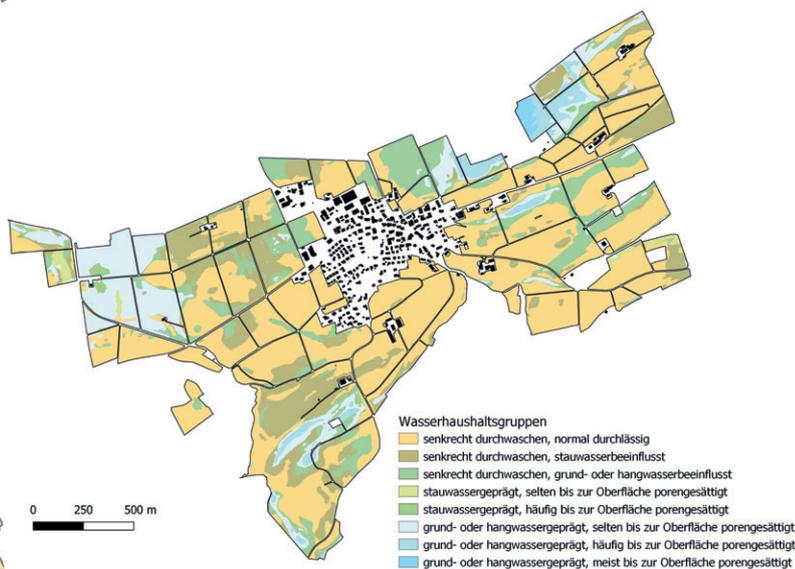


Abbildung 66: Wasserhaushaltsgruppen nach FAL24.

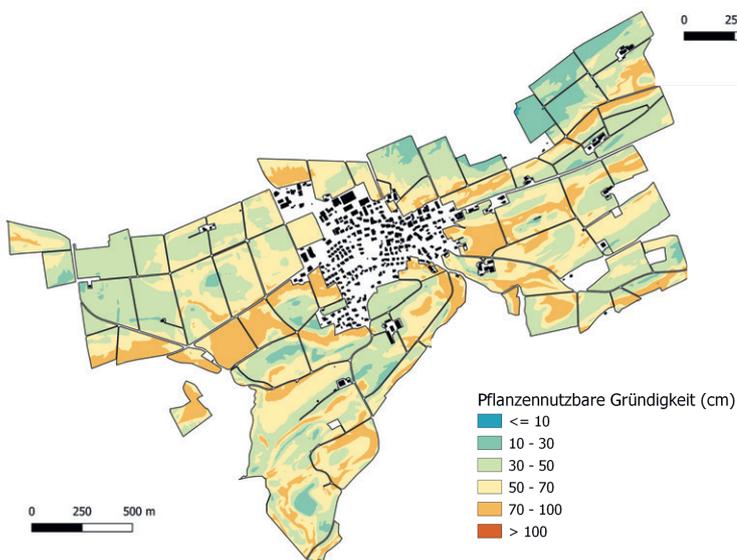


Abbildung 67: Pflanzennutzbare Gründigkeit pnG (cm) nach FAL24.

## 8. Auswertungen und Produkte

Ein wichtiger Schritt in der Bodenkartierung ist die Erstellung von Themenkarten, in denen die für spezifische Nutzergruppen relevanten Informationen aus den Grundlagenkarten (Kapitel 7.3) in interpretierter und verständlicher Form bewertet und dargestellt werden. Mit der Erstellung von Themenkarten, beispielsweise für Bodenfunktionen, Bodengefährdungen und weiteren vielfältigen Fragestellungen, soll der Nutzerkreis von Bodeninformationen aus Bodenkartierungen stark erweitert und der gesellschaftliche Mehrwert einer Bodenkartierung gesteigert werden (Steiger et al. 2018). Optimalerweise lassen sich aus den Themenkarten direkt anwendbare Handlungsoptionen oder Massnahmen für eine nachhaltige Nutzung der Böden ableiten. Hierzu gehören beispielsweise die Themenbereiche Forstwirtschaft, Klima- und Hochwasserschutz, Landwirtschaft, Trockenheit, Raumplanung oder Biodiversität (Keller et al. 2018).

Die Themenkarten sind nicht à priori gegeben. Es bedarf zukünftig eines intensiven Austauschs mit den jeweiligen Nutzergruppen, um gemeinsam praxistaugliche Themenkarten und Produkte entwickeln zu können. Ziel eines solchen Dialogs soll die Erstellung von Themenkarten sein, die als Entscheidungsgrundlage für spezifische Fragestellungen dienen können. Die nachfolgenden Themenkarten sind in diesem Sinne als erste Vorschläge zu betrachten, weitere sind im Rahmen von Pilotprojekten zur Bodenkartierung zu erarbeiten und hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit gemeinsam mit allen beteiligten Akteuren zu testen. Eine Übersicht über die in diesem zweiten Pilotprojekt erstellten Themenkarten ist in Tabelle 10 dargestellt. Für alle aufgelisteten Themenkarten ist eine Methodendokumentation inklusive Darstellung der Karte im Anhang B verfügbar. Auf einige ausgewählte Themenkarten wird im Folgenden näher eingegangen.

Themenkarte	Quelle	Themengebiet
Bindungs- und Abbauvermögen für Schadstoffe	Bechler und Toth 2010	Gewässer- / Grundwasserschutz
Bindungsvermögen für Schwermetalle	DVWK 1988	Gewässer- / Grundwasserschutz
Nährstoffrückhalt gegenüber Sicker- und Abschwemmverlusten	Jäggi et al. 1998	Gewässer- / Grundwasserschutz
Wasserhaushalt (Regulierungsfunktion)	Danner et al. 2003	Hochwasserschutz
<b>Kohlenstoffanreicherungspotenzial</b>	Johannes et al. 2017	Klimaschutz
<b>Kohlenstoffvorrat</b>	Keller et al. 2023	Klimaschutz
Kühlpotenzial	Feldwisch 2016	Klimaschutz
Stickstoffnachlieferungspotenzial	Flisch et al. 2017	Landwirtschaft
Kalkdüngungsbedarf	VDLUFA 2000	Landwirtschaft
Kalkungsbedarf	Flisch et al. 2017	Landwirtschaft
Korrekturfaktor Boden bei der Stickstoff-Normdüngung	Sinaj et al. 2018	Landwirtschaft
Nährstoffverfügbarkeit (Regulierungsfunktion)	Lehmann et al. 2013	Landwirtschaft
<b>Feuchstandortpotenzial</b>	Vögeli et al. 2022	Naturschutz
Lebensraumfunktion für Mikroorganismen	Oberholzer und Scheid 2007	Naturschutz
Standortpotenzial für Extrempflanzengesellschaften	Siemer et al. 2014	Naturschutz
<b>Trockenstandortpotenzial</b>	Lienhard und Merkel 2002	Naturschutz
<b>Bodenqualitätsindex</b>	Angelini et al. 2023	Raumplanung
<b>Bodenqualitätsindex</b>	Engel und Stadtmann 2020	Raumplanung
<b>Bodenqualitätsindex</b>	Hilbert et al. 2021	Raumplanung
<b>Bodenqualitätsindex</b>	Knoll et al. 2010	Raumplanung
<b>Bodenqualitätsindex</b>	Miller et al. 2022	Raumplanung
Landwirtschaftliche Nutzungseignung NEK-2023	Greiner et al. 2023	Raumplanung
<b>Bewässerungseignung</b>	Pressler und Bagnoud 2013	Trockenheit
<b>Potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit</b>	Müller et al. 2012	Trockenheit
Säurestatus	Zimmermann 2011	Wald und Forst

Tabelle 10:

Themenkarten im Pilotprojekt Lommis. Die fett markierten Themenkarten werden in diesem Bericht ausführlicher dargestellt. Eine Methodendokumentation inklusive Darstellung der Karte ist für alle hier aufgeführten Themenkarten im Anhang B verfügbar.

## 8.1 Bewässerungseignung und Bewässerungsbedürftigkeit

In diesem Jahrhundert wurden in der Schweiz ausgeprägte Sommertrockenperioden in mehreren Jahren (2003, 2013, 2015, 2018) beobachtet, die teilweise zu erheblichen Ertragseinbussen geführt haben (Köllner et al. 2017; Calanca et al. 2022). Für die Zukunft wird ein Zunahme der Häufigkeit von Trockenperioden für bestimmte Regionen der Schweiz prognostiziert (BAFU 2012). Auch in der wasserreichen Schweiz wird das Thema Bewässerung daher immer mehr an Bedeutung gewinnen. Laut einer aktuellen Studie wird erwartet, dass sich der Wasserbedarf von Kulturpflanzen bis 2035 um 20 bis 40 mm erhöhen und der Anteil der bewässerungsbedürftigen landwirtschaftlichen Flächen auf 70% ansteigen könnte (Wuyts et al. 2023). Neben dem Klima spielt der Boden in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle. Der Boden kann Wasser über lange Zeiträume speichern und wieder an die Pflanzen abgeben, wodurch die Wasserversorgung in kritischen Perioden aufrechterhalten werden kann.

Zwei Themenkarten zu unterschiedlichen Aspekten aus dem Themenbereich Bewässerung wurden für das Projekt Lommis umgesetzt. Mit der ersten Themenkarte wird die generelle Bewässerungseignung des Bodens beurteilt (Abbildung 68). Gemäss der hier verwendeten Methode (Presler und Bagnoud 2013) beruht die Einstufung auf dem Wasserspeichervermögen und dem Vernässungsgrad der Böden. Als für die Bewässerung nicht geeignet angesehen werden Böden, die entweder nur ein sehr geringes Wasserspeichervermögen aufweisen oder häufig bis zur Oberfläche porengesättigt sind. Im ersten Fall müssten die Böden sehr häufig mit kleinen Wassergaben bewässert werden, was eine Bewässerung schwierig und wenig rentabel macht. Im zweiten Fall werden die Böden wegen des Wasserüberangebots als nicht geeignet für die Bewässerung angesehen. Im Projektgebiet tritt nur diese zweite Variante in einigen Bereichen auf, vor allem im Bereich der durch Grundwasser beeinflussten Halbmoore.

Daneben gibt es noch ein paar kleine Gebiete in der Nähe des Waldperimeters, die ebenfalls Zeichen einer häufigen Vernässung bis zur Oberfläche aufweisen. Ausserhalb dieser Gebiete wird die Bewässerungseignung mehrheitlich als ziemlich gut bis sehr gut bewertet, nur wenige kleine Gebiete werden als mässig geeignet klassifiziert. Diese Bewertungsunterschiede beruhen vor allem der räumlichen Variabilität des Wasserspeichervermögens der Böden, welche sich aus der pflanzennutzbaren Gründigkeit (pnG) und der nutzbaren Feldkapazität (nFK) herleitet. Die mässig geeigneten Böden im Projektgebiet liegen vor allem auf Kuppen und ihr Wasserspeichervermögen ist hauptsächlich aufgrund ihrer geringen Gründigkeit eingeschränkt. Die sehr gut geeigneten Böden zeichnen sich hingegen durch eine hohe pnG oder hohe nFK, oder durch eine Kombination von beiden Bodeneigenschaften, aus.

In der zweiten Themenkarte wird die potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit nach Müller et al. (2012) bewertet (Abbildung 69). Die potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit weist aus, wie hoch der Bedarf nach Bewässerung unter gegebenen Klima- und Bodenbedingungen ist, um eine optimale Wasserversorgung für eine spezifische Ackerkultur sicherzustellen. Bei dieser Methode werden Unterschiede in der Wassernutzungseffizienz verschiedener Ackerkulturen, Interaktionen zwischen dem Boden und der Durchwurzelungstiefe der Kulturen, der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser, der Einfluss von Bodenart und Humusgehalt auf die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens, sowie der Einfluss von Niederschlag und Temperatur auf die Wasserneubildung und den Wasserverlust durch Evapotranspiration berücksichtigt (Anhang B). Hier ist als Beispiel die Karte für Winterweizen unter den durchschnittlichen Klimabedingungen der letzten Klimanormalperiode (1991–2020) dargestellt (Abbildung 69). Neben der hier vorgestellten Karte sind weitere Karten für folgende Kulturen verfügbar: Wintergerste, Sommergerste, Mais, Zuckerrübe, Kartoffel, Grünland (Anhang B).

Im grössten Teil des Projektgebiets ist keine oder nur eine geringe potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit für Winterweizen ausgewiesen. Nur in wenigen kleinen Gebieten, insbesondere südlich und südöstlich von Lommis, weisen die Böden eine mittlere Bewässerungsbedürftigkeit auf. Diese Gebiete zeichnen sich durch ein hohes Raumgewicht aus. In diesen verdichteten Böden ist die Durchwurzelungstiefe eingeschränkt und gleichzeitig die Wasserspeicherfähigkeit (nutzbare Feldkapazität) erniedrigt. Aufgrund dieser beiden Faktoren kann weniger Wasser in einer für die Pflanzen nutzbaren Form gespeichert werden, wodurch die Bewässerungsbedürftigkeit erhöht ist. Da diese Gebiete nicht grundwassernah gelegen sind, kann das Wasserdefizit nicht durch kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser kompensiert werden.

Bei der Einschätzung dieser Themenkarte sind folgende Punkte zu beachten. Die Originalmethode von Müller et al. (2012) wurde in Niedersachsen (Deutschland) entwickelt. Der Bewässerungsbedarf, der anhand des pflanzenverfügbaren Wassers und der klimatischen Wasserbilanz aus Tabellen abgeleitet wird, beruht auf empirisch ermittelten Werten. Es wurde bisher weder geprüft, ob diese Methode generell für den Einsatz in der Schweiz geeignet ist, noch wurde die hier vorgestellte Themenkarte im Feld getestet und validiert. Darüber hinaus ist die Unsicherheit bei den als Eingangsdaten verwendeten Karten zur Vernässung und zum Raumgewicht höher als bei anderen Bodeneigenschaftskarten. Beim Raumgewicht war die Anzahl der Bodenproben aufgrund des hohen Aufwands zur Messung des Raumgewichts vergleichsweise niedrig. Bei der Modellierung der Vernässungsgrenze (r-Horizont) bestand die Herausforderung, dass die Vernässungsgrenze in vielen Fällen unterhalb der Bohrtiefe lag. In diesen Fällen lagen dementsprechend keine verlässlichen Daten zur Vernässungsgrenze vor, was die Modellunsicherheit erhöht.

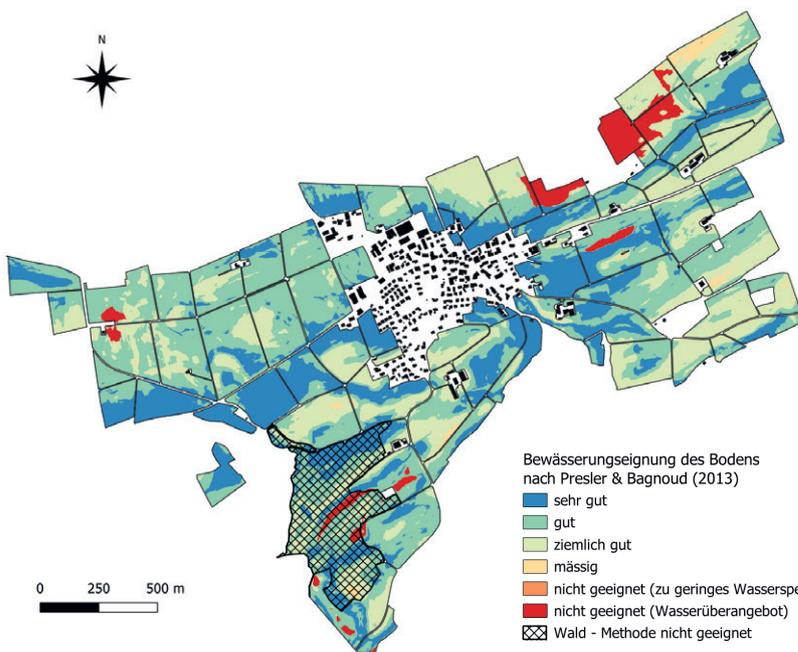


Abbildung 68: Bewässerungseignung des Bodens nach der Methode von Presler und Bagnoud (2013).

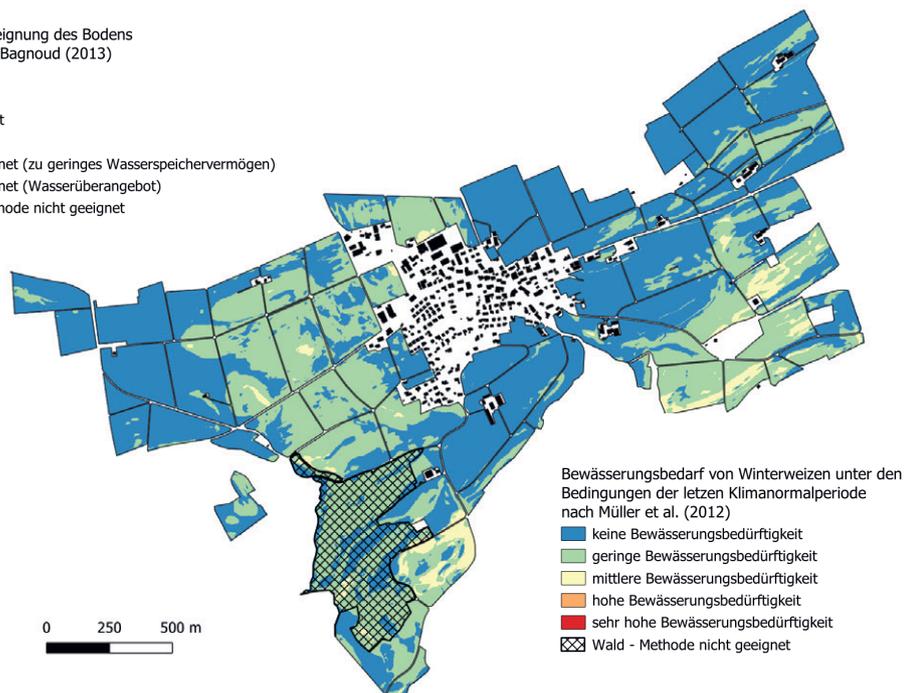


Abbildung 69: Bewässerungsbedürftigkeit von Winterweizen unter den Bedingungen der Klimanormalperiode 1991–2020 nach der Method von Müller et al. (2012).

## 8.2 Kohlenstoffvorrat und Potenzial zur Kohlenstoffanreicherung

Der im Boden in Form von Humus gespeicherte Kohlenstoff spielt in vielerlei Hinsicht eine zentrale Rolle. Aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften beeinflusst er viele Bodenfunktionen positiv und erhöht die Bodenqualität (Wiesmeier et al. 2019). Der im Boden gespeicherte Kohlenstoff ist zudem im Kontext des Klimawandels relevant. So ist in der Schweiz wesentlich mehr Kohlenstoff im Boden gespeichert als in der Atmosphäre und Biosphäre zusammen (Hagedorn et al. 2018). Eine Erhöhung des Kohlenstoffgehalts kann daher nicht nur die Bodenqualität verbessern, sondern gleichzeitig auch einen Beitrag zur Abmilderung der Klimawandels leisten (Minasny et al. 2017). Die Anreicherung (Sequestrierung) von Kohlenstoff in Böden ist aus diesem Grund seit Jahren ein viel diskutiertes Thema und Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte (z. B. European Joint Programme EJP Soil – Soil Carbon Sequestration & Climate Change Mitigation; [www.ejpsoil.eu](http://www.ejpsoil.eu)).

Der Kohlenstoffgehalt in landwirtschaftlich genutzten Böden wird von verschiedenen Faktoren wie der Düngung (z. B. organisch, mineralisch), der Fruchtfolge (z. B. Kulturwahl, Zwischenfrüchte), der Bodenbearbeitung und den Bodeneigenschaften beeinflusst (Hagedorn et al. 2018).

Diese Faktoren bestimmen, wie viel Kohlenstoff in Form von organischem Material in den Boden eingetragen wird und wie schnell er dort von Mikroorganismen abgebaut werden kann. Beispielsweise kann der Eintrag von organischem Material in den Boden erhöht werden, wenn Ernterückstände auf dem Boden verbleiben oder Zwischenfrüchte als Gründüngung angebaut werden. Durch das Pflügen hingegen wird der Boden gelockert und der Sauerstoffgehalt im Boden erhöht, wodurch die Aktivität der Bodenorganismen ansteigt, und der Abbau der organischen Substanz beschleunigt wird. Im Gegensatz dazu ist in häufig wassergesättigten Böden aufgrund der anaeroben Bedingungen die Aktivität der Bodenorganismen eingeschränkt, was zu einer Akkumulation von Humus führen kann. Auch Erosion kann den Kohlenstoffgehalt beeinflussen, da insbesondere die obersten, besonders humusreichen Bodenpartikel erodieren und sich in Mulden ansammeln können. Der Kohlenstoffgehalt ist letztendlich das Resultat vieler interagierender Prozesse über einen langen Zeitraum (Wiesmeier et al. 2019).

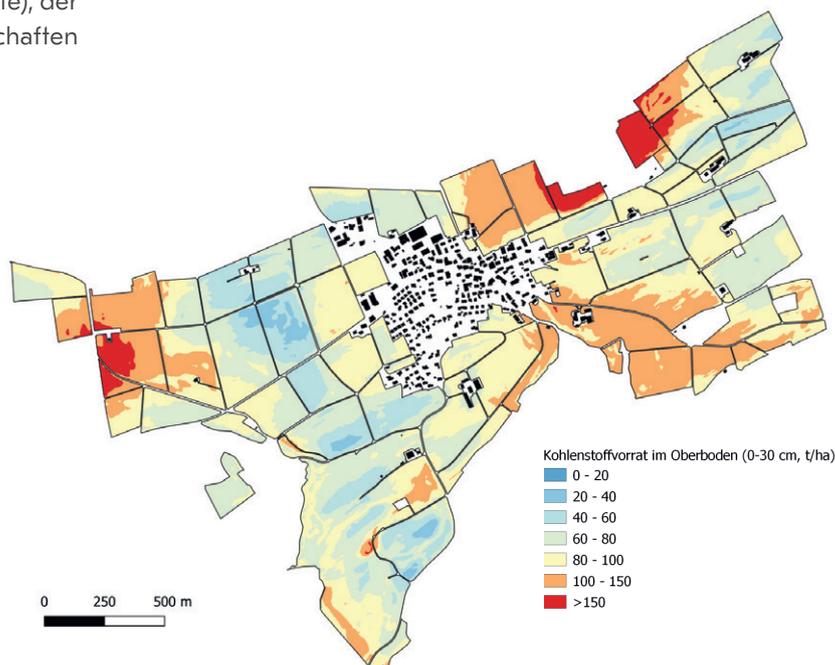


Abbildung 70:  
Kohlenstoffvorrat im Oberboden (0–30 cm, t/ha).

Die Menge an Kohlenstoff, die pro Flächeneinheit im Boden gespeichert wird, wird als Kohlenstoffvorrat bezeichnet (hier in t/ha angegeben). Im Projektgebiet zeigt der Kohlenstoffvorrat im Oberboden (0–30 cm) ein ausgeprägtes räumliche Muster (Abbildung 70). In den Gebieten um die Halbmoore westlich und nordöstlich von Lommis sind Vorräte von mehr als 150 t/ha im Oberboden vorhanden. Hohe Kohlenstoffvorräte von 100–150 t/ha sind ebenfalls in einem grösseren Gebiet südöstlich von Lommis zu finden. Hingegen weisen einige kleinere Flächen verteilt über das gesamte Gebiet hinweg geringere Vorräte von < 40 t/ha aus. Gemittelt über das gesamten Projektgebiet ergeben sich Vorräte von etwa 87 t/ha. Die Gebiete um die Halbmoore liegen in Senken und sind durch Grundwasser geprägt. Der eingeschränkte Abbau der organischen Substanz aufgrund der anaeroben Bedingungen ist die Hauptursache für die hohen Kohlenstoffvorräte. Zusätzlich wird noch weiteres humusreiches Material von den Hängen durch Erosion in diese Senken transportiert.

Im Gebiet im Südosten von Lommis lassen sich die hohen Kohlenstoffgehalte vor allem durch die Bewirtschaftungsform erklären. Das Gebiet wird hauptsächlich als Wiese genutzt. Aufgrund der Bedeckung des Bodens sowie der pfluglosen Bewirtschaftung sind auf Parzellen, die überwiegend oder permanent als Grünland genutzt werden, im Allgemeinen höhere Kohlenstoffvorräte im Oberboden als auf Ackerflächen zu finden. Zu diesem Effekt trägt zusätzlich das im Vergleich hohe Raumgewicht ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) in diesem Gebiet bei.

Ein hohes Raumgewicht erhöht bei gleichem Kohlenstoffgehalt (Massen-%) ebenfalls den Kohlenstoffvorrat, da innerhalb des Oberbodens mehr Feinerde pro Volumen vorhanden ist.

Aufgrund der positiven Effekte des organischen Materials im Boden ist ein hoher und langfristig stabiler Kohlenstoffgehalt im Boden erstrebenswert. Wie oben beschrieben ist der von Mikroorganismen angetriebene Kohlenstoffkreislauf im Boden allerdings ein dynamisches System, das von vielen verschiedenen Faktoren beeinflusst wird. Der überwiegende Anteil des eingetragenen Kohlenstoffs wird innerhalb weniger Jahre mineralisiert und gelangt als Kohlendioxid in die Atmosphäre. Ein gewisser Anteil kann allerdings mit Bodenpartikeln, vor allem mit Tonmineralen, stabile Verbindungen (sogenannte Ton-Humus-Komplexe) eingehen.

In dieser Form ist der Kohlenstoff vor dem Abbau durch Mikroorganismen weitgehend geschützt und kann über Jahrhunderte im Boden verbleiben (Amelung et al. 2018). Das hier präsentierte Kohlenstoffanreicherungspotenzial im Oberboden (Abbildung 71) basiert auf diesem Ansatz und zeigt das Potenzial des Bodens für eine langfristige Speicherung von Kohlenstoff in stabiler Form zusätzlich zum bereits im Boden vorhandenen Kohlenstoff.

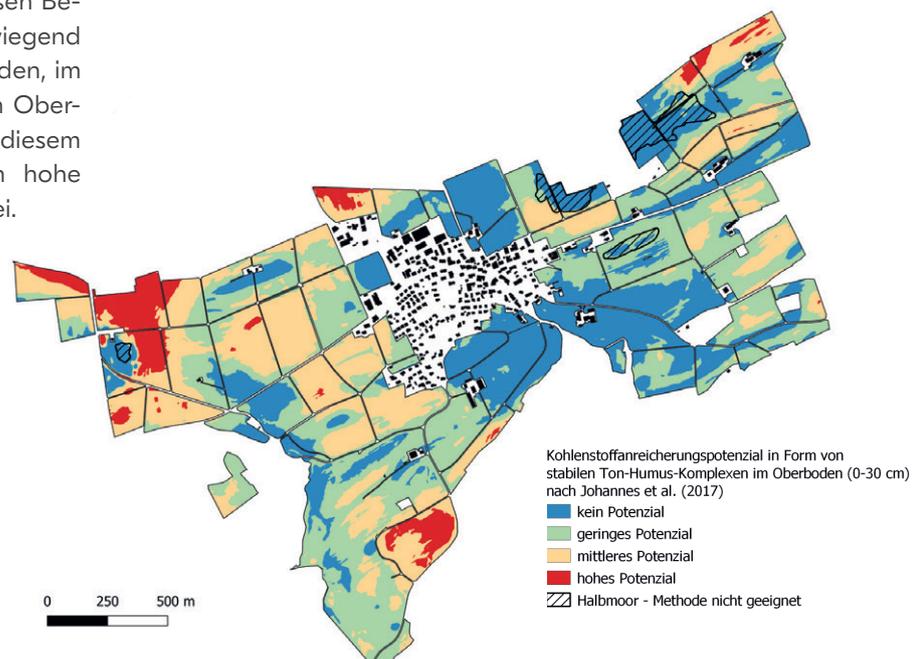


Abbildung 71:  
Potenzial des Bodens zur Anreicherung von Kohlenstoff in Form von stabilen Ton-Humus-Komplexen im Oberboden (0–30 cm) nach der Methode von Johannes et al (2017).

Es existieren in der Literatur verschiedene Ansätze, um das Kohlenstoffanreicherungspotenzial auf Basis der Anteile der kleinsten Bodenpartikel zu bestimmen (siehe Übersicht in Wiesmeier et al. 2019). Die hier vorgestellte Themenkarte (Abbildung 71) basiert auf dem Verhältnis von Kohlenstoff zu Ton (Johannes et al. 2017). Für Schweizer Böden mit einer guten Bodenstruktur wurde ein optimales Verhältnis von Kohlenstoff zu Ton von 1:8 gemessen. Ein Kohlenstoffgehalt, der diesem Verhältnis entspricht und folglich mit dem Tongehalt eines Bodens ansteigt, wurde als unter natürlichen Bedingungen maximal erreichbarer, langfristig stabiler Humusgehalt postuliert (Johannes et al. 2017; Keel et al. 2021). Das Kohlenstoffanreicherungspotenzial (Abbildung 71) weist dementsprechend die Differenz des Kohlenstoffvorrats beim optimalen Ton:Humus-Verhältnis zum aktuellen Kohlenstoffvorrat (Abbildung 70) aus.

Im Mittel besteht ein Kohlenstoffanreicherungspotenzial von etwa 15 t/ha, wobei ausgeprägte räumliche Muster zu erkennen sind (Abbildung 71). Auf einigen Flächen ist kein Potenzial zur Kohlenstoffanreicherung gegeben, auf dem grössten Teil des Projektgebietes besteht zumindest ein geringes Potenzial. Ein paar verstreut liegende Gebiete stechen mit einem hohen Potenzial von mehr als 50 t/ha heraus (rote Flächen in Abbildung 71). Interessanterweise besteht ein hohes Potenzial in den Flächen um das Halbmoor im Westen von Lommis, obwohl dort bereits hohe Kohlenstoffvorräte vorhanden sind (Abbildung 70). Der Grund dafür ist der überdurchschnittlich hohe Tongehalt mit Werten um 40%. Im Gegensatz dazu ist in dem von Wiesen geprägtem Gebiet im Südosten von Lommis, welches ähnlich hohe Kohlenstoffvorräte aufweist, kein Potenzial zur Kohlenstoffanreicherung vorhanden – hier ist der Tongehalt mit etwa 20% nur halb so hoch. Auf den Flächen zwischen dem westlichen Halbmoor und Lommis wiederum ist ein mittleres Anreicherungspotenzial vorhanden, obwohl die Tongehalt zu den niedrigsten im ganzen Projektgebiete gehören, weil die Kohlenstoffvorräte hier ebenfalls gering sind.

Bei der hier vorgestellten Methode zum Kohlenstoffanreicherungspotenzials ist zu beachten, dass das Potenzial zur langfristig stabilen Bindung von Kohlenstoff beurteilt wird und nicht das absolute Maximum an Kohlenstoff, das im Boden gespeichert werden kann. Wenn sehr viel organisches Material in den Boden eingetragen wird und der Humusabbau gehemmt ist, (z. B. in grundwasser-geprägten Böden) kann der Kohlenstoffvorrat weit über dem potenziellen, langfristig stabilen Kohlenstoffvorrat liegen. Bei einer Beseitigung der Hemmnisse, z. B. durch Drainagen, würden sich diese Böden allerdings langfristig ihrem stabilen Gleichgewichtszustand annähern und eine Kohlenstoffquelle darstellen. Ferner gilt zu beachten, dass die Methode von Johannes et al. (2017) nur für relativ wenige Böden in der Westschweiz hergeleitet wurde und somit nicht für die Böden der Schweiz repräsentativ ist. Zudem wird die Anwendung von einem fest definierten Verhältnis von Kohlenstoff zu Tongehalt als alleiniges Beurteilungskriterium in der internationalen Literatur kontrovers diskutiert (z. B. Poeplau und Don 2023; Feeney et al. 2024). Es werden erweiterte Bewertungsmethoden für das Potenzial einer Humusanreicherung in Böden vorgeschlagen, die beispielsweise auch die Klimazonen und andere Standortfaktoren einbeziehen. Zukünftig sollen daher für Schweizer Böden auch solche Bewertungsmethoden in Pilotprojekten angewendet und getestet werden.

## 8.3 Feucht- und Trockenstandortpotenzial

Die Biodiversität in der Schweiz nimmt seit über hundert Jahren stetig ab und mehr als ein Drittel der Arten und über die Hälfte der natürlichen Lebensräume sind bedroht (BAFU 2019). Insbesondere Feuchtlebensräume sind in der Schweiz selten, weil viele Gebiete in den letzten zweihundert Jahren grossflächig entwässert wurden. Dadurch sind Pflanzen und Tiere bedroht, die auf diese Lebensräume angewiesen sind (Fabian et al. 2022). Auch auf Trockenlebensräume spezialisierte Pflanzen, Pilze und Tiere sind selten geworden oder stark gefährdet (Gubser et al. 2010). Um die biologische Vielfalt zu erhalten, ist der Schutz bestehender und die Schaffung neuer Lebensräume zentral. Ein entsprechendes System wird «Ökologische Infrastruktur» genannt. Für eine funktionsfähige Ökologische Infrastruktur sollen in der Schweiz Feuchtstandorte, Trockenstandorte und auch mosaikartige Lebensräume qualitativ und quantitativ gestärkt und besser vernetzt werden (BAFU 2021). Konkret sollen mindestens 17% der Landesfläche (aktuell ca. 13%) als Kerngebiete zum Schutz von Arten und Lebensräumen dienen. Die Kerngebiete sollen zusammen mit den Vernetzungsgebieten rund 30% der Landesfläche umfassen. Gemäss einer Analyse von InfoSpecies besteht schweizweit ein Ergänzungsbedarf zu bereits bestehenden Schutzgebieten von ca. 90 000 ha bei Feuchtlebensräumen und ca. 131 000 ha bei Trockenlebensräumen (BAFU 2021).

Neben Faktoren wie Klima, Relief und Hydrologie ist der Boden zentral für die Beurteilung des Potenzials für Feuchtlebensräume (Horvath et al.

2017; Szerencsits et al. 2018; Medland et al. 2020; Vögeli et al. 2022) und Trockenlebensräume (Eggenberg et al. 2001; Lienhard und Merkel 2002; Gubser et al. 2010). Im Folgenden stellen wir zwei Themenkarten vor, die das Feuchtstandortpotenzial, respektive das Trockenstandortpotenzial anhand von Bodendaten und weiteren Umweltgrössen beurteilen. Die beiden Bewertungsmethoden sind im Anhang B im Detail dokumentiert.

Die Themenkarte zum Feuchtstandortpotenzial (Abbildung 72) basiert auf der Methode von Vögeli et al. (2022). Die Methode bewertet das Potenzial für Feuchtstandorte von drainierten und nicht-drainierten Böden. Drainierten Böden mit Vernässungsmerkmalen, toniger Textur im Unterboden, viel Niederschlag und geringer Hangneigung wird ein hohes Feuchtstandortpotenzial zugeordnet. Zudem werden Standorte mit Hinweisen auf eine historische Vernässung besser bewertet. Bei nicht drainierten Böden erfolgt die Beurteilung über den Bodentyp, den Tongehalt im Unterboden, das Terrain (Muldenlage und Hangneigung) und die potenziellen Wegkosten für die Vernetzung mit feuchteliebenden Arten.

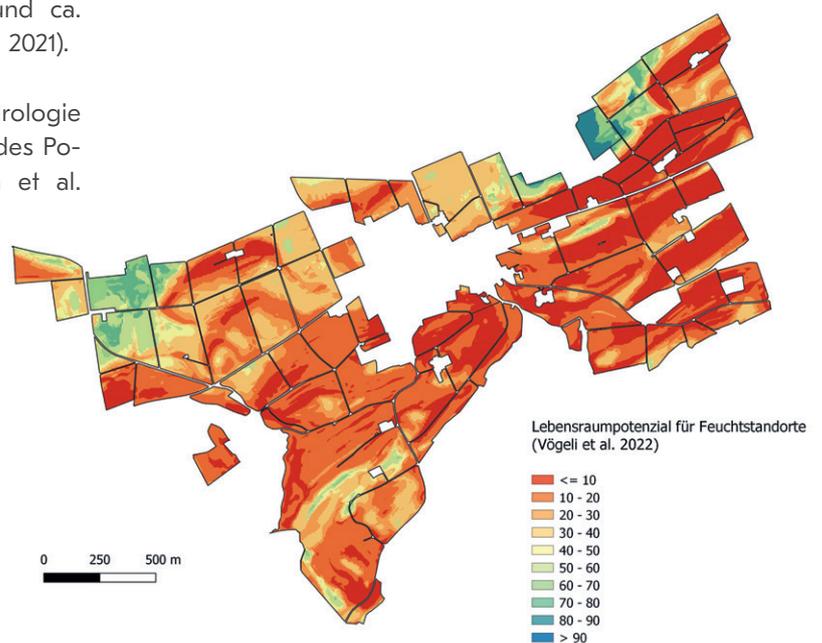


Abbildung 72: Feuchtstandortpotenzial nach der Methode von Vögeli et al. (2022). 100 Punkte entsprechen einem maximalen Potenzial für Feuchtstandorte, 0 Punkte erhalten Standorte ohne Potenzial.

In Lommis ist das Feuchtstandortpotenzial im Mittel gering, abgesehen von einzelnen Bereichen mit sehr hohem Potenzial im Norden auf den Halbmooren und für Buntgleye. Für rund ein Viertel des Gebiets liegt kein Potenzial für Feuchtstandorte vor, dies sind vor allem die tonarmen Böden. Dreiviertel des Gebiets weisen ein Feuchtstandortpotenzial von unter 26 Punkten (von maximal 100 Punkten) auf.

Die Themenkarte zum Trockenstandortpotenzial nach der Methode von Lienhard und Merkel (2002) weist weniger Gebiete mit besonders hohem oder niedrigem Potenzial aus, kleinräumig variiert das Potenzial aber durchaus (Abbildung 73). Bei dieser Methode wird der Initial- und Pflegeaufwand für eine trockene Magerwiese bewertet. Dabei werden in der Bewertung neben Bodenfaktoren (Bodentyp, Wasserhaushaltsuntergruppe und Textur) auch Klima, Terrain und die Nähe zu anderen Naturschutzgebieten berücksichtigt, wobei der Faktor Boden am stärksten gewichtet wird. Die Autoren berücksichtigen für ihre Beurteilung des Potenzials für magere Trockenwiesen auf Grund der Datenlage keine nährstoffrelevanten Faktoren. Für Lommis gibt es keine Standorte mit sehr hohem Trockenstandortpotenzial (> 60 Punkte von 100). Hingegen gibt es kleinräumig einige flachgründige, nicht nasse Standorte an lokaler Kuppenlage, welche ein erhöhtes Trockenstandortpotenzial haben (50–60 Punkte).

Das auf der Karte sichtbare Muster ist stark geprägt durch die Wasserhaushaltsuntergruppen. Dies erstaunt nicht, da der Boden – beurteilt über Bodentyp, Wasserhaushaltsuntergruppe und Textur – in dieser Methode mit 25% am stärksten gewichtet wird. Für Lommis gibt es keine Standorte mit sehr schlechtem Trockenstandortpotenzial (< 28 Punkte).

Es fällt auf, dass beim Feuchtstandortpotenzial innerhalb des Pilotgebiets beinahe die gesamte Bewertungsbreite erreicht wird und es beim Trockenstandortpotenzial keine Bewertungen an den Extremen gibt. Tatsächlich passt diese Einschätzung für Lommis zu Anwendungen der Methoden im Kanton Zürich. Vergleicht man die beiden Themenkarten im Zürcher Mittelland (Kanton Zürich 2004) mit den beiden Themenkarten im Pilotgebiet in Lommis – ebenso im Mittelland – zeigt sich eine ähnliche Tendenz: Feuchtstandortpotenziale sind flächiger und extremer, Trockenstandortpotenziale sind kleinräumiger und weniger ausgeprägt. In den Regionen der Zürcher Alpennordflanke werden die Trockenstandortpotenziale akzentuierter und grossflächiger, die Feuchtstandortpotenziale kleinräumiger (Kanton Zürich 2004).

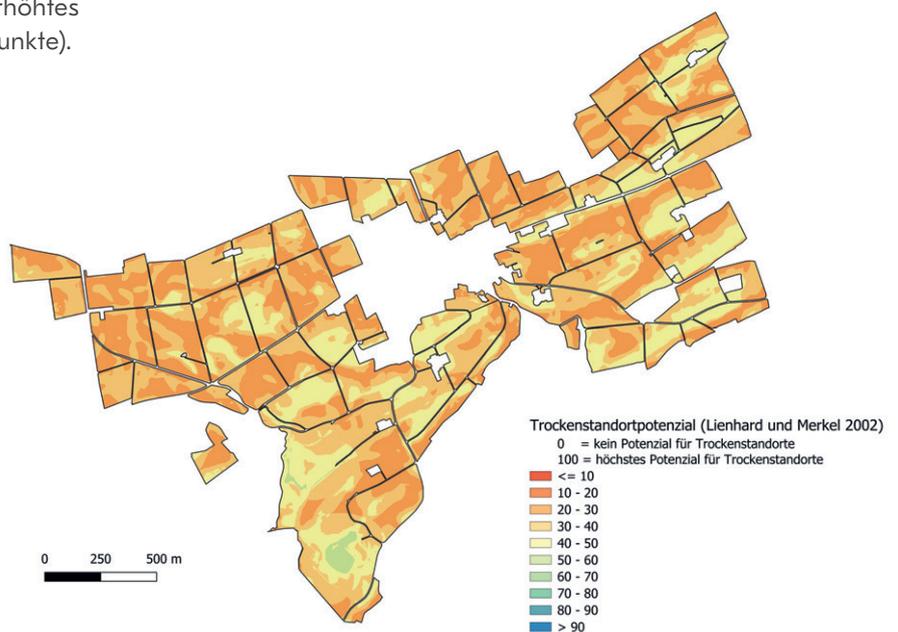


Abbildung 73: Trockenstandortpotenzial nach der Methode von Lienhard und Merkel (2002). 100 Punkte entsprechen einem maximalen Potenzial für Trockenstandorte, 0 Punkte erhalten Standorte ohne Potenzial.

## 8.4 Bodenqualitätsindizes

Böden erbringen zentrale Funktionen für Mensch und Umwelt. Wie in den vorherigen Kapiteln dargestellt, speichern sie beispielsweise – regional unterschiedlich ausgeprägt – Wasser und Kohlenstoff und beeinflussen die Potenziale für Feucht- und Trockenstandorte. Diese und weitere Funktionen der Böden werden von ihren Eigenschaften bestimmt und können durch Bodengefährdungen (z. B. Versiegelung, Verdichtung, Erosion oder Schadstoffeinträge) beeinträchtigt werden. Die Fähigkeit der Böden, die unterschiedlichen Funktionen zu erfüllen und damit Leistungen für Mensch und Umwelt zu erbringen, wird unter dem Oberbegriff Bodenqualität zusammengefasst (Keller et al. 2018). Insbesondere für die Raumplanung ist eine Vereinfachung der Multifunktionalität der Böden hin zu einer aggregierten Bodenqualitätsbewertung zentral (Grêt-Regamey et al. 2018).

Die Erfassung und Bewertung der Bodenqualität ist nicht trivial. Zum einen gibt es eine grosse Anzahl von Bodenfunktionen, die mit unterschiedlichen Methoden bewertet werden können. Zum anderen stellt sich die Frage, wie man die verschiedenen Bodenfunktionen zusammengefasst beschreiben, beziehungsweise quantifizieren kann (Greiner et al. 2018). In diesem Kontext werden im Ausland Bodenqualitätsindizes verwendet. In einem Bodenqualitätsindex werden Bodenfunktionen ausgewählt, gewichtet und zu einem Index aggregiert: das Resultat ist eine Kennzahl zur Bodenqualität. In Deutschland werden beispielsweise Bodenqualitätsindizes bereits seit über einem Jahrzehnt in der raumplanerischen Praxis angewendet (Bechler und Toth 2010; Hilbert et al. 2021; Miller et al. 2022). Die Erfahrung in Deutschland hat gezeigt, dass zusammenfassende Bodenqualitätsindizes den Bodenschutz in Planungsverfahren der Raumplanung unterstützen können. Die Berücksichtigung von einzelnen, themenspezifischen Bodenfunktionen können die Kommunikation zwischen Bodenexperten und Raumplanern erschweren (Feldwisch und Balla 2007).

In der Schweiz wird die Bodenqualität in der raumplanerischen Praxis bisher kaum berücksichtigt (Grêt-Regamey et al. 2018; Drobnik et al. 2020). Verschiedene Studien haben aufgezeigt, wie Böden in raumplanerische Planungsprozesse besser geschützt werden können (Hepperle und Stoll 2006; Greiner et al. 2018; Grêt-Regamey et al. 2018; Drobnik et al. 2020). Gemeinsam ist diesen Ansätzen, dass die Bodenkartierung und die Erstellung von Themenkarten die fachlichen Grundlagen bilden (fachliche Ebene), und für die nachfolgende Interessensabwägung der verschiedenen Nutzungsinteressen in einem partizipativen Prozess ein Bodenqualitätsindex erstellt wird (politische Ebene), der je nach Gebiet und Anforderungen auf individuelle Bedürfnisse angepasst werden kann (sanu durabilitas 2025).

Unabhängig von dem partizipativen Prozess auf der politischen Ebene werden nachfolgend zur Veranschaulichung fünf internationale Methoden zur Erstellung eines Bodenqualitätsindizes für das Projektgebiet Lommis verglichen (Abbildung 74). In erster Linie wurden Methoden für die Berechnung eines Bodenqualitätsindizes ausgewählt, welche seit Jahren in der Praxis genutzt werden (Hilbert et al. 2021; Miller et al. 2022), beziehungsweise möglichst diverse Bodenfunktionen berücksichtigen (Knoll et al. 2010; Engel und Stadtmann 2020; Angelini et al. 2023). Jede der fünf Methoden berücksichtigt eine andere Kombination von Bodenfunktionen und aggregiert diese unterschiedlich zu einem Bodenqualitätsindex (siehe Tabelle 11).

Methode	Bodenfunktionen										Aggregation zu einem Index		
	Lebensraumfunktion (Biotoppotenzial)	Lebensraumfunktion (Bodenorganismen)	Produktionsfunktion (Ertragspotenzial)	Regulierungsfunktion (Kohlenstoff)	Regulierungsfunktion (Nährstoffe)	Regulierungsfunktion (Schadstoffe)	Regulierungsfunktion (Wasser)	Archivfunktion (Kulturgeschichte)	Archivfunktion (Bodenseltenheit im Gebiet)	Maximalwert	Mittelwert/Summe	Priorisierung	
Miller (2022)	x		x		x		x			x	x		
Hilbert et al. (2021)	x		x			x	x	x				x	
Angelini et al. (2023)			x	x		x					x		
Knoll et al. (2010)	x	x	x			x	x	x		x			
Engel und Stadtmann (2020)	x		x					x	x	x		x	

Tabelle 11:  
Fünf internationale Methoden zur Erstellung eines Bodenqualitätsindizes: es wird aufgelistet, welche Bodenfunktionen in den Methoden für die Erstellung von einem Index berücksichtigt wurden. Einige der Methoden berücksichtigen die Archivfunktion (Kulturgeschichte), diese war für Lommis nicht vorhanden. Die Methoden sind im Detail im Anhang B dokumentiert.

Bei der Herleitung der Bodenqualitätsindizes werden generell zuerst die ausgewählten Bodenfunktionen bewertet (Anhang B), anschliessend werden die Resultate aus den einzelnen Bodenfunktionsbewertungen nach unterschiedlichen Bewertungsregeln zu einem Index aggregiert. Grundsätzlich werden Bodenfunktionen nach drei verschiedenen Bewertungsregeln aggregiert (vergleiche Feldwisch und Balla 2007):

1. das Mittelwert- und Summenverfahren, bei welchen die Bodenfunktionsbewertungen addiert und anschliessend gemittelt werden,
2. das Maximalwert- oder Minimalwertverfahren, bei welchen die beste oder schlechteste aller Bodenfunktionsbewertung an einem Punkt den Bodenqualitätsindex bestimmt,
3. das Priorisierungsverfahren, bei welcher Bodenfunktionen je nach Interesse unterschiedlich gewichtet werden.

Drei der fünf hier vorgestellten Bodenqualitätsindizes basieren auf einer Kombination dieser Zusammenfassungenarten. Vier der fünf Methoden sind auf alle Landnutzungen im Pilotgebiet Lommis anwendbar, eine Methode (Knoll et al. 2010) eignet sich nicht für Waldstandorte. Es wurden die Bewertungsskalen der jeweiligen Methoden übernommen, welche sich auf südfranzösische (Angelini et al. 2023), deutsche (Engel und Stadtmann 2020; Hilbert et al. 2021; Miller et al. 2022) oder österreichische (Knoll et al. 2010) Böden ausrichten.

Abbildung 74 verdeutlicht, wie unterschiedlich das Resultat für einen Bodenqualitätsindex im Projektgebiet Lommis mit den fünf ausgewählten Methoden aussehen kann. Der Bodenqualitätsindex von Engel und Stadtmann (2020) konzentriert sich beispielsweise auf die Archiv- und die Lebensraumfunktion des Bodens, die Methode von Angelini et al. (2023) fokussiert wiederum auf die landwirtschaftliche Produktion und verwandte Bodenfunk-

tionen. Hilbert et al. (2021) gewichtet für die Stadtböden in Berlin das Standortpotenzial für naturnahe und seltene Pflanzengesellschaften gegenüber der Ertragsfunktion für Kulturpflanzen generell höher. Trotzdem finden sich einige ähnliche räumliche Muster, beispielsweise zeigen sich die eher flachgründigen Böden nördlich des Waldperimeters in allen Bodenqualitätsindizes mit schlechteren Bewertungen.

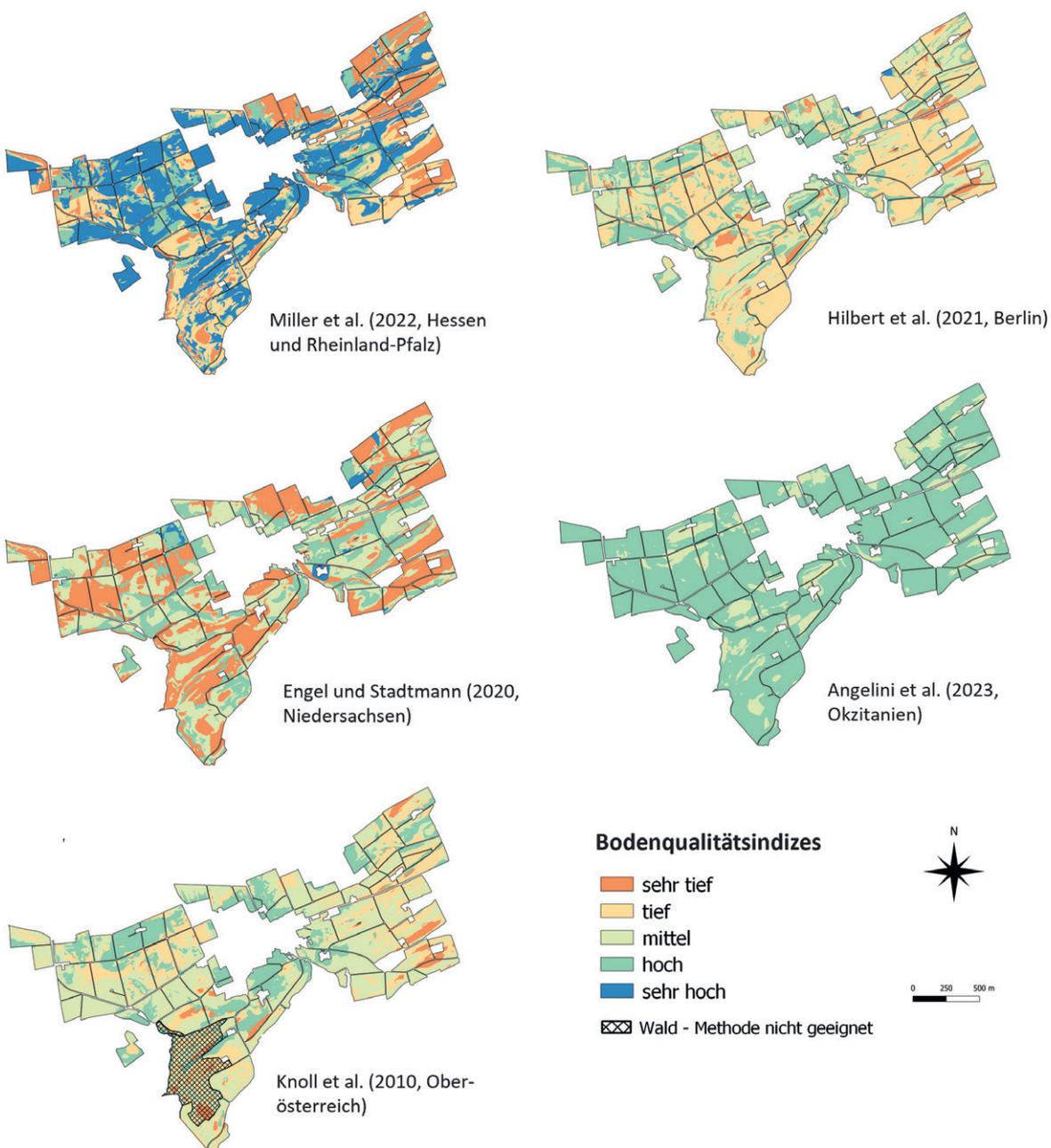


Abbildung 74: Erstellung von Bodenqualitätsindizes nach den Methoden von Miller et al. (2022), Hilbert et al. (2021), Engel und Stadtmann (2020), Angelini et al. (2023) und Knoll et al. (2010). Letztere ist nicht für Waldböden geeignet.

Die Bodenqualitätsindizes von Knoll et al. (2010) und Hilbert et al. (2021) sind sich von den räumlichen Mustern her am ähnlichsten. Dabei ist beim Bodenqualitätsindex nach Knoll et al. (2010) die Klasse «mittel» am häufigsten, beim Bodenqualitätsindex nach Hilbert et al. (2021) die Klasse «tief». Die beste Bewertung erhalten Böden in Lommis nach dem Bodenqualitätsindex von Miller et al. (2022) und in seltenen Fällen bei Hilbert et al. (2021) und Engel und Stadtmann (2020). Je nach Methode zur Erstellung eines Bodenqualitätsindex kommen zwei bis vier von fünf Klassen im Pilotgebiet vor. Nach der Methode von Angelini et al. (2023) ist die Variabilität des Bodenqualitätsindex im Pilotgebiet am kleinsten (da Mittelwertbildung von Bodenfunktionen).

Die dargestellten Beispiele zeigen eindrücklich, dass es nicht eine einzelne ideale Methode zur Erstellung von einem Bodenqualitätsindex gibt, die es erlaubt ausgewählte Bodenfunktionen optimal zu aggregieren. Stattdessen orientieren sich die fünf ausgewählten Methoden an unterschiedlichen Fragestellungen bzw. an unterschiedlichen (politischen) Nutzungsinteressen und benutzen zudem unterschiedliche statistische Bewertungsregeln zur Aggregation einzelner Bodenfunktionen zu einem Bodenindex. Für ein bestimmtes Gebiet mag sich für den Kanton die Frage stellen, welche Flächen sich am besten für die landwirtschaftliche Nutzung beziehungsweise als Biodiversitätsflächen eignen. In einem anderen Gebiet kann die Regulierungsfunktion der Böden für die Ausweisung von Grundwasserschutzzonen im Vordergrund stehen. Hierbei ist zu beachten, dass die pedologische Bewertung des Bodens vor allem über die einzelnen Bodenfunktionen in die Gesamtbewertung zu einem Index einfließt (siehe Anhang B). Beispielsweise bilden Themenkarten zum Wasserspeichervermögen der Böden oder zur landwirtschaftlichen Nutzungseignung eines Bodens die Grundlagen für die Erstellung eines Indexes.

Wie und welche Bodenfunktionen zu einem Index aggregiert werden sollen, hängt stark von gesellschaftlichen Fragestellungen ab und erfordert einen partizipativen Prozess mit allen beteiligten Akteur:innen (sanu durabilitas 2025). In diesem Prozess muss geklärt werden, welche Bodenfunktionen zur Beantwortung der Fragestellung verwendet werden sollen und wie die ausgewählten Bodenfunktionen gewichtet bzw. zu einem Index aggregiert werden sollen. Je klarer diese Fragen im Vorfeld einer Bewertung der Bodenqualität beantwortet werden, desto gezielter kann ein entsprechender Index erstellt werden. Feldwisch und Balla (2007) postulieren, dass *«... je stärker Bodenfunktionen zusammengefasst werden, desto stärker dominieren Wertungsfragen gegenüber Sachfragen»*. Werden Bodenfunktionen zu einem Bodenqualitätsindex aggregiert, basiert dies auf Werthaltungen. Je klarer die Werthaltungen in dem Entscheidungsprozess sind, desto passender können die Bodenfunktionen und die Aggregationsmethode gewählt werden.

## 9. Schlussfolgerung und Ausblick

### Projektorganisation und Kommunikation

Der Kanton und das KOBO haben für die Bodenkartierung in Lommis umfangreiche Kommunikationsmassnahmen umgesetzt. Eine offene und umfassende Kommunikation mit allen beteiligten Akteur:innen ist eine wichtige Voraussetzung für das erfolgreiche Durchführen eines Kartierprojekts. Bereits vor Beginn des Projekts ist eine frühzeitige Einbeziehung aller Akteur:innen grundlegend. Die Projektorganisation lag beim Amt für Umwelt des Kantons Thurgau. Für die Projektarbeit auf Seiten des Kantons sind vor allem Arbeitsspitzen für die Projektvorbereitung und in der Konzeptphase einzuplanen. Dies umfasst unter anderem die Ausschreibung und Auftragsvergabe der Feldarbeiten an Ingenieurbüros, die Beschaffung von kantonalen Grundlagenkarten (u. a. von Leitungsplänen) und die Bereitstellung von vorhandenen Bodeninformationen. Dazu zählen auch die Vorbereitung der Informationsveranstaltungen für Landwirt:innen, Förster:innen und Gemeinde. Für all diese Aufgaben ist es notwendig, dass der Kanton eine Fachperson im zuständigen kantonalen Fachamt mit den dafür notwendigen Ressourcen bereitstellt. Im Projekt Lommis konnte dies mit einer Projektassistenz beim Amt für Umwelt des Kantons Thurgau gewährleistet werden. Auf diese Weise konnte eine gute Zusammenarbeit zwischen Kanton, KOBO, Ingenieurbüros und den lokalen Akteur:innen etabliert werden.

### Feldarbeiten

In Lommis wurden wertvolle Erfahrungen für die Zusammenarbeit und Aufgabenteilung mit zwei regionalen Ingenieurbüros gesammelt. Zudem war die direkte Mitwirkung des Kantons für den Know-how-Aufbau des Fachpersonals im Kanton wichtig. Neben dem Eichtag hat das KOBO die Ingenieurbüros in die digitale Erfassung von Bodendaten mit Soildat eingeführt. Zusätzlich hat es neue Routinen für die Qualitätssicherung pedologischer Aufnahmen umgesetzt: So wurden beispielsweise bei den Bohrungen neue Verfahren zur Qualitätssicherung mit einem R-Skript zur Vollständigkeits- und Logikprüfungen getestet. Die Ingenieurbüros konnten mit Hilfe von gezielten Abfragen der Soildat-Datenbank verschiedene Validierungen der erhobenen Punktdaten durchführen. Das KOBO profitierte zudem von den umfangreichen Rück-

meldungen der Ingenieurbüros zu den Abläufen und zu technischen Aspekten. Insgesamt äusseren sich die Büros positiv zum erfolgten Know-how-Aufbau. Sie würdigen auch die gute Aufbereitung der Grundlagen in digitaler Form, so dass die Kartierenden vor Ort jederzeit über alle notwendigen Informationen verfügen konnten.

Die Ingenieurbüros betrachten es allerdings kritisch, dass sie in der Erkundungsphase und Festlegung der Profilstandorte nicht involviert waren. Der Wissensaufbau in der Erkundungsphase wird als essenziell betrachtet. Dies gilt es in weiteren Pilotprojekten zu berücksichtigen. Ein weiterer Kritikpunkt war, dass die Ingenieurbüros die pedologischen Bohrungen nicht in zusammenhängenden Zonen vornehmen konnten. Dieser Umstand war externen Faktoren geschuldet (u. a. Kulturstände, Zeitpunkt der Bewilligungen und automatisierter Probenahme mit dem Bohrsystem). Das KOBO ist bestrebt in künftigen Kartierprojekten, den Ingenieurbüros ein Arbeiten in zusammenhängenden Zonen zu ermöglichen.

Die Erfahrungen mit der Einführung des hierarchischen Beprobungskonzepts waren gut. Weitere Optimierungen zielen darauf ab, mehr Handlungsspielraum für die Wahl der Standorte für die pedologischen Bohrungen (H2) zu schaffen – beispielsweise durch die Ausweisung von möglichen Ausweichflächen im Beprobungskonzept. Daneben sollen zusätzliche H2-Standorte individuell festgelegt werden können. Die Proben für die spektroskopischen Analysen im Labor konnten sehr effizient entnommen werden. Dieser Teilschritt wurde weitgehend unabhängig von den laufenden pedologischen Feldarbeiten durchgeführt.

Je nach Zugänglichkeit und vorhandenen Kulturen konnten etwa 80 bis 100 Proben für spektroskopische Analysen pro Tag entnommen werden. Die Vorgehensweise birgt ein grosses Potenzial, um Bodenproben für Laboranalysen im Feld kosteneffizient zu gewinnen. Weitere Vorteile sind die zeitliche Unabhängigkeit von den eigentlichen pedologischen Arbeiten und die Verfügbarkeit von technischem Personal. Aufgrund dieser ersten positiven Ergebnisse soll der Ansatz mit einer au-

tomatisierten Probenahme mit einem Bohrsystem in einem weiteren Pilotprojekt verfolgt werden. Zudem kann die Logistik vom Feld bis zum Labor und zur Messung noch weiter optimiert werden.

### Labor

Mit spektroskopischen Methoden konnten im Projekt Lommis wichtige Bodeneigenschaften wie pH-Wert, Textur, KAK (inkl. Basensättigung), Kalkgehalt und organische Substanz für drei Tiefenstufen effizient und mit einer hohen Güte bestimmt werden. Diese erfreulichen Resultate lassen sich im Wesentlichen auf die folgenden methodischen Optimierungen zurückführen:

1. Erhöhung auf vier Wiederholungen für die Messungen im mittleren Infrarotbereich,
2. Weiterentwicklung der Qualitätssicherung im Labor für die spektroskopischen Messungen und
3. Verbesserung der Methoden zur Prozessierung und Modellierung der Spektren.

Um diese Vorteile kosteneffizient zu integrieren, sind weitere Optimierungen im Gesamtprozess von der Probenahme bis zur Messung erforderlich.

Ein Nachteil ist der grosse Aufwand, um die Bodenproben im Labor aufzubereiten – also zu trocknen, zu sieben und zu mahlen. Künftig müssen Abläufe eingeführt werden, mit denen die Aufbereitung von Bodenproben im Labor optimiert werden können.

Bodenphysikalische Eigenschaften sind für die Erstellung von vielen Themenkarten unabdingbar, wurden aber bisher aus Zeit- und Kostengründen in Bodenkartierung nicht erhoben. Dies gilt insbesondere für die Wasserretentionskurve, für die (gesättigte) hydraulische Leitfähigkeit, für das Porenvolumen, das Raumgewicht der Gesamtprobe und für die Lagerungsdichte der Feinerde. Im Projekt Lommis wurden im Labor mit neuen Methoden wie HYPROP, WP4C und KSAT der Firma METER-Group gearbeitet. Diese Techniken erlauben es, einige bodenphysikalische Eigenschaften im Labor schneller und präziser als bisher zu messen. Bis solche Messungen im Labor in den Routinebetrieb überführt werden können, sind allerdings weitere Arbeiten im Bereich Probenlogistik erforderlich.

Das Raumgewicht und die Lagerungsdichte wurden im Projekt Lommis an rund 70 Standorten für verschiedene Tiefenstufen bestimmt. Mit einem Bohrsystem, das eine volumenbezogene Probenahme (Hülsen) ermöglicht, zeigten die Ergebnisse der Hülsen systematische Abweichungen gegenüber den Kontrollmethoden. Die mit den Hülsen berechneten Werte können jedoch mit einem empirischen Faktor korrigiert werden. Somit steht für Bodenkartierungen neben der bisherigen Standardmethode mit Zylinderproben eine weitere Methode zur Bestimmung von Raumgewicht und Lagerungsdichte zur Verfügung.

### Kartenerstellung (Regionalisierung)

Mit der räumlichen Modellierung der Bodendaten wurden im Projekt Lommis rund 50 Raster- und Polygonkarten erstellt. Diese stellen Bodeneigenschaften und -kennwerte dar. Für Nutzer:innen ist es besonders vorteilhaft, wenn die räumliche Variation jeder einzelnen Bodeneigenschaft separat kartiert wird. Beispielsweise zeigen die räumlichen Muster einiger Bodeneigenschaften im Gebiet Lommis sowohl in der Fläche als auch in der Tiefe deutliche Unterschiede auf, die mit nur einer (Polygon-) Bodenkarte kaum ersichtlich wären. Je nach Fragestellung können ausgewählte Karten für Bodeneigenschaften und -kennwerte herangezogen und ausgewertet werden. Dies bietet viele Vorteile für Anspruchsgruppen. Gleichzeitig bedeutet dies einen höheren Aufwand für Nutzer:innen, weil sie sich pro Kartierprojekt mit einer grösseren Anzahl an Karten befassen.

Die räumliche Modellierung der Daten erfolgte in mehreren iterativen Stufen mit Hilfe von Verfahren aus dem Bereich des Maschinellen Lernens. In Kombination mit dem hierarchischen Beprobungskonzept und der Beprobungsdichte von rund 4 Standorten pro Hektare waren die Modellgüten (das heisst: die Qualität des Modells) für die Karten der Bodeneigenschaften und -kennwerte durchwegs gut. Welche Beprobungsdichte zukünftig in grossräumigen Bodenkartierungen erforderlich sein wird, um eine (von der Politik) vorgegebene Qualität der Karten zu erzielen, kann zurzeit noch nicht festgelegt werden. Die hohe Beprobungsdichte in Lommis soll für spätere Modellauswertungen weiterer Pilotprojekte in verschiedenen Regionen der Schweiz dienen. Ziel der projektübergreifenden Auswertungen ist es, ein Opti-

mum zwischen möglichst tiefer Beprobungsdichte und hinreichender Qualität der Karten zu erreichen.

Die Regionalisierung der Punktdaten erfolgte in sich wiederholenden Abläufen, da in mehreren Vorgängen zunächst Auswertungen bezüglich Extremwerte durchgeführt und aufeinander aufbauende Modellläufe berechnet wurden. Zudem wurde in jedem Durchgang das Ergebnis der Modellierung statistisch und pedologisch bewertet. In diesem Arbeitsschritt ist eine enge Zusammenarbeit zwischen den Pedolog:innen und den Modellierer:innen erforderlich. Weiter ist in Verbindung mit einer hohen räumlichen Auflösung der Rasterdaten und angesichts einer sehr hohen Anzahl an Kovariablen die räumliche Modellierung rechenintensiv und zeitaufwendig. Allerdings lohnt sich dieser Aufwand, weil die Qualität der finalen Bodenkarten oftmals deutlich erhöht wird. Mit dieser Vorgehensweise kann gewährleistet werden, dass die Karten für Bodeneigenschaften und -kennwerte im multivariaten Raum abgestimmt und konsistent sind. Dieser Schritt ist leicht übertragbar auf die Kartierung grossräumiger Gebiete. Für grössere Gebiete ist der Zeitaufwand kaum grösser, lediglich der Bedarf an Rechenkapazität steigt.

### **Themenkarten**

Themenkarten entstehen aus Bodenkarten und sind für verschiedene Gruppen von Nutzer:innen aufbereitet. So stehen sie als Entscheidungsgrundlagen für Verwaltung, Planung und Beratung zur Verfügung. Themenkarten bieten einen hohen Mehrwert für Gesellschaft und Umwelt. Für das Gebiet in Lommis wurden rund 25 Themenkarten für die folgenden Bereiche erstellt:

- \_ Gewässer- und Grundwasserschutz,
- \_ Klimaschutz, Landwirtschaft,
- \_ Naturschutz,
- \_ Raumplanung,
- \_ Trockenheit und Forstwirtschaft.

Die erforderlichen Bodendaten zur Erstellung dieser Themenkarten wurden von Beginn an mit den Feldarbeiten und der Kartenstellung abgestimmt. Hierzu wurde der minimale Datensatz gemäss Kartieranleitung KA23 erweitert. Im Anhang des vorliegenden Fachberichts findet sich eine ausführliche Methodendokumentation zu allen Themenkarten. Die Themenkarten dienen als Arbeitsgrundlage und sollen in kommenden Pilotprojekten gemeinsam mit Kantonen und weiteren Gruppen von Nutzer:innen auf ihre Praxistauglichkeit hin weiterentwickelt werden. Ein aktiver Dialog mit den beteiligten Akteur:innen ist dabei zentral.

Die Bodenqualitätsindexe für die Raumplanung stellen Spezialfälle von Themenkarten dar. Jeder Bodenqualitätsindex stellt methodisch eine Bewertung von ausgewählten Bodenfunktionen dar und kann als ein (aggregierter) Index für die Bodenqualität verstanden werden. International wurden verschiedene Methoden entwickelt. Die Gegenüberstellung dieser Methoden für Lommis zeigt deutlich, wie unterschiedlich die Indexe ausfallen können. Die Bewertung der Bodenqualität hängt stark von den jeweiligen Nutzungsinteressen und den gewählten Bewertungsregeln ab. Die Auswahl und Gewichtung von Bodenfunktionen zu einem Bodenqualitätsindex stellen einen gesellschaftlich-politischen Prozess dar. Die Bodenkartierung liefert mit den Karten für Bodenfunktionen die fachlichen Grundlagen dafür.

# 10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bodeninformationen können einen Mehrwert in vielen Themengebieten erzeugen. Bodeneigenschaften haben einen grossen Einfluss auf die im Boden ablaufenden Prozesse und somit auf die Leistungen des Bodens (Produktionsfunktion, Regulierungsfunktion, Habitatfunktion). Sowohl die Leistungen des Bodens als auch die Risiken für Bodengefährdungen gilt es in geeigneten Themenkarten den verschiedenen Nutzergruppen zu kommunizieren.	8
Abbildung 2: Projektperimeter des KOBO-Pilotprojekts in Lommis (Hintergrundkarte: Landeskarte farbig von swisstopo.ch).	9
Abbildung 3: Kartierablauf in drei Phasen: 1) Projektvorbereitung und Konzeptphase, 2) Kartierung mit Feldarbeit und Erstellung Grundlagenkarten, 3) Auswertung und Produkte.	11
Abbildung 4: Zeitlicher Ablauf der begleitenden Kommunikationsmassnahmen im Projekt Lommis.	13
Abbildung 5: Massnahmen zur Kommunikation im Kartierprojekt in Lommis (TG): Infoanlass in der Gemeinde Lommis mit Infotafeln für die mündliche Einführung in das Projekt sowie Abschlussanlass für Gemeinde und Landwirte mit Präsentation der Ergebnisse (oben links und rechts); Ausstellung für Böden und Bodenkartierung an der AgriEmotion 2023 sowie kantonaler Informationsanlass für lokale Medien im Kanton TG (unten links und rechts). Quelle: KOBO.	14
Abbildung 6: Auszug aus der Geologischen Übersichtskarte (Kanton Thurgau, Amt für Geoinformation). Der Projektperimeter ist in schwarzer Farbe dargestellt.	17
Abbildung 7: Hauptkulturen im Projektgebiet im Jahr 2022.	18
Abbildung 8: Auszug aus dem Topographischen Atlas der Schweiz (Siegfriedkarte) (Bundesamt für Landestopografie swisstopo), Erstausgabe von 1880. Der Projektperimeter ist in schwarz dargestellt.	19
Abbildung 9: Vergleich von Luft- und Drohnenbildern aus verschiedenen Zeitperioden geben Hinweise auf ehemalige Wege und Flussläufe. (Quelle: B. Stricker, Dr. Roland Wyss GmbH).	20
Abbildung 10: Bodenkartierung in Lommis: multiskalige Relieffanalyse am Beispiel der Oberflächenrauheit («Ruggedness»; oben), der planaren Krümmung («Plan curvature»; mittig) und der Abflusskonvergenz («Convergence»; unten) für die Skalen 8 m, 64 m und 272 m.	22
Abbildung 11: Bodenkartierung in Lommis: Vegetations- und Landnutzungsanalyse am Beispiel des monatlichen Vegetationszustandes als Mittelwert über die Jahre 2018 bis 2022. Die abgebildete Zeitreihe basiert auf dem Spektralindex «NDVI» (Normalized Difference Vegetation Index) der Sentinel-2-Satellitendaten.	23
Abbildung 12: Bodenkartierung in Lommis: Vegetations- und Landnutzungsanalyse am Beispiel der jährlichen Variabilität des Vegetationszustandes als Mittelwert über die Jahre 2018 bis 2022 («NDVI: Annual variability 2018–2022») und am Beispiel der Abweichung des Vegetationszustandes vom langjährigen Mittel für die Monate Mai («NDVI: Anomaly May 2022») und September («NDVI: Anomaly September 2022») des Jahres 2022. Als Datengrundlage dienen Zeitreihen des Spektralindex «NDVI» (Normalized Difference Vegetation Index) basierend auf Sentinel-2-Satellitendaten.	24
Abbildung 13: Bodenkartierung in Lommis: Spektrale Bodenlandschaftsanalyse des unbedeckten Bodens am Beispiel über 37 Jahre gemittelter Landsat-Spektralkanäle «BLUE», «GREEN», «RED», «NIR», «SWIR1» und «SWIR2».	25

Abbildung 14: Indikative Bodeneigenschaftskarten am Beispiel der Tiefenstufe 0–30 cm und den Bodeneigenschaften Tongehalt («Clay content»), Schluffgehalt («Silt content»), Sandgehalt («Sand content»), pH-Wert («pH»), organischer Kohlenstoffgehalt («SOC») und potenzielle Kationenaustauschkapazität («CECpot»).	26
Abbildung 15: Bodenkartierung in Lommis: Bereinigter Projektperimeter und räumlicher Puffer für Strassen, Gebäude, Leitungen und Drainagesysteme.	27
Abbildung 16: Hierarchisches Beprobungskonzept im Kartierprojekt in Lommis. Das «H» steht dabei für die Hierarchiestufe und die Zahlen 1–3 geben die Hierarchiestufe an. An den Profilen (H1) wird ein umfangreicher minimaler Datensatz erhoben, an Bohrungen (H2) ein reduzierter Pedologie-Datensatz und an H3-Standorten nur Bodenproben. Die Beprobungsdichte hingegen ist für H3 gross (1–3/ha) und nimmt für H2 (1/ha) und H1 (0.03–0.05/ha) ab.	28
Abbildung 17: Lage der Profilstandorte (H1). Es wurden 17 Landwirtschaftsprofile und 2 Waldprofile beschrieben.	29
Abbildung 18: Lage der Standorte für pedologische Bohrungen (H2). Es wurden 242 Bohrungen in der Landwirtschaft und 22 Bohrungen im Wald aufgenommen.	30
Abbildung 19: Lage der Bohrungen mit automatisierter Probenahme für spektroskopische Messungen im Labor (H3). Es wurden 745 Standorte in der Landwirtschaft und 66 Standorte im Wald beprobt.	30
Abbildung 20: Versionierung der Lage der Profilstandorte während der Erkundungsphase.	31
Abbildung 21: Iteration für die Festlegung der Profilstandorte anhand zweier Standorte. Oben: Punkt 1: erster Vorschlag gemäss Beprobungskonzept; Punkt 2: zweiter Vorschlag gemäss erster Begehung; Punkt 3: finale Lage des Profils gemäss zweiter Begehung und Prüfung auf Machbarkeit und hinsichtlich Einwilligung der Bewirtschafter:innen. Unten: Punkt 1: erster Vorschlag gemäss Beprobungskonzept; Punkt 2: Vorschlag nach Begehung und finaler Standort, da die Bewirtschafterin mit den Standort einverstanden war.	32
Abbildung 22: Punkt-QS Ablauf bei den Bodenprofilen und farbliche Darstellung der jeweiligen Zuständigkeiten.	34
Abbildung 23: Punkt-QS Ablauf bei den pedologischen Bohrungen und farbliche Darstellung der jeweiligen Zuständigkeiten.	35
Abbildung 25: Bodenprofil P03 ( Regosol). Die Angaben zur Körnung, zum Humus, zum pH-Wert und zum Kalk sind Laboranalysen. Die Skelettgehalte stellen Feldschätzungen dar.	37
Abbildung 24: Lage des Profils P03.	37
Abbildung 26: Spinnendiagramm mit ausgewählten Bewertungen für das Bodenprofil P03 (Regosol). Die Skalen der unterschiedlichen Bewertungsmethoden wurden normiert (0 = minimales Potenzial oder minimale Eignung, 1 = maximales Potenzial oder maximale Eignung).	38
Abbildung 28: Bodenprofil P08 (Kalkbraunerde). Die Angaben zur Körnung, zum Humus, zum pH-Wert und zum Kalk sind Laboranalysen. Die Skelettgehalte stellen Feldschätzungen dar.	39
Abbildung 27: Lage des Profils P08.	39

Abbildung 29: Spinnendiagramm mit ausgewählten Bewertungen für das Bodenprofil P08 (Kalkbraunerde). Die Skalen der unterschiedlichen Bewertungsmethoden wurden normiert (0 = minimales Potenzial oder minimale Eignung, 1 = maximales Potenzial oder maximale Eignung).	40
Abbildung 31: Bodenprofil P12 (Braunerde). Die Angaben zur Körnung, zum Humus, zum pH-Wert, KAK und zum Kalk sind Laboranalysen. Die Skelettgehalte stellen Feldschätzungen dar.	41
Abbildung 30: Lage des Profils P12.	41
Abbildung 32: Spinnendiagramm mit ausgewählten Bewertungen für das Bodenprofil P12 (Braunerde). Die Skalen der unterschiedlichen Bewertungsmethoden wurden normiert (0 = minimales Potenzial oder minimale Eignung, 1 = maximales Potenzial oder maximale Eignung).	42
Abbildung 34: Bodenprofil P13 (Buntgley). Die Angaben zur Körnung, zum Humus, zum pH-Wert und zum Kalk sind Laboranalysen. Die Skelettgehalte stellen Feldschätzungen dar.	43
Abbildung 33: Lage des Profils P13.	43
Abbildung 35: Spinnendiagramm mit ausgewählten Bewertungen für das Bodenprofil P13 (Buntgley). Die Skalen der unterschiedlichen Bewertungsmethoden wurden normiert (0 = minimales Potenzial oder minimale Eignung, 1 = maximales Potenzial oder maximale Eignung).	44
Abbildung 37: Bodenprofil P16 (Fahlgley). Die Angaben zur Körnung, zum Humus, zum pH-Wert und zum Kalk sind Laboranalysen. Die Skelettgehalte stellen Feldschätzungen dar.	45
Abbildung 36: Lage des Profils P16.	45
Abbildung 38: Spinnendiagramm mit ausgewählten Bewertungen für das Bodenprofil P16 (Fahlgley). Die Skalen der unterschiedlichen Bewertungsmethoden wurden normiert (0 = minimales Potenzial oder minimale Eignung, 1 = maximales Potenzial oder maximale Eignung).	46
Abbildung 40: Bodenprofil P20 (Parabraunerde). Die Angaben zur Körnung, zum Humus, zum pH-Wert, KAK und zum Kalk sind Laboranalysen. Die Skelettgehalte stellen Feldschätzungen dar.	47
Abbildung 39: Lage des Profils P20.	47
Abbildung 41: Spinnendiagramm mit ausgewählten Auswertungen zum Waldbodenprofil P20 (Parabraunerde). Die Skalen der unterschiedlichen Bewertungsmethoden wurden normiert (0 = minimales Potenzial oder minimale Eignung, 1 = maximales Potenzial oder maximale Eignung).	48
Abbildung 42: Bohrfahrzeug (Aebi TT75) und Bohrturm für die H2-Standorte im Kartierprojekt Lommis (links), sowie die Hülsen, die aufgeschnitten wurden, zur bodenkundlichen Beschreibung und Klassifikation der Böden (rechts).	49
Abbildung 43: Relative Häufigkeiten der Bodentypen im Projektgebiet Lommis, farblich dargestellt nach den Wasserhaushaltsklassen WHK (Anzahl Beobachtungen n = 292, davon n = 19 Profile).	50

Abbildung 44: Histogramm der pflanzennutzbaren Gründigkeit (pnG) im Projektgebiet Lommis (die X-Achse gibt die Klassengrenzen der pnG an: 0–10 cm = sehr flachgründig, 10–30 cm = flachgründig, 30–50 cm = ziemlich flachgründig, 50–70 cm = mässig tiefgründig, 70–100 cm = tiefgründig, > 100 cm = sehr tiefgründig).	51
Abbildung 45: H2-Bohrung B238: sehr flachgründiges, extrem gleyiges, sehr stark grundnasses, tieftorfiges Halbmoor (pnG 9 cm, Bohrkern 120 cm).	51
Abbildung 46: H2-Bohrung B71: sehr tiefgründige, grundfeuchte, kolluviale, drainierte Braunerde (pnG 108 cm, Bohrkern 120 cm).	51
Abbildung 47: Körnungsdiagramme der Horizontdaten für die drei Bodenbereiche OB = Oberboden, UB = Unterboden, UG = Untergrund (N: Anzahl der Horizonte im jeweiligen Bodenbereich).	53
Abbildung 48: Links: Körnungsdiagramme der Horizontdaten für den Bodenbereich Untergrund in unterschiedlichen Ausgangsmaterialien. Die Anzahl der Horizonte ist in der Legende des Dreiecks mit N angegeben. Rechts: Fotoausschnitt der Bohrung B243 mit tonigem Untergrund.	53
Abbildung 49: Bohrgerät Wintex MCL3 der Firma WintexAgro zur automatisierten Probenahme von Bodenproben.	54
Abbildung 50: Übersichtskarte der chemischen, physikalischen und biologischen Analysen im Projektperimeter von Lommis.	55
Abbildung 51: Ansicht der HYPROP-Geräte zur Messung der Wasser-retentionskurve im «feuchten» Bereich (oben), des WP4C zur Messung im «trockenen» Bereich (unten links) sowie der KSAT-Geräte zur Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (unten rechts).	57
Abbildung 52: Wasserretentionskurve (links) und hydraulische Leitfähigkeit (rechts) für den Ah <sub>p</sub> -Horizont von Bodenprofil 12 (Tiefe Zylinder 12–17 cm). Der pF-Wert ist der dekadische Logarithmus der Saugspannung in hPa. Messpunkte im gesättigten Bereich (pF < 0.1) stammen vom KSAT-System, im feuchten Bereich (pF 1–3.5) vom System HYPROP und im trockenen Bereich (pF > 4) vom System WP4C.	58
Abbildung 53: Wasserretentionskurve (links) und hydraulische Leitfähigkeit (rechts) für den C <sub>1,g</sub> -Horizont von Bodenprofil 12 (Tiefe Zylinder 60–65 cm). Der pF-Wert ist der dekadische Logarithmus der Saugspannung in hPa. Messpunkte im gesättigten Bereich (pF < 0.1) stammen vom KSAT-System, im feuchten Bereich (pF 1–3.5) vom System HYPROP und im trockenen Bereich (pF > 4) vom System WP4C.	58
Abbildung 54: Direktvergleich Raumgewicht Hülsenproben mit 5 cm und 8 cm Durchmesser.	59
Abbildung 55: Vergleich der Lagerungsdichte Feinerde bestimmt mit 8 cm Hülsen und 100 ml Zylinderproben (links); Korrigierte Lagerungsdichte der 8 cm Hülsenproben und Lagerungsdichte bestimmt mit 100 ml Zylinderproben (Korrekturfaktor: 1.165).	60
Abbildung 56: Regenwurmbiomasse an den Standorten der Profile 4, 8, 11 und 17. Dargestellt werden jeweils die Summen aus Senfextraktion und Handauslese für drei Wiederholungen pro Profil (für Profil 4 fehlt eine Handauslese, weshalb nur zwei Wiederholungen dargestellt sind). Oben: Gesamtgewicht aller Würmer in g/m <sup>2</sup> . Unten: Gesamtanzahl der Würmer.	61
Abbildung 57: Verteilung der ökologischen Gruppen der Regenwürmer pro Profil, differenziert nach Anzahl (oben) und Gewicht (unten). Es wurde jeweils die Summe aus der Senfextraktion und der Handauslese von drei Wiederholungen gemittelt (bei Profil 4 mit 2 Wiederholungen).	61

Abbildung 58: Qualität der Kalibrierungsmodelle der MIR-Spektren auf die mit Referenzanalysen gemessenen Bodeneigenschaften. Dargestellt sind die Kreuzvalidierungsgüten der spektralen Modelle.	64
Abbildung 59: Regionalisierte Karte der Tongehalte für 3 Tiefenstufen: 0–30 cm, 30–60 cm, 60–90 cm Tiefe.	67
Abbildung 60: Regionalisierte Karte der Corg-Gehalte für 3 Tiefenstufen: 0–30 cm, 30–60 cm, 60–90 cm Tiefe.	69
Abbildung 61: Regionalisierte Karte der pH-(CaCl <sub>2</sub> ) Werte für die Tiefenstufe 0–30 cm.	70
Abbildung 62: Kationenaustauschkapazität für Tiefenstufe 60–90 cm (in mmol/kg).	70
Abbildung 63: Bodentypen nach FAL24.	72
Abbildung 64: I-Untertyp (Staunässe) nach FAL24.	72
Abbildung 65: G-Untertyp (Grund- und Hangnässe) nach FAL24.	73
Abbildung 67: Pflanzennutzbare Gründigkeit pnG (cm) nach FAL24.	73
Abbildung 66: Wasserhaushaltsgruppen nach FAL24.	73
Abbildung 68: Bewässerungseignung des Bodens nach der Methode von Presler und Bagnoud (2013).	76
Abbildung 69: Bewässerungsbedürftigkeit von Winterweizen unter den Bedingungen der Klimanormalperiode 1991–2020 nach der Methode von Müller et al. (2012).	76
Abbildung 70: Kohlenstoffvorrat im Oberboden (0–30 cm, t/ha).	77
Abbildung 71: Potenzial des Bodens zur Anreicherung von Kohlenstoff in Form von stabilen Ton-Humus-Komplexen im Oberboden (0–30 cm) nach der Methode von Johannes et al (2017).	78
Abbildung 72: Feuchtstandortpotenzial nach der Methode von Vögeli et al. (2022). 100 Punkte entsprechen einem maximalen Potenzial für Feuchtstandorte, 0 Punkte erhalten Standorte ohne Potenzial.	80
Abbildung 73: Trockenstandortpotenzial nach der Methode von Lienhard und Merkel (2002). 100 Punkte entsprechen einem maximalen Potenzial für Trockenstandorte, 0 Punkte erhalten Standorte ohne Potenzial.	81
Abbildung 74: Erstellung von Bodenqualitätsindizes nach den Methoden von Miller et al. (2022), Hilbert et al. (2021), Engel und Stadtmann (2020), Angelini et al. (2023) und Knoll et al. (2010). Letztere ist nicht für Waldböden geeignet.	84

# 11. Tabellenverzeichnis

<p>Tabelle 1: Übersichtstabelle über die verschiedenen Hierarchiestufen. LW = Landwirtschaftsgebiet; WA = Wald. Der Projektperimeter umfasste 278 ha (256 ha LW und 22 ha WA).</p>	33
<p>Tabelle 2: Übersichtstabelle der für die deskriptive Statistik berücksichtigten pedologischen Aufnahmen.</p>	50
<p>Tabelle 3: Deskriptive Statistik des Horizontdatensatzes für alle Oberbodenhorizonte (= Bodenbereich OB). Es handelt sich ausschliesslich um Feldschätzungen.</p>	52
<p>Tabelle 4: Deskriptive Statistik des Horizontdatensatzes für alle Unterbodenhorizonte (= Bodenbereich UB). Es handelt sich ausschliesslich um Feldschätzungen.</p>	52
<p>Tabelle 5: Deskriptive Statistik des Horizontdatensatzes für alle Untergrundhorizonte (= Bodenbereich UG). Es handelt sich ausschliesslich um Feldschätzungen.</p>	52
<p>Tabelle 6: Übersicht der Standorte und chemisch-, physikalisch- und biologischen Bodenanalysen im Projektgebiet Lommis.</p>	56
<p>Tabelle 7: Definition und Berechnung Raumbgewicht (RG), Skelettgehalt (S) und Lagerungsdichte (LD). (V: Volumen; G: gesamte Probe; TS: Trockengewicht der Probe).</p>	59
<p>Tabelle 8: Liste der Karten für Bodeneigenschaften im Projekt Lommis. Alle Karten finden sich im Anhang A7.</p>	65
<p>Tabelle 9: Modellierte Karten der pedologischen Kenngrössen. Alle Karten sind im Anhang A8 verfügbar.</p>	71
<p>Tabelle 10: Themenkarten im Pilotprojekt Lommis. Die fett markierten Themenkarten werden in diesem Bericht ausführlicher dargestellt. Eine Methodendokumentation inklusive Darstellung der Karte ist für alle hier aufgeführten Themenkarten im Anhang B verfügbar.</p>	74
<p>Tabelle 11: Fünf internationale Methoden zur Erstellung eines Bodenqualitätsindizes: es wird aufgelistet, welche Bodenfunktionen in den Methoden für die Erstellung von einem Index berücksichtigt wurden. Einige der Methoden berücksichtigen die Archivfunktion (Kulturgeschichte), diese war für Lommis nicht vorhanden. Die Methoden sind im Detail im Anhang B dokumentiert.</p>	83

## 12. Anhang A

Der Anhang A besteht aus folgenden Kapiteln. Er ist auf der KOBO-Webseite [über folgenden Link](#) verfügbar.

- \_ A1 Minimaler Datensatz Pedologie
  - 1.1 Minimaler Datensatz Profile (H1)
  - 1.2 Minimaler Datensatz pedologische Bohrungen (H2)
- \_ A2 Eichprotokoll für das Pilotprojekt Lommis
- \_ A3 Validierungsregeln Qualitätssicherung am Punkt (Punkt-QS)
- \_ A4 Profilbeschreibungen (Export aus Soildat)
- \_ A5 Steckbriefe der Profile
- \_ A6 Laboranalysen
- \_ A7 Kartenerstellung: Bodeneigenschaften für Tiefenstufen
- \_ A8 Kartenerstellung: pedologische Kenngrößen

## 13. Anhang B

Der Anhang B dokumentiert die im Projekt Lommis erstellten Themenkarten (siehe Tabelle unten).  
Der Anhang B ist auf der KOBO-Webseite [über folgenden Link](#) verfügbar.

Themenkarte	Quelle	Themengebiet
Bindungs- und Abbauvermögen für Schadstoffe	Bechler und Toth 2010	Gewässer- / Grundwasserschutz
Bindungsvermögen für Schwermetalle	DVWK 1988	Gewässer- / Grundwasserschutz
Nährstoffrückhalt gegenüber Sicker- und Abschwemmverlusten	Jäggli et al. 1998	Gewässer- / Grundwasserschutz
Wasserhaushalt (Regulierungsfunktion)	Danner et al. 2003	Hochwasserschutz
<b>Kohlenstoffanreicherungspotenzial</b>	Johannes et al. 2017	Klimaschutz
<b>Kohlenstoffvorrat</b>	Keller et al. 2023	Klimaschutz
Kühlpotenzial	Feldwisch 2016	Klimaschutz
Stickstoffnachlieferungspotenzial	Flisch et al. 2017	Landwirtschaft
Kalkdüngungsbedarf	VDLUF 2000	Landwirtschaft
Kalkungsbedarf	Flisch et al. 2017	Landwirtschaft
Korrekturfaktor Boden bei der Stickstoff-Normdüngung	Sinaj et al. 2018	Landwirtschaft
Nährstoffverfügbarkeit (Regulierungsfunktion)	Lehmann et al. 2013	Landwirtschaft
<b>Feuchtstandortpotenzial</b>	Vögeli et al. 2022	Naturschutz
Lebensraumfunktion für Mikroorganismen	Oberholzer und Scheid 2007	Naturschutz
Standortpotenzial für Extrempflanzengesellschaften	Siemer et al. 2014	Naturschutz
<b>Trockenstandortpotenzial</b>	Lienhard und Merkel 2002	Naturschutz
<b>Bodenqualitätsindex</b>	Angelini et al. 2023	Raumplanung
<b>Bodenqualitätsindex</b>	Engel und Stadtmann 2020	Raumplanung
<b>Bodenqualitätsindex</b>	Hilbert et al. 2021	Raumplanung
<b>Bodenqualitätsindex</b>	Knoll et al. 2010	Raumplanung
<b>Bodenqualitätsindex</b>	Miller et al. 2022	Raumplanung
Landwirtschaftliche Nutzungseignung NEK-2023	Greiner et al. 2023	Raumplanung
<b>Bewässerungseignung</b>	Pressler und Bagnoud 2013	Trockenheit
<b>Potenzielle Bewässerungsbedürftigkeit</b>	Müller et al. 2012	Trockenheit
Säurestatus	Zimmermann 2011	Wald und Forst

# 14. Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Erklärung
AMS-Sensor	Spektralsensor der Firma AMS, der das Spektrum im sichtbaren Bereich erfasst.
DSM	Digital Soil Mapping
KA	FAL24-Kartieranleitung: Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz (FAL)
ksat	Gesättigte Wasserleitfähigkeit
H1-Standorte	1. Ebene des hierarchischen Beprobungskonzepts: Profilstandorte
H2-Standorte	2. Ebene des hierarchischen Beprobungskonzepts: Pedologische Bohrungen mit dem Bohrfahrzeug (maschinelle Bohrung)
H3-Standorte	3. Ebene des hierarchischen Beprobungskonzepts: Probenahmen für spektroskopische Messungen im Labor
KOBO	Kompetenzzentrum Boden
KAK	Kationenaustauschkapazität
MIR	MIR ist die Abkürzung für Mid-Infrarot. Die MIR-Spektroskopie arbeitet mit Licht zwischen 5–25 µm Wellenlänge.
NABODAT	nationales Bodeninformationssystem (wird betreut durch die «Servicestelle NABODAT»)
NIR	NIR ist die Abkürzung für Nahinfrarot. Die NIR-Spektroskopie arbeitet mit Licht zwischen ca. 0,7–1,4 µm Wellenlänge und liegt damit zwischen dem sichtbaren Spektralbereich und dem mittleren Infrarot.
nFK	Nutzbare Feldkapazität
ODK	Open Data Kit: Ein Erfassungstool, das Benutzer:innen ermöglicht, Formulare offline auszufüllen und Formulardaten an einen Server zu senden, wenn eine Verbindung gefunden wird.
pnG	Pflanzennutzbare Gründigkeit
Soildat	Soildat ist eine Web-Applikation für die Erfassung von Bodenpunktdaten (Profile & Bohrungen) direkt im Feld mit mobilen Geräten.
TDR	Time-Domain-Reflectometry: Messmethode zur Bestimmung des volumetrischen Wassergehalts im Boden.
WHK	Wasserhaushaltsklasse

## 15. Literaturverzeichnis

- \_ Acton DF, Padbury GA, 1993. A program to assess and monitor soil quality in Canada. Soil quality valuation program summary. A conceptual framework for soil quality assessment and monitoring.
- \_ AFU Solothurn (Hrsg.) 2020. Projekthandbuch Kanton Solothurn: KARTIER-METHODIK, Teil III, Kartiermethode FAL24+ (6. Auflage.). 45 S.
- \_ Angelini ME, Heuvelink GBM, Lagacherie P, 2023. A multivariate approach for mapping a soil quality index and its uncertainty in southern France. *European Journal of Soil Science*, 74 (2), e13345. <https://doi.org/10.1111/ejss.13345>
- \_ Anthony MA, Bender SF, Van Der Heijden MGA, 2023. Enumerating soil biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120 (33), e2304663120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2304663120>
- \_ BAFU, 2012. Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer: Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen.
- \_ BAFU, 2019. Liste der National Prioritären Arten und Lebensräume. Umwelt-Vollzug, (1709), 99.
- \_ Bechler K, Toth O, 2010. Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit. Leitfaden für Planungen und Gestattungsverfahren. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Band 23. Karlsruhe.
- \_ Behrens T, Viscarra Rossel RA, Ramirez-Lopez L, Baumann P, 2022. Soil spectroscopy with the Gaussian pyramid scale space. *Geoderma*, 426, 116095, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706122004025>
- \_ 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](http://www.ccsols.ch)
- \_ Behrens, T., Schmidt, K., Rossel, R.A., Gries, P., Scholten, T., MacMillan, R.A. 2017. Spatial modelling with Euclidean distance fields and machine learning. *Eur J Soil Sci.*69/5.
- \_ Behrens T., K. Schmidt, A. Keller. 2017. Factsheets Digital Soil Mapping. Im Auftrag Bundesamt für Umwelt (BAFU). 3003 Bern. S. 29. (verfügbar unter [www.ccsols.ch](http://www.ccsols.ch))
- \_ Behrens T, Schmidt K, MacMillan RA, Viscarra Rossel RA, 2018. Multi-scale digital soil mapping with deep learning. *Scientific reports*, 8 (1), 15244.
- \_ BGS, 2010. Klassifikation der Böden der Schweiz Bodenprofiluntersuchung, Klassifikationssystem, Definitionen der Begriffe, Anwendungsbeispiele. (3. Auflage), S. 93.
- \_ Breiman, L., 2001. Random forests. *Mach. Learn.* 45, 5–32.
- \_ Bünemann EK, Bongiorno G, Bai Z, Creamer RE, Deyn G, Goede R, Fleskens L, Geissen V, Kuyper TW, Mäder P, et al., 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biology & Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.SOIL-BIO.2018.01.030>
- \_ Calanca P, Wüst-Galley C, Giuliani S, Erdin D, 2022. Auswirkungen der Trockenheit auf die Produktivität des Schweizer Grünlands. *Agrarforschung Schweiz*, (13), 135–144. <https://doi.org/10.34776/AFS13-135>
- \_ Campiche S. 2022. Biologische Bodeneigenschaften – Recherche zum Stand der Technik von Methoden und Geräten zur Bestimmung: Teil Bodenfauna, KOBO-Bericht Nr. 2, HAFL, CH-3052 Zollikofen-Bern, verfügbar unter [www.ccsols.ch](http://www.ccsols.ch)

- \_ Chen et al. 2022. Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at broad scale: A review. *Geoderma* 409, 115567.
- \_ Cuendet G., R. Stähli, E. Suter. 1997. Die Regenwurm-Fauna von Dauergrünland des Schweizer Mittellandes. Schriftenreihe Umwelt Nr. 291. BUWAL. Bern.
- \_ Danner C, Henshold C, Weidenhammer S, Aussendorf M, Kraft M, Weidenbacher A, Kölling C, 2003. Das Schutzgut Boden in der Planung. Bewertung natürlicher Bodenfunktionen und Umsetzung in Planungs- und Genehmigungsverfahren. Landesamt BG, für Umweltschutz BL (Hrsg.).
- \_ Deane-Mayer, Z. A., 2023. caretEnsemble: Ensembles of Caret Models. R package version 2.0.3. URL <https://CRAN.R-project.org/package=caretEnsemble>.
- \_ Drobniak T, Grêt-Regamey A, Zelger I, Tobler G, Reinhard K, Iseli M, 2020. Integration von Informationen zur Bodenqualität in die Raumplanung: Synthesericht im Auftrag der Bundesämter für Umwelt (BAFU) und für Raumentwicklung (ARE).
- \_ DVWK, 1988. Filtereigenschaften des Bodens gegenüber Schadstoffen. Teil I: Beurteilung der Fähigkeit von Böden, zugeführte Schwermetalle zu immobilisieren. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft.
- \_ Engel N, Stadtmann R, 2020. Bodenfunktionsbewertung auf regionaler und kommunaler Ebene: Ein niedersächsischer Leitfaden für die Berücksichtigung der Belange des vorsorgenden Bodenschutzes in der räumlichen Planung. 5,51 MB. [https://doi.org/10.48476/GEOBER\\_26\\_2020](https://doi.org/10.48476/GEOBER_26_2020)
- \_ Fabian Y, Roberti G, Jacot K, Gramlich A, Benz R, Szerencsits E, Churko G, Prasuhn V, Leifeld J, Zorn A, et al., 2022. Die Nutzung von vernässenden Ackerflächen neu denken: Synthese des Projektes «Feucht(Acker)Flächen». Abgerufen am 15.04.2024, <https://doi.org/10.34776/AFS13-198G>
- \_ FAL 1997. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz (Hrsg.), 1997. Kartieranleitung Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. 175 S.
- \_ Feeney C.F., L.Bentley, D. De Rosa, P. Panagos, B. A. Emmett, A. Thomas, D.A. Robinson. 2024. Bench-marking soil organic carbon (SOC) concentration provides more robust soil health assessment than the SOC/clay ratio at European scale. *Science of the Total Environment*. 951: 175642. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175642>
- \_ Feldwisch N, 2016. Planung mit Tiefgang. Vorsorgender Bodenschutz: Wissen für die Praxis. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. [https://landwirtschaft.hessen.de/sites/landwirtschaft.hessen.de/files/2021-09/vorsorgender\\_bodenschutz\\_wissen\\_fuer\\_entscheider.pdf](https://landwirtschaft.hessen.de/sites/landwirtschaft.hessen.de/files/2021-09/vorsorgender_bodenschutz_wissen_fuer_entscheider.pdf)
- \_ Feldwisch N, Balla S, 2007. Orientierungsrahmen zur zusammenfassenden Bewertung von Bodenfunktionen. Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), (1), 5. <https://doi.org/10.37307/j.1868-7741.2007.01.05>
- \_ Flisch R, Neuweiler R, Kuster T, Oberholzer H, Huguenin-Elie O, Richner W, 2017. Bodeneigenschaften und Bodenanalysen. Grundlagen der Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017) (Hrsg W Richner & S Sinaj) *Agrarforschung Schweiz*, 8 (6), 34.
- \_ Greiner L, Nussbaum M, Papritz A, Fraefel M, Zimmermann S, Schwab P, Grêt-Regamey A, Keller A, 2018. Assessment of soil multi-functionality to support the sustainable use of soil resources on the Swiss Plateau. *Geoderma Regional*, 14, e00181.

- \_ Greiner L, Petter G, Keller A, 2023. Anleitung zur Beurteilung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung. Methode der Nutzungseignungsklassen (NEK-Methode). Aktualisierte Version 2023. Testversion. <https://ccsols.ch/>
- \_ Grêt-Regamey A., Kool S., Bühlmann L., S. Kissling. (2018). Eine Bodenagenda für die Raumplanung. Thematische Synthese TS3 des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (nfp 68), Bern. <http://www.nfp68.ch>
- \_ Grimm, R., Behrens, T. 2010. Uncertainty analysis of sample locations within digital soil mapping approaches. *Geoderma*, 155, 3-4, 154–163.
- \_ Grimm, R., Behrens, T., Märker, M., Elsenbeer, A., 2008. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island – digital soil mapping using random forests analysis. *Geoderma* 146, 102–113.
- \_ Hagedorn F, Krause H-M, Studer M, Schellenberger A, Gattinger A, 2018. Boden und Umwelt. Organische Bodensubstanz, Treibhausgasemissionen und physikalische Belastung von Schweizer Böden. Thematische Synthese TS2 des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68). Bern, 92 S.
- \_ Hepperle E, Stoll T, 2006. Ressourcenplan Boden. Ein Konzept zum planerisch-nachhaltigen Umgang mit Bodenqualität. Bundesamt für Umwelt B (Hrsg.).
- \_ Hilbert S, Thelemann M, Brandt M, Siewert W, Gerstenberg JH, 2021. Planungshinweise zum Bodenschutz. Leitbild und Massnahmenkatalog für den vorsorgenden Bodenschutz in Berlin.
- \_ Hohenbrink, T. L., Jackisch, C., Durner, W., Germer, K., Iden, S. C., Kreiselmeier, J., and A. Peters A. 2023: Soil water retention and hydraulic conductivity measured in a wide saturation range, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 4417–4432, 2023. <https://doi.org/10.5194/essd-15-4417-2023>
- \_ <https://doi.org/10.1080/00401706.1969.10490666>, 1969.
- \_ Hug A.-S., Gubler A., Gschwend F., Widmer F., Oberholzer, H.R., Frey, B., Meuli R. G. 2018. NABObio – Bodenbiologie in der Nationalen Bodenbeobachtung. Ergebnisse 2012–2016, Handlungsempfehlungen und Indikatoren. *Agroscope Science*, 63, 2018.
- \_ Hug A.-S., Moll J., Gubler A. 2021. Monitoring Bodenbiologie. Auswertung boden-mikrobiologischer Daten von kantonalen und nationalen Bodenbeobachtungsstandorten. *Agroscope Science*, 110, 2021.
- \_ Hutter, I. (2020): Wölbäcker – Zeugen einer landwirtschaftlichen Nutzung; in: Bd. 33 (2020): Mitteilungen der DGAMN: Die konstruierte Landschaft. Befunde und Funde zu anthropogenen Geländeänderungen in Mittelalter und früher Neuzeit: 153–160
- \_ Jäggli F, Peyer K, Pazeller A, Schwab P, 1998. Grundlagenbericht zur Bodenkartierung des Kantons Zürich.
- \_ Jenny H., 1941. *Factors of soil formation*. McGraw-Hill, N.Y. & London.
- \_ Johannes A, Matter A, Schulin R, Weisskopf P, Baveye PC, Boivin P, 2017. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma*, 302, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>
- \_ Kanton Zürich. 2004. Lebensraumspezifisch modellierte Potenzialkarten als integrierte Planungsgrundlage für Vernetzungsprojekte und Landschaftsentwicklungskonzepte. Amt für Landschaft und Natur Fachstelle Naturschutz Kanton Zürich. verfügbar unter <https://maps.zh.ch/> (geprüft 5.2.2025)
- \_ Karatzoglou A, Smola A, Hornik K. 2023. kernlab: Kernel-Based Machine Learning Lab. R package version 0.9-32, <https://CRAN.R-project.org/package=kernlab>.

- \_ Keel SG, Johannes A, Boivin P, Burgos S, Charles R, Hagedorn F, Kulli B, Leifeld J, Saluz A, Zimmermann S, et al., 2021. Soil carbon sequestration in Switzerland: analysis of potentials and measures (Postulate Bourgeois 19.3639): Report by Agroscope.
- \_ Keller A, Grob U, Hertzog M, Zahner D, Greiner L, Stumpf F, Petter G, Wallner M, Sprafke T, Racine S, et al., 2023. Neue Methoden in der Bodenkartierung – Pilotprojekt Diemerswil: KOBO-Bericht Nr. 3.
- \_ Keller A., Franzen J., Knüsel P., Papritz A., Zürrer M. 2018: Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH). Thematische Synthese TS4 des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (nfp 68), Bern. S. 124. [https://www.nfp68.ch/SiteCollectionDocuments/NFP68\\_TS4\\_Bodeninformationsplattform\\_DE.pdf](https://www.nfp68.ch/SiteCollectionDocuments/NFP68_TS4_Bodeninformationsplattform_DE.pdf)
- \_ Keller, O. & Krayss, E. (1999): Quartär und Landschaftsgeschichte. – Erläuterungen zur Geologischen Übersichtskarte des Kantons Thurgau. – Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft, 55: 39–67.
- \_ Kennard, R. W. and Stone, L. A.: 1969. Computer Aided Design of Experiments, *Technometrics*, 11, 137–148,
- \_ Knoll A, Sutor G, Huber G, Kübler B, 2010. «Pilotprojekt Boden». Bewertung von Bodenfunktionen in Planungsverfahren. Land Oberösterreich. Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft. A-4010 Linz.
- \_ Köllner P, Gross C, Schäppi B, Füssler J, Lerch J, Nauser M, Bundesamt für Umwelt, 2017. Klimabedingte Risiken und Chancen. Eine schweizweite Synthese. Umwelt-Wissen.
- \_ Kuhn, M. 2023. caret: Classification and Regression Training. R package version 6.0-94. URL <https://CRAN.R-project.org/package=earth>.
- \_ Lawrence P. and M.A. Bowers. 2002. A test of «hot» mustard extraction method of sampling earthworms. *Soil Biology and Biochemistry* 34(4):549-552.
- \_ Lehmann A, David S, Stahr K, 2013. TUSEC – Bilingual-Edition: Eine Methode zur Bewertung natürlicher und anthropogener Böden (Deutsche Fassung). Stuttgart. <https://d-nb.info/1130704300/34>
- \_ Liaw, A. 2022. RandomForest: Breiman and Cutler's Random Forests for Classification and Regression. R package version 4.7-1.1, <https://CRAN.R-project.org/package=randomForest>
- \_ Liaw, A. 2022. RandomForest: Breiman and Cutler's Random Forests for Classification and Regression. R package version 4.7-1.1, <https://CRAN.R-project.org/package=randomForest>
- \_ Lienhard A, Merkel K, 2002. Ein neues Planungsinstrument und Zielwerte für LEK und ÖQV im Kanton Zürich.
- \_ McBratney A.B., Mendonça-Santos M.L., Minasny B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52.
- \_ Milborrow, S. 2024. Earth: Multivariate Adaptive Regression Splines. R package version 5.3.3. URL <https://CRAN.R-project.org/package=earth>.
- \_ Miller R, 2012. Bodenfunktionsbewertung für die Raum- und Bauleitplanung in Hessen und Rheinland-Pfalz. Rheinland-Pfalz, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Landesamt für Geologie und Bergbau (Hrsg.).
- \_ Miller R, Busch J, Friedrich K, Fritzsich D, Goldschmitt M, Handke K, Pflanz D, Sauer S, Vorderbrügge T, Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, 2022. Themenhefte Vorsorgender Bodenschutz, Heft 5: Kompensation des Schutzguts Boden in Planungs- und Genehmigungsverfahren.

- Minasny B, Malone BP, McBratney AB, Angers DA, Arrouays D, Chambers A, Chaplot V, ZuengSang C, Kun C, Das BS, et al., 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, (292), 59–86.
- Müller U, Engel N, Heidt L, Schäfer W, Kunkel R, Wendland F, Roehm H, Elbracht J, 2012. Klimawandel und Bodenwasserhaushalt. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). *GeoBerichte* (20). [https://doi.org/10.48476/GEOBER\\_20\\_2012](https://doi.org/10.48476/GEOBER_20_2012)
- Oberholzer H-R, Scheid S, 2007. Bodenmikrobiologische Kennwerte. Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). Bern.
- Poeplau C., and A. Don. 2023. A simple soil organic carbon level metric beyond the organic carbon to clay ratio. *Soil Use Management* 39: 1057-1067.
- Peters, A., S.C. Iden, T. Hohenbrink, and W. Durner. 2021 – A simple model to predict hydraulic conductivity in medium to dry soil from the water retention curve, *Water Resources Research*, 57, e2020WR029211. <https://doi.org/10.1029/2020WR029211>
- Presler J, Bagnoud N, 2013. Generelles Projekt der 3. Rhonekorrektur. Grundlagenstudie Bodenkunde. Technischer Bericht.
- Preusser, F., Graf, H. R., Keller, O., Krayss, E., and Schlüchter, C.: Quaternary glaciation history of northern Switzerland, *E&G Quaternary Sci. J.*, 60, 21, <https://doi.org/10.3285/eg.60.2-3.06>, 2011.
- Quinlan, R. 1992. Learning with continuous classes. In: *Proceedings of the 5th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence* (A. Adams & L. Sterling), 343–348, World Scientific, Singapore.
- R Core Team 2024a. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. URL <https://www.R-project.org/>.
- R Core Team, 2024b. The R Stats Package. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rabot E, Guiresse M, Pittatore Y, Angelini M, Keller C, Lagacherie P, 2022. Development and spatialization of a soil potential multifunctionality index for agriculture (Agri-SPMI) at the regional scale. Case study in the Occitanie region (France). *Soil Security*, 6, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100034>
- sanu durabilitas. 2025. Der Wert der Böden für die Raumplanung. sanu durabilitas. Schweizerische Stiftung für nachhaltige Entwicklung. verfügbar unter <https://bodenqualität.ch> (geprüft 5.2.2025)
- Safanelli, J.L.; Chabrilat, S.; Ben-Dor, E.; and J.A.M. Demattê. 2020. Multispectral models from bare soil composites for mapping topsoil properties over Europe. *Remote Sens.* 2020, 12, 1369.
- Schindler, U., Doerner, J., Müller, L, 2015. Simplified method for quantifying the hydraulic properties of shrinking soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178 (1), 136–145.
- Schwab P., und A. Gubler. 2016. Methoden zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben. *Agroscope Science* Nr. 40. Agroscope. Zürich.
- Siemer B, Hinrichs U, Penndorf O, Pohl M, Schürer S, Schulze P, Seiffert S, 2014. Bodenbewertungsinstrument Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.). [http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/boden/Bodenbewertungsinstrument\\_Sachsen\\_092014\(1\).pdf](http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/boden/Bodenbewertungsinstrument_Sachsen_092014(1).pdf)
- Sinaj S, Charles R, Baux A, Dupuis B, Hiltbrunner J, Levy L, Pellet D, Blanchet G, Jeangros B, 2018. Grundlagen der Düngung, Kapitel 8: Düngung von Ackerkulturen.

- \_ Steiger U., P. Knüsel, L. Rey. 2018. Die Ressource Boden nachhaltig nutzen. Gesamtsynthese des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68); verfügbar unter [www.nfp68.ch](http://www.nfp68.ch).
- \_ 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](http://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](http://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>
- \_ USGS .2023. U.S. Geological Survey. Online verfügbar: <https://www.usgs.gov/landsat-missions> (accessed on 8 April 2023).
- \_ VDLUFA, 2000. Standpunkt des VDLUFA. Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden.
- \_ Vogel H-J, Eberhardt E, Franko U, Lang B, Liess M, Weller U, Wiesmeier M, Wollschläger U, 2019. Quantitative Evaluation of Soil Functions: Potential and State. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 164. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00164>
- \_ Vögeli B, Bossard M, Gimmi U, Gsponer R, Raster J, Schiebli R, Pezzatti M, Beltrami R, Wanner C, Wiedmer U, et al., 2022. Bezeichnung und Sicherung der prioritären Potenzialflächen für Feuchtgebiete gemäss Naturschutz-Gesamtkonzept: Technischer Bericht, Fassung vom 9. Dezember 2022.
- \_ Weiss L., S. Lutz, T. Keller und P. Weisskopf. 2021. Physikalische Bodeneigenschaften – Recherche zum Stand der Technik zu Bestimmungsmethoden und zu Geräten. Agroscope, Forschungsgruppe Bodenqualität und Bodennutzung. KOBO-Bericht Nr. 1, BFH-HAFL, CH-3052 Zollikofen-Bern, verfügbar unter [www.ccsols.ch](http://www.ccsols.ch)
- \_ Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley E, Lang B, Lutzow M von, Marin-Spiotta E, van Wesemael B, Rabot E, Liess M, Garcia-Franco N, et al., 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils – a review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, (333), 149–162.
- \_ Wuyts N, Baux A, Bragazza L, Calanca P, Chalhoub B, Dupuis B, Herrera JM, Hiltbrunner J, Levy Häner L, Pellet D, et al., 2023. Klimaresilienter Ackerbau 2035. Agroscope. *Agroscope Science*. <https://doi.org/10.34776/AS177G>
- \_ Yuan, J., 2024. Xgboost: Extreme Gradient Boosting. R package version 1.7.7.1 URL <https://CRAN.R-project.org/package=xgboost>
- \_ Zimmermann S, 2011. Bodenüberwachung der Zentralschweizer Kantone (KABO ZCH): Säurestatus und Versauerungszustand von Waldböden. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Gruppe Bodenfunktionen und Bodenschutz (Hrsg.).

**Kompetenzzentrum Boden**

BFH-HAFL

Länggasse 85\_3052 Zollikofen

info@ccsols.ch\_ccsols.ch