

Faktenblatt:

Schweizweite Bodeneigenschaftskarten - Version 1

Flächendeckende Bodeninformation zu pH, Kohlenstoff-, Ton- und Schluffgehalt des Oberbodens (0-30cm)

Dr. Felix Stumpf, Dr. Thorsten Behrens, Dr. Armin Keller

Dezember 2021

Kontakt: felixmichael.stumpf@bfh.ch

Hintergrund

Das Faktenblatt skizziert den methodischen Ablauf und Resultate einer schweizweiten digitalen Kartierung von pH-Wert, Kohlenstoff- (SOC), Ton- (Clay), und Schluffgehalt (Silt) des Oberbodens (0-30 cm).

Die Datengrundlage bilden Feldbodendaten, die zwischen 1985-2020 erhoben und analysiert wurden, sowie flächendeckend verfügbare Kovariaten zu Terrain, Klima, Vegetation, Landnutzung und Lithologie.

Bei einer digitalen Bodenkartierung wird mittels mathematisch-statistischer Modelle die Boden-Landschaftsbeziehung quantitativ abgebildet. Im Nachgang werden räumliche Prognosen und Prognoseunsicherheiten der Bodeneigenschaft für die jeweilige Bodeneigenschaft auf Basis flächendeckend verfügbarer Landschafts-Kovariaten erstellt. Konzeptionell orientiert sich eine digitale Bodenkartierung an dem Zustands-Faktoren-Modell (Dokuchaev, 1883; Jenny, 1941; McBratney et al. 2003), wobei die Bodeneigenschaft S eine Funktion aus den Faktoren Boden (s), Klima (c), Vegetation/Landnutzung (o), Terrain (r), Zeit (a) und Lage (n) ist:

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

Voraussetzung für eine adäquate Beschreibung der Boden-Landschaftsbeziehung ist eine inhaltlich konsistente, detaillierte und relevante Datengrundlage. Bezüglich der Feldbodendaten bedarf es einer Harmonisierung, da Analysemethoden und Datenerfassung über den Erhebungszeitraum von vier Dekaden nicht konsistent sind. Im Fall der flächendeckenden Kovariaten bedarf es Vorprozessierungen, welche im Ergebnis die räumliche und zeitliche Dimension der Landschaftsentwicklung berücksichtigt.

Das Faktenblatt ist wie folgt strukturiert:

Kapitel 1: Klassifikation der Landbedeckung als Grundlage für spezifische Modellierungen innerhalb der Klassen „Cropland“, „Grassland“, und „Woods“.

Kapitel 2: Herkunft, Aufbereitung und Analyse des Feldbodensatzes für die Oberbodeneigenschaften (0-30cm) pH-Wert, Kohlenstoff- (SOC), Ton- (Clay), und Schluffgehalt (Silt)

Kapitel 3: Methodische Beschreibung für die Ableitung von flächendeckenden Kovariaten zu Terrain, Klima, Vegetation, Landnutzung und Lithologie.

Kapitel 4: Das Modelldesign, verwendete Algorithmen und Evaluierungsschemas im Überblick.

Kapitel 5: Darstellung der schweizweiten digitalen Kartierungen zu pH-Wert, Kohlenstoff- (SOC), Ton- (Clay), und Schluffgehalt (Silt) im Oberboden (0-30cm), einschließlich der Illustration von räumlichen Prognoseunsicherheiten und Prognosegüten.

1 Landbedeckung des Untersuchungsgebiets

Das Untersuchungsgebiet entspricht ca. 99% der bodenbedeckten Fläche der Schweiz. Es umfasst die Landbedeckungsklassen „Cropland“, „Permanent Grassland“, „Alpine Grassland“ und „Woods“, welche vom KOBO jährlich aktuell abgeleitet werden (Abb. 1). Das zugrundeliegende Modell zur jährlichen Prognose der Landbedeckung basiert auf Stichprobenpunkten der arealstatistischen Erhebungen seit 1990 (BFS, 2020), spektralen Zeitreihen des Landsatarchivs und Terrainableitungen. Modell- und Prognosegüte sind in Tab. 1 ersichtlich.

Prognose: Landbedeckung 2016-2020

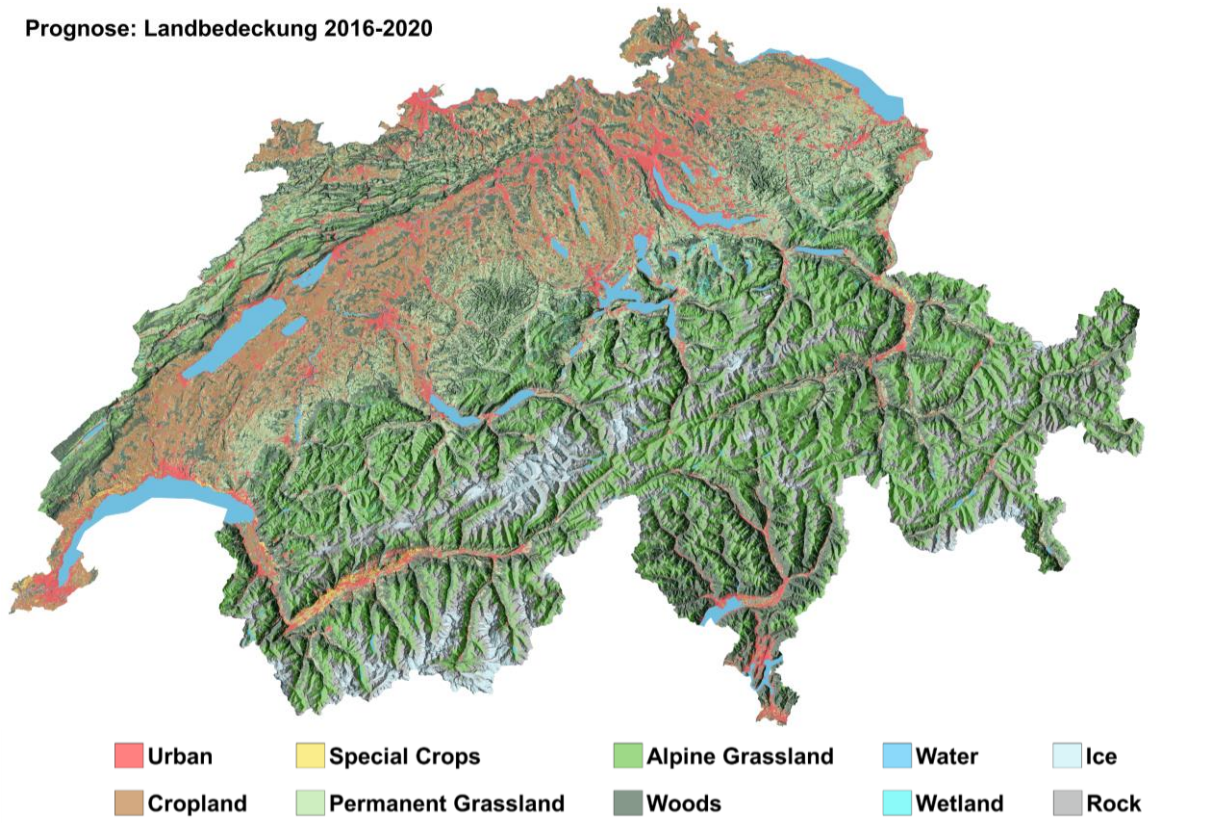


Abb. 1: Landbedeckung der Schweiz als Haupttyp jährlicher Prognosen 2016-2020 in einer räumlichen Auflösung von 30 x 30 m.

Tab. 1: Konfusionsmatrix für die Landbedeckungsmodellierung in der Schweiz. Die Prognosegüte bezieht sich auf jährliche Modellierungen des Zeitraumes 1990-2018 und auf die prognostizierten Klassen „Urban“, „Agriculture“, „Alpine Grassland“, „Woods“. Es gilt zu beachten, dass die Klasse „Agriculture“ der Kombination aus den Klassen „Cropland“ und „Permanent Grassland“ in Abb. 1 entspricht. Die weiteren in Abb. 1 ersichtlichen Klassen „Special Crops“, „Water“, „Ice“, „Wetland“, „Rock“ wurden vom Topographischen Landschaftsmodell der Schweiz (Swisstopo, 2020) übernommen (OA: Overall Accuracy).

	Urban	Agriculture	Alpine Grassland	Woods
Precision	0.93	0.91	0.93	0.88
Recall	0.97	0.87	0.9	0.92
OA: 0.91		Kappa: 0.88		

2 Feldbodendaten

Die Feldbodendaten für pH-Wert, Kohlenstoff- (SOC), Ton- (Clay), und Schluffgehalt (Silt) des Oberbodens (0-30 cm) stammen aus den folgenden Datenquellen:

- (1) Das Nationale Bodeninformationssystem NABODAT stellt Schweizer Bodendaten aus verschiedenen regionalen Bodenerhebungen seit den 1960er Jahren in einer Datenbank zur Verfügung (NABODAT, 2020).
- (2) Das Biodiversitätsmonitoring der Schweiz unterhält ein Messnetz aus einem schweizweiten Raster mit einer Maschenweite von 6 x 4 km. Zwischen 2011 und 2015 wurden Bodendaten des Oberbodens (0 – 20 cm) erhoben (BDM, 2020).
- (3) Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) stellt Profilbodendaten der Schweizer Waldflächen, welche im Rahmen verschiedener Studien der letzten fünf Jahrzehnte erhoben wurden, zur Verfügung (WSL, 2020).

Aufgrund der unterschiedlichen regionalen Bodenerhebungen über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten, weist der Feldbodendatensatz eine erhöhte Heterogenität auf. Dies betrifft vor allem die räumliche Verteilung, laboranalytische Verfahren, Datenerfassung im Gelände, Georeferenzierung, sowie die verwendeten Einheiten und Formatierungen. Daher wurden mehrere Harmonisierungs- und Formatierungsschritte durchgeführt:

- (1) Harmonisierung der Kennzeichnungen und Einheiten der Bodeneigenschaften.
- (2) Mittelwertbildung der Bodeneigenschaftswerte aus mehreren Erhebungen im Tiefenbereich 0-30 cm.
- (3) Limitierung des Datensatzes auf den Erhebungszeitraum von 1985-2020.
- (4) Konvertierung des Bodenhumusgehalte in Kohlenstoffgehalte (SOC) anhand der Formel $SOC [\%] = \frac{Humus [\%]}{1.725}$ (Pribyl, 2010).
- (5) Limitierung des Kohlenstoffgehalts auf mineralische Böden mit einem Bodenkohlenstoffgehalt unter 12%.

In Abb. 2 bis Abb. 5 ist die räumliche, statistische und zeitliche Verteilung der Feldbodendaten zu pH, Kohlenstoff- (SOC), Ton- (Clay), und Schluffgehalt (Silt) dargestellt.

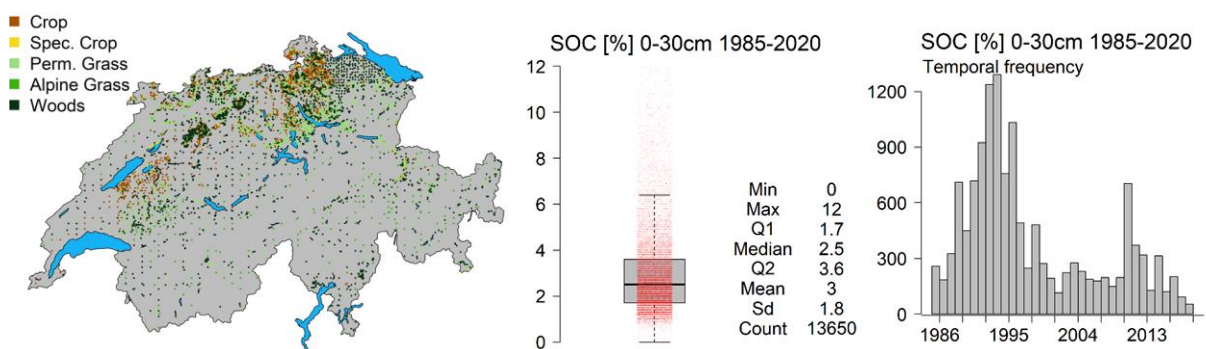


Abb. 2: Räumliche, statistische und zeitliche Verteilung der Feldbodendaten zu Kohlenstoffgehalt (SOC).

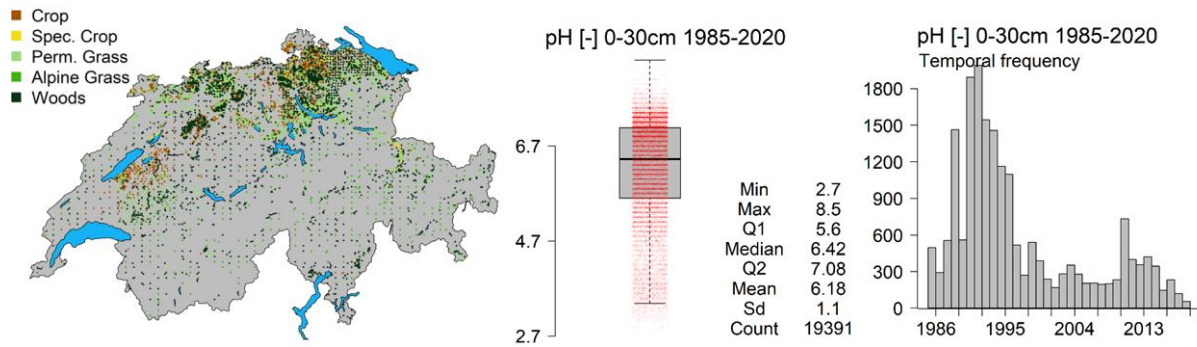


Abb. 3: Räumliche, statistische und zeitliche Verteilung der Feldbodendaten zu pH.

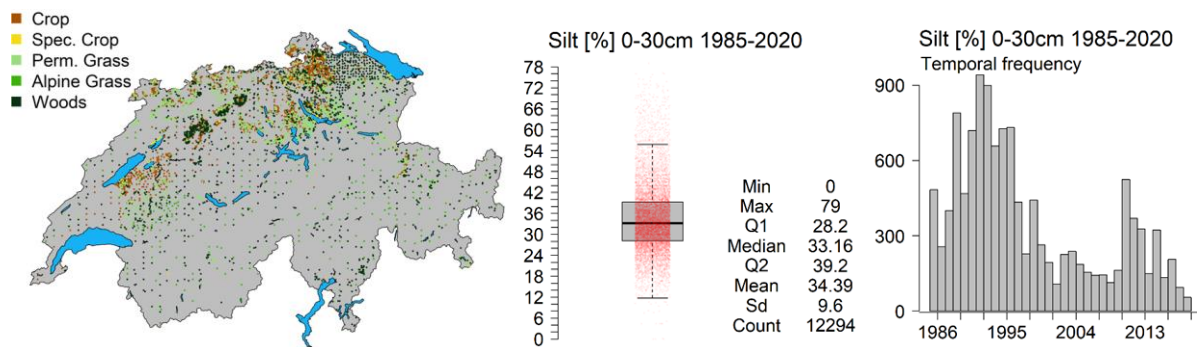


Abb. 4: Räumliche, statistische und zeitliche Verteilung der Feldbodendaten zu Schluffgehalt (Silt).

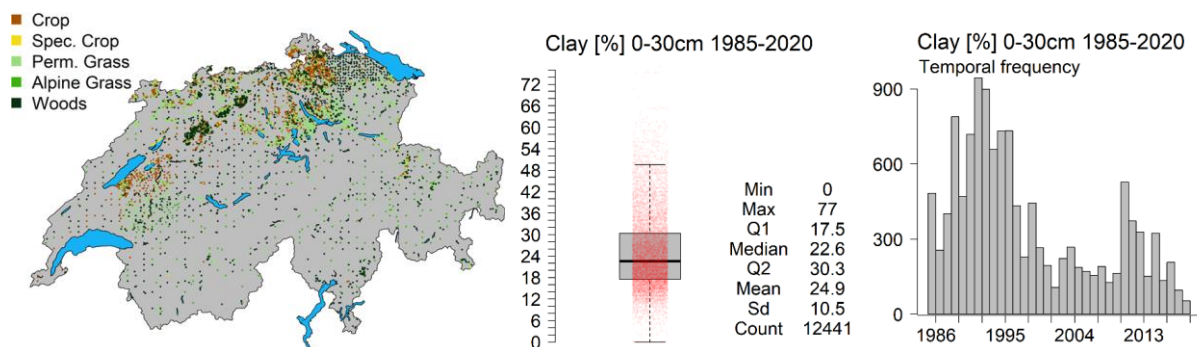


Abb. 5: Räumliche, statistische und zeitliche Verteilung der Feldbodendaten zu Tongehalt (Clay).

3 Flächendeckende Kovariaten

3.1 Terrain

Das Terrain ist ein wesentlicher bodenbildender Faktor und kann mittels Ableitungen aus digitalen Höhenmodellen räumlich explizit beschrieben werden (Behrens et al., 2010). Weiterhin bestehen Wechselbeziehungen zwischen Bodeneigenschaften, Terraineigenschaften und weiteren bodenbildenden Faktoren über verschiedene Skalen hinweg. Diese skalenübergreifenden Wechselbeziehungen beeinflussen die Bodengenese und räumliche Bodenvariabilität (Behrens et al. 2018a). Beispielhaft können regionale Terraineigenschaften lokale Niederschlagsverhältnisse beeinflussen und somit feuchteempfindliche Bodeneigenschaften bestimmen. Im Rahmen von digitalen Boden-Landschaftsmodellierungen ist es daher von besonderer Bedeutung das Terrain anhand einer multiskaligen Terrainanalyse zu beschreiben (Behrens et al. 2018b).

Die multiskalige Terrainanalyse wurde in Anlehnung an Behrens et al. (2018a) für 12 Terrainableitungen, die eine nachgewiesene Relevanz für zahlreiche Bodeneigenschaften aufweisen, durchgeführt (Tab. 2, Abb. 6, Fathololoumi et al., 2020; Stumpf et al., 2017). Grundlage der Terrainanalyse ist das Höhenmodell *swissALTI3D* (Swisstopo, 2020). Dabei wurden 14 verschiedene Skalen zwischen 10m und 6100m abgeleitet. Die Skalenintervalle entsprechen der initialen räumlichen Auflösung von 10 x 10m faktorisiert mit den Fibonacci-Zahlen n_f ($f = 1, 2, \dots, 610$).

Tab 2: Terrainableitungen für die multiskalige Terrainanalyse.

Label	Description	Reference
DEM	Elevation (a.s.l.) [m]	Swisstopo, 2021
Slope	Slope Inclination [°]	Horn et al., 1981
TRI1	Terrain Ruggedness Index [-]	Wilson et al., 2007
TRI2	Terrain Roughness Index [-]	Wilson et al., 2007
TPI	Topographic Position Index [-]	Wilson et al., 2007
CT	Total Curvature [-]	Zevenbergen and Thorne, 1987
CPR	Profile Curvature [-]	Zevenbergen and Thorne, 1987
CPL	Planform Curvature [-]	Zevenbergen and Thorne, 1987
FLAlog	Flow Accumulation (log10) [-]	Quinn et al., 1991
CI	Convergence Index [-]	Kiss, 2004
EA	Eastness [-]	Horn et al., 1981
NO	Northness [-]	Horn et al., 1981

Multiscale Flow Accumulation

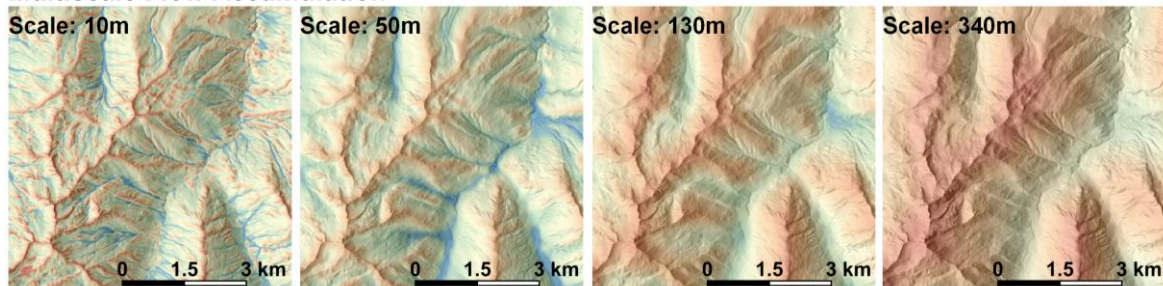


Abb. 6: Multiskalige Terrainanalyse am Beispiel der Fließakkumulation (Flow Accumulation FLAlog) in den Skalen 10m, 50m, 130m und 340m.

3.2 Klima

Klima und Klimawandel beeinflussen die Bodengenesse aufgrund von komplexen Wechselbeziehungen mit Kohlenstoff-, Stickstoff- und hydrologischen Kreisläufen. Diese Wechselbeziehungen wiederum stehen in Zusammenhang mit Bodenerosion, sowie Veränderungen der organischen Substanz, Textur, Wasserspeicherkapazität und Kationenaustauschkapazität des Bodens (Brevik, 2013). Das Klima ist daher eine wichtige Komponente im Rahmen von Boden-Landschaftsmodellierungen.

Basierend auf den schweizweiten Klima-Rasterdaten (räumliche Auflösung: 1 x 1km) zu Temperatur, Niederschlagssumme und relativer Sonnenscheindauer wurde eine räumlich-zeitliche Klimaanalyse seit 1985 durchgeführt (Frei et al., 2006, 2015; Frei, 2014; Meteoswiss, 2020). Die flächendeckende Beschreibung des Klimas und Klimawandels zwischen 1985 und 2020 beinhaltet die mittlere Temperatur, Niederschlagssumme und relative Sonnenscheindauer. Zudem wurde für jeden Parameter die mittlere jährliche Veränderung für den gleichen Zeitraum abgeleitet (Abb. 7).

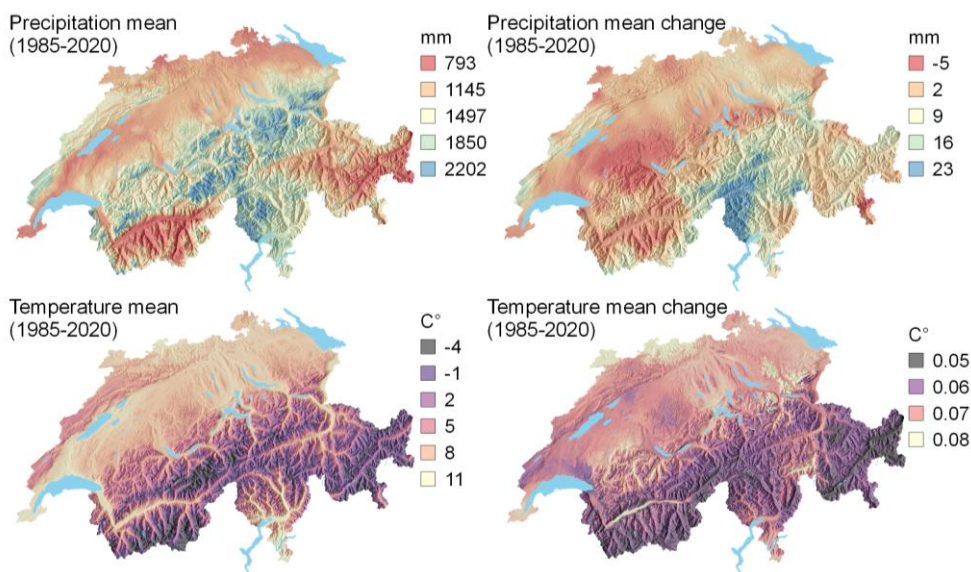


Abb. 7: Flächendeckende Klimatrendanalyse am Beispiel des mittleren Niederschlags (Precipitation mean), der mittleren zwischenjährlichen Niederschlagsveränderung (Precipitation mean change), der mittleren Temperatur (Temperature mean) und der mittleren zwischenjährlichen Temperaturveränderung (Temperature mean change) für den Zeitraum 1985-2020.

3.3 Vegetation und Landnutzung

Vegetation und Landnutzung in Zeit und Raum sind entscheidende Faktoren für Bodenprozesse und -eigenschaften. Sie beeinflussen wesentliche Ausprägungen der Kohlenstoff- bzw. Stickstoffkreisläufe und verändern dabei Bodenbiologie und Bodenphysik (De Vries et al., 2013). Zudem steht Landnutzungswandel in engem Zusammenhang mit Veränderungen von Bodeneigenschaften wie z.B. Anteil organischer Substanz, Raumgewicht und Wasserspeicherkapazität (Haghighi et al., 2010; Stumpf et al., 2018). Die räumlich-zeitliche Beschreibung von Vegetation und Landnutzung ist folglich eine bedeutende Komponente im Rahmen von Boden-Landschaftsmodellierungen.

Basierend auf spektralen Zeitreihen, abgeleitet von Satellitenaufnahmen, wurde eine flächendeckende Vegetations- und Landnutzungsanalyse durchgeführt. Als Datengrundlage wurde auf die Satellitendaten des Landsatarchivs zurückgegriffen. Die Landsatdaten ermöglichen seit 1985 die Ableitung flächendeckender spektraler Zeitreihen auf Basis verschiedener Sensoren mit einer zeitlichen Auflösung von 2-4 Wochen und einer räumlichen Auflösung von 30 x 30m (Stumpf et al., 2020). Aus der Vegetations- und Landnutzungsanalyse des KOBOS stehen jährlich explizite und periodisch aggregierte Spektralinformation (z.B. Normalized Difference Vegetation Index; Rouse et al., 1974) zur flächendeckenden Beschreibung der Vegetations- und Landnutzungs-dynamik zur Verfügung.

Beispielhaft ist in Abb. 8 die NDVI basierte Biomasse als Median, Maximum (Greenest) und Minimum (Least Greenest) für den Zeitraum 1985-2020 dargestellt.



Abb. 8: Flächendeckende spektrale Vegetations- und Landnutzungsanalyse am Beispiel des langjährigen Median, Greenest und Least Greenest NDVI Composite. Die Daten beschreiben räumlich explizit den Mittelwert des jährlichen NDVI- Median, Maximum (Greenest) und Minimum (Least Greenest) über den Zeitraum 1985-2020.

3.4 Lithologie und Landnutzung

Die Lithologie beschreibt das Bodenausgangsmaterial mittels genereller Eigenschaften zu Mineralogie, Granulometrie und Farbe. Die lithologischen Eigenschaften beschreiben somit den initialen Zustand der Bodengenese. Gleichzeitig werden wesentliche physische und chemische Eigenschaften des Ausgangsmaterials an dessen Derivat Boden weitergegeben und im Laufe der Bodengenese verändert. Folglich ist im Rahmen von Boden-Landschaftsmodellierungen die Lithologie ein bedeutender Bestimmungsfaktor für physische und chemische Bodeneigenschaften (Gray et al., 2016; Loiseau et al., 2020).

Unter Nutzung spektraler Landsat-Zeitreihen (siehe Kapitel 3.3), wurde eine flächendeckende Landschaftsanalyse zu Lithologie und Landnutzung auf landwirtschaftlichen Flächen durchgeführt. Dabei wurden die räumlich expliziten Landsat-Zeitreihen auf Beobachtungen vegetationsloser Oberflächen beschränkt. Die spektrale Signatur der vegetationslosen Oberflächen beschreibt lithologische Eigenschaften der Erdoberfläche und korreliert zudem mit Bodeneigenschaften zu Granulometrie, Mineralogie, Farbe und Kohlenstoff. Werden die Landsat-Zeitreihen über längere Zeiträume aggregiert, können flächendeckend lithologisch-bodenkundliche Bildinformationen abgeleitet werden. Ebenso können auf Basis dieser Zeitreihen Rückschlüsse auf landwirtschaftliches Management hinsichtlich Bodenbearbeitung und Fruchtfolge getroffen werden (Diek et al., 2017; Rogge et al., 2018; Dematté et al., 2020).

Beispielhaft ist in Abb. 9 ein Echtfarben-RGB-Bild basierend auf den aggregierten Zeitreihen des vegetationslosen Bodens für den Zeitraum 1985-2020 dargestellt. Ebenso zeigt Abb. 9 die Nutzungsintensität des Ackerlandes basierend auf der Anzahl von Zeitreiheninstanzen mit vegetationslosem und bedecktem Boden.

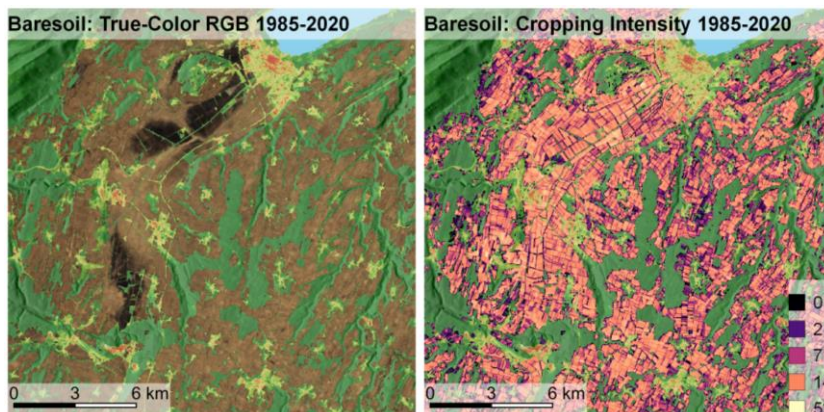


Abb. 9: Spektrale Boden- und Landnutzungsanalyse am Beispiel eines Echtfarben-RGB-Bildes des vegetationslosen Bodens (Baresoil: True-Color RGB) und der Nutzungsintensität (Baresoil: Cropping Intensity) für den Zeitraum 1985-2020 (Ausschnitt: Ackerland südwestlich des Neuenburgersees).

4 Modelldesign

Die Basisdaten des Modelldesigns sind die Feldbodendaten zu pH-Wert, Kohlenstoff- (SOC), Ton- (Clay), und Schluffgehalt (Silt; siehe Kapitel 2; Abb. 2-5), sowie die flächendeckend verfügbaren Kovariaten zu Terrain, Klima, Vegetation, Landnutzung und Lithologie (siehe Kapitel 3; Abb. 6-9).

Für die Landbedeckungen „Cropland“, „Grassland“ und „Woods“ wurden spezifische Modelle entwickelt. Die „Grassland“-Fläche entspricht dabei der Kombination der Flächen von „Permanent Grasland“ und „Alpine Grassland“ (siehe Kapitel 1; Abb. 1).

Das Modelldesign basiert auf dem nicht-parametrischen Ensemblemodell «Quantile Regression Forest» (Breiman, 2001; Meinshausen, 2006). Dabei nutzt der Algorithmus die Ergebnisse einer Vielzahl randomisierter Entscheidungsbäume für die finale Prognose. Zudem ermöglicht der Algorithmus die pixel-spezifische Prognoseunsicherheit auf Basis der Einzelprognosen im Ensemble flächendeckend zu bestimmen. Für jedes Modell wurde aus dem gesamten Pool der 204 Kovariaten eine relevante Teilmenge mittels «Recursive Feature Elimination» selektiert (Ambroise and McLachlan, 2002). Die spezifische Parametrisierung der Modelle wurde mittels «Grid-Tuning» durchgeführt.

Das Evaluierungsschema besteht aus einem «Split-Data-Ansatz» und einem «All-Data-Ansatz». Für beide Ansätze wurden zwei Evaluierungsverfahren, der Random Forest Out-of-Bag Error (Breiman, 2001) und eine 10-fache Kreuzvalidierung angewendet. Im Rahmen des «Split-Data-Ansatz» wurde zusätzlich anhand der ungenutzten Daten eine unabhängige Validierung durchgeführt. Als Masszahlen für die Prognosegüte für alle drei Evaluierungsverfahren wurde der «Root Mean Square Error» (RMSE) und das Bestimmtheitsmass (R^2) verwendet. Für die räumliche Modellunsicherheit wurde ein pixel-spezifisches 68%-Prognoseintervall, basierend auf der Verteilung der Einzelprognosen im Ensemble, abgeleitet. Die pixel-spezifische Modelunsicherheit ist als relative Abweichung von der Prognose zu interpretieren.

5 Resultate

5.1 Bodenmodellierung: Kohlenstoffgehalt (SOC)

Im Folgenden werden die Resultate der digitalen Bodenkartierung für den Bodenkohlenstoffgehalt (SOC) illustriert (Abb. 10; Tab. 3, Abb. 11). Die Modellierungen erfolgten spezifisch für die Landbedeckungen „Cropland“, „Grassland“ und „Woods“:

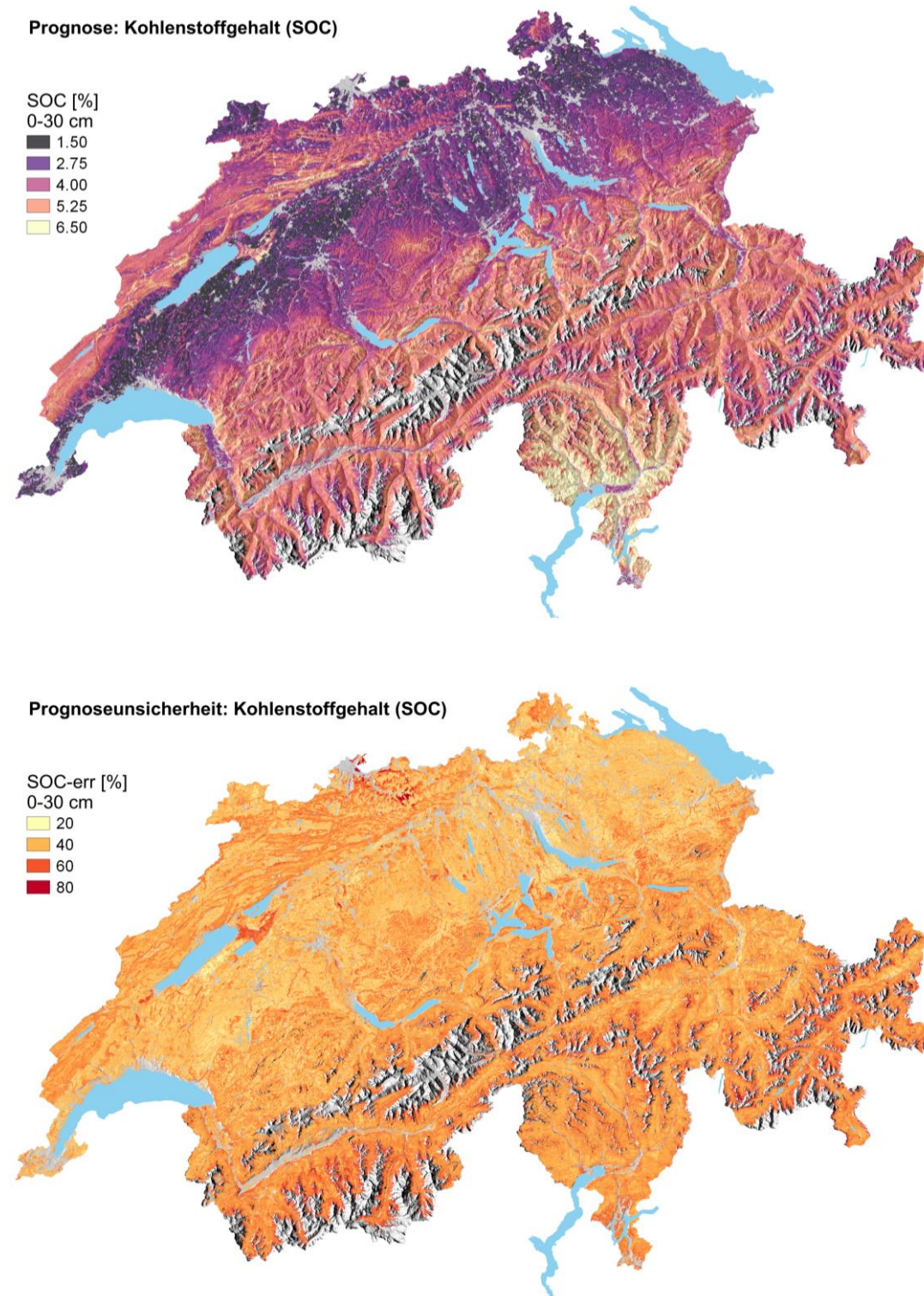


Abb. 10: Bodenkohlenstoffgehalt (SOC) - Flächendeckende Prognose und Prognoseunsicherheit (SOC-err) für den Oberboden (0-30 cm) der Schweiz in einer räumlichen Auflösung von 30 x 30m.

Tab. 3: Modell- und Prognosegüte für Modellierungen zum Kohlenstoffgehalt (SOC) im Oberboden (0-30 cm) der Schweiz (RMSE: Root Mean Square Error, R²: Bestimmtheitsmass, OOB: Out-of-Bag-Error, CV-10: Cross-Validation 10-fold, Ind.: Unabhängiger Validierungsdatensatz; siehe Kapitel 4).

SOC	Cropland				Grassland				Woods			
	Split data		All data		Split data		All data		Split data		All data	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
OOB	0.81	0.66	0.76	0.7	1.22	0.48	1.17	0.51	1.81	0.31	1.78	0.32
CV-10	0.83	0.66	0.78	0.71	1.24	0.47	1.17	0.51	1.81	0.3	1.79	0.32
Ind.	0.84	0.65			1.21	0.47			1.76	0.32		

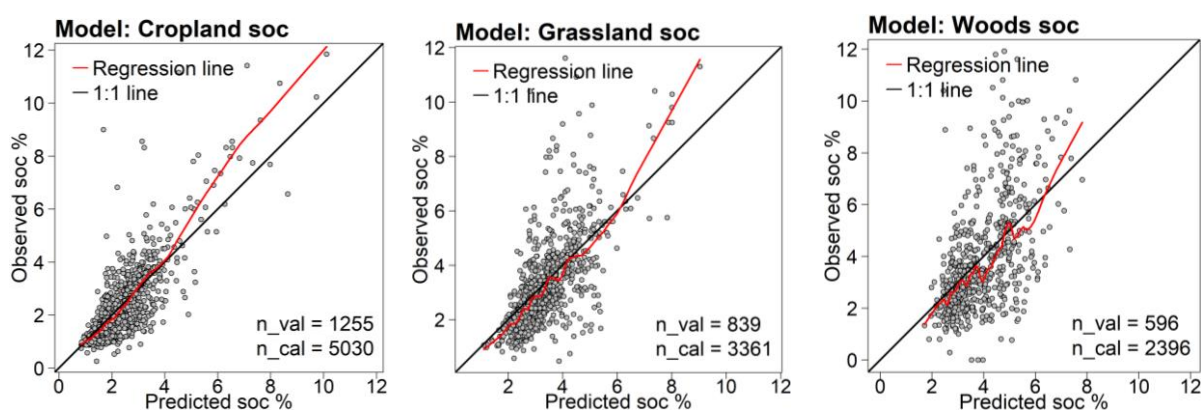


Abb. 11: Streudiagramm von prognostiziertem versus observiertem Kohlenstoffgehalt (SOC) des Oberbodens (0-30 cm) der Schweiz anhand eines Split-Data-Modellansatzes (Regression line: lokal gewichtete Regressionslinie, n_val: Anzahl unabhängiger Validierungspunkte, n_cal: Anzahl Modellkalibrierungspunkte).

5.2 Bodenmodellierung: pH

Im Folgenden werden die Resultate der digitalen Bodenkartierung für den pH-Wert illustriert (Abb. 12; Tab. 4, Abb. 13). Die Modellierungen erfolgten spezifisch für die Landbedeckungen „Cropland“, „Grassland“ und „Woods“:

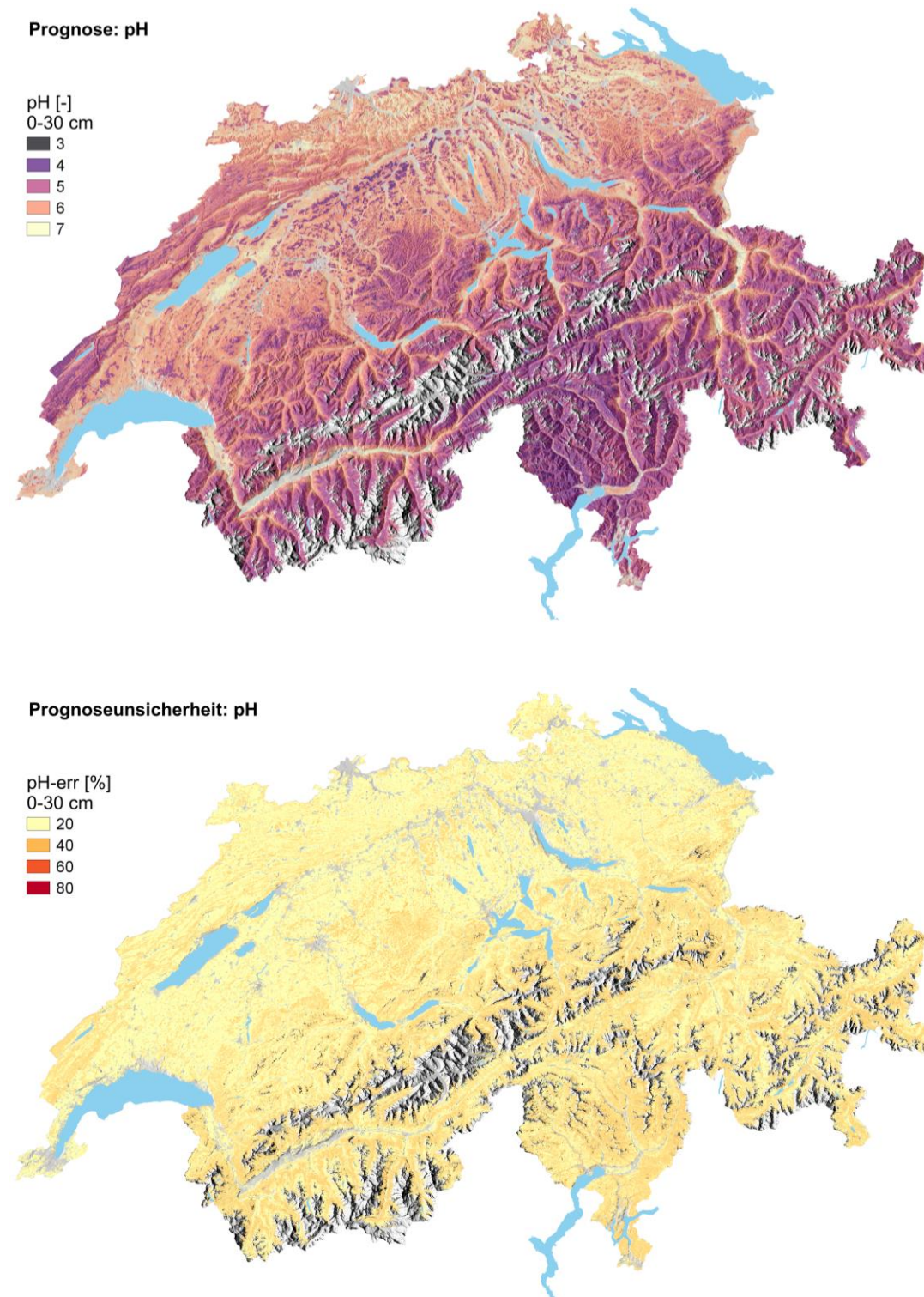


Abb. 12: Boden-pH - Flächendeckende Prognose und Prognoseunsicherheit (pH-err) für den Oberboden (0-30 cm) der Schweiz in einer räumlichen Auflösung von 30 x 30m.

Tab. 4: Modell- und Prognosegüte für Modellierungen zu pH im Oberboden (0-30 cm) der Schweiz (RMSE: Root Mean Square Error, R²: Bestimmtheitsmass, OOB: Out-of-Bag-Error, CV: Cross-Validation, Ind.: Unabhängiger Validierungsdatensatz; siehe Kapitel 5).

pH	Cropland				Grassland				Woods			
	Split data		All data		Split data		All data		Split data		All data	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
OOB	0.51	0.51	0.48	0.56	0.6	0.56	0.59	0.58	1.03	0.47	1	0.49
CV-10	0.52	0.51	0.49	0.57	0.61	0.56	0.6	0.57	1.03	0.48	1.01	0.5
Ind.	0.49	0.57			0.62	0.56			1.02	0.48		

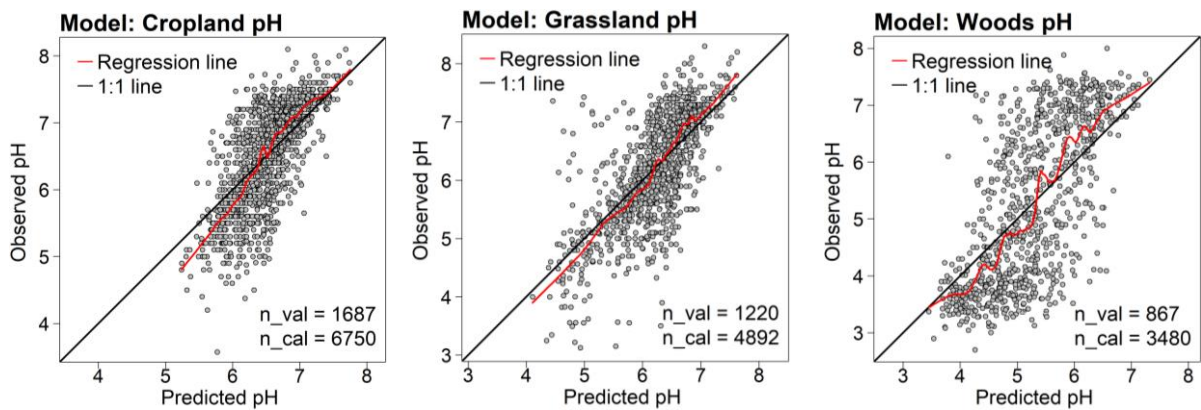


Abb. 13: Streudiagramm von prognostiziertem versus beobachtetem pH des Oberbodens (0-30 cm) der Schweiz anhand eines Split-Data-Modellansatzes (Regression line: lokal gewichtete Regressionslinie, n_val: Anzahl unabhängiger Validierungspunkte, n_cal: Anzahl Modellkalibrierungspunkte).

5.3 Bodenmodellierung: Schluffgehalt (Silt)

Im Folgenden werden die Resultate der digitalen Bodenkartierung für den Bodenschluffgehalt (Silt) illustriert (Abb. 14; Tab. 5, Abb. 15). Die Modellierungen erfolgten spezifisch für die Landbedeckungen „Cropland“, „Grassland“ und „Woods“:

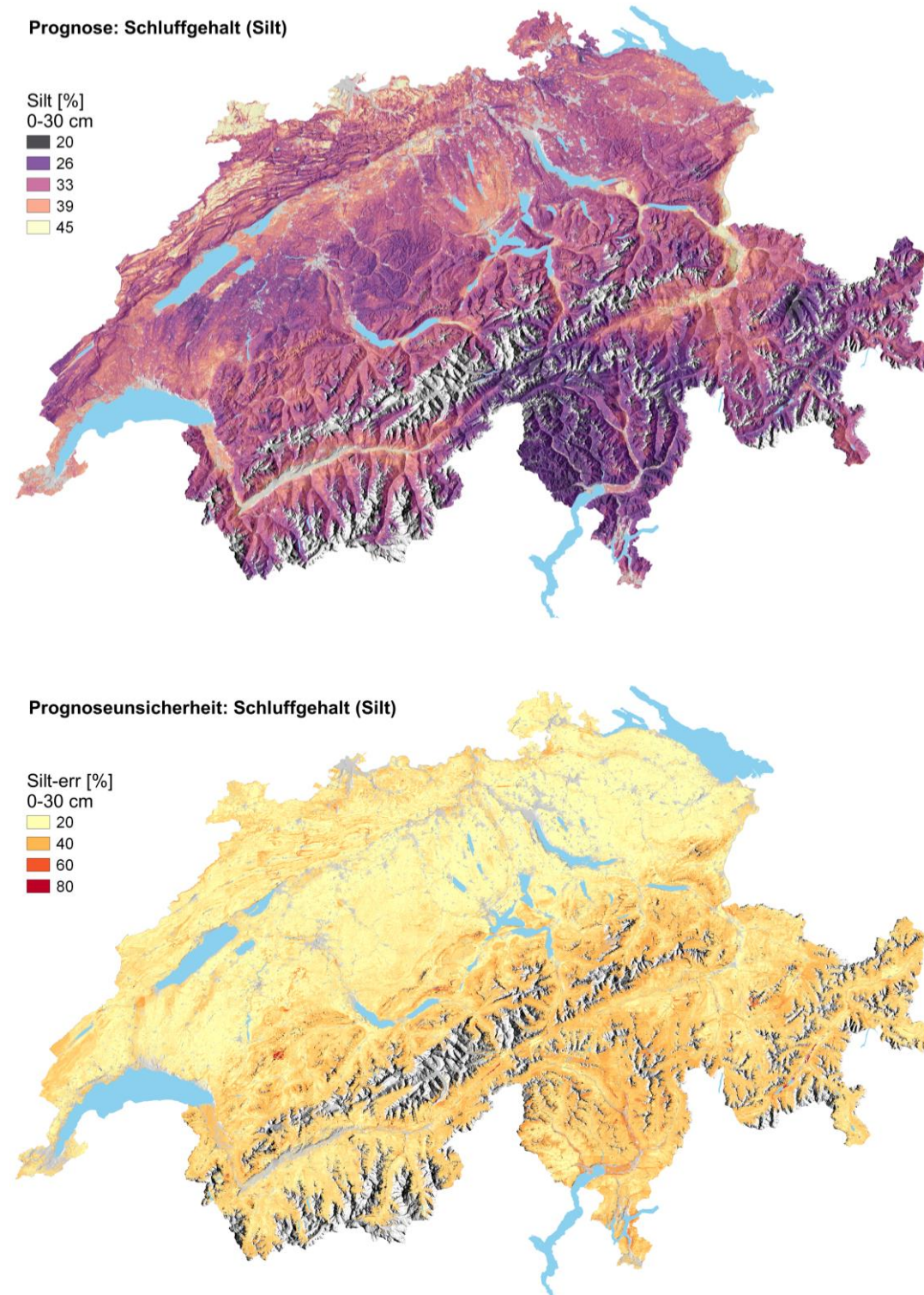


Abb. 14: Bodenschluffgehalt (Silt) - Flächendeckende Prognose und Prognoseunsicherheit (Silt-err) für den Oberboden (0-30 cm) der Schweiz in einer räumlichen Auflösung von 30 x 30m.

Tab. 5: Modell- und Prognosegüte für Modellierungen zum Schluffgehalt (Silt) im Oberboden (0-30 cm) der Schweiz (RMSE: Root mean Square Error, R²: Bestimmtheitsmass, OOB: Out-of-Bag-Error, CV-10: Cross-Validation 10-fold, Ind.: Unabhängiger Validierungsdatensatz; siehe Kapitel 4).

Silt	Cropland				Grassland				Woods			
	Split data		All data		Split data		All data		Split data		All data	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
OOB	5.47	0.69	5.18	0.71	6.08	0.57	6.03	0.58	7.89	0.37	7.72	0.4
CV-10	5.54	0.68	5.27	0.71	6.21	0.55	6.09	0.58	7.95	0.37	7.77	0.4
Ind.	5.21	0.68			6.83	0.49			7.78	0.4		

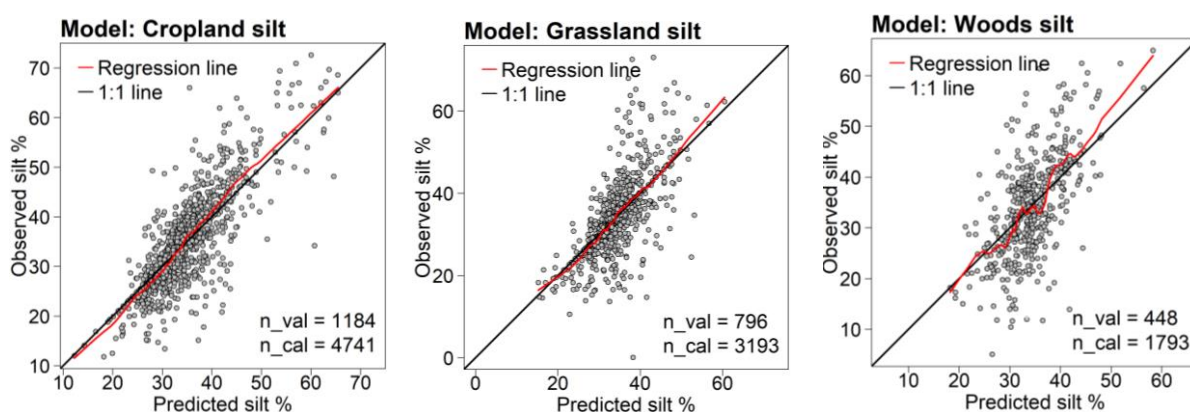


Abb. 15: Streudiagramm von prognostiziertem versus beobachtetem Schluffgehalt (Silt) des Oberbodens (0-30 cm) der Schweiz anhand eines Split-Data-Modellansatzes (Regression line: lokal gewichtete Regressionslinie, n_val: Anzahl unabhängiger Validierungspunkte, n_cal: Anzahl Modellkalibrierungspunkte).

5.4 Bodenmodellierung: Tongehalt (Clay)

Im Folgenden werden die Resultate der digitalen Bodenkartierung für den Bodentongehalt (Clay) illustriert (Abb. 16; Tab. 6, Abb. 17). Die Modellierungen erfolgten spezifisch für die Landbedeckungen „Cropland“, „Grassland“ und „Woods“:

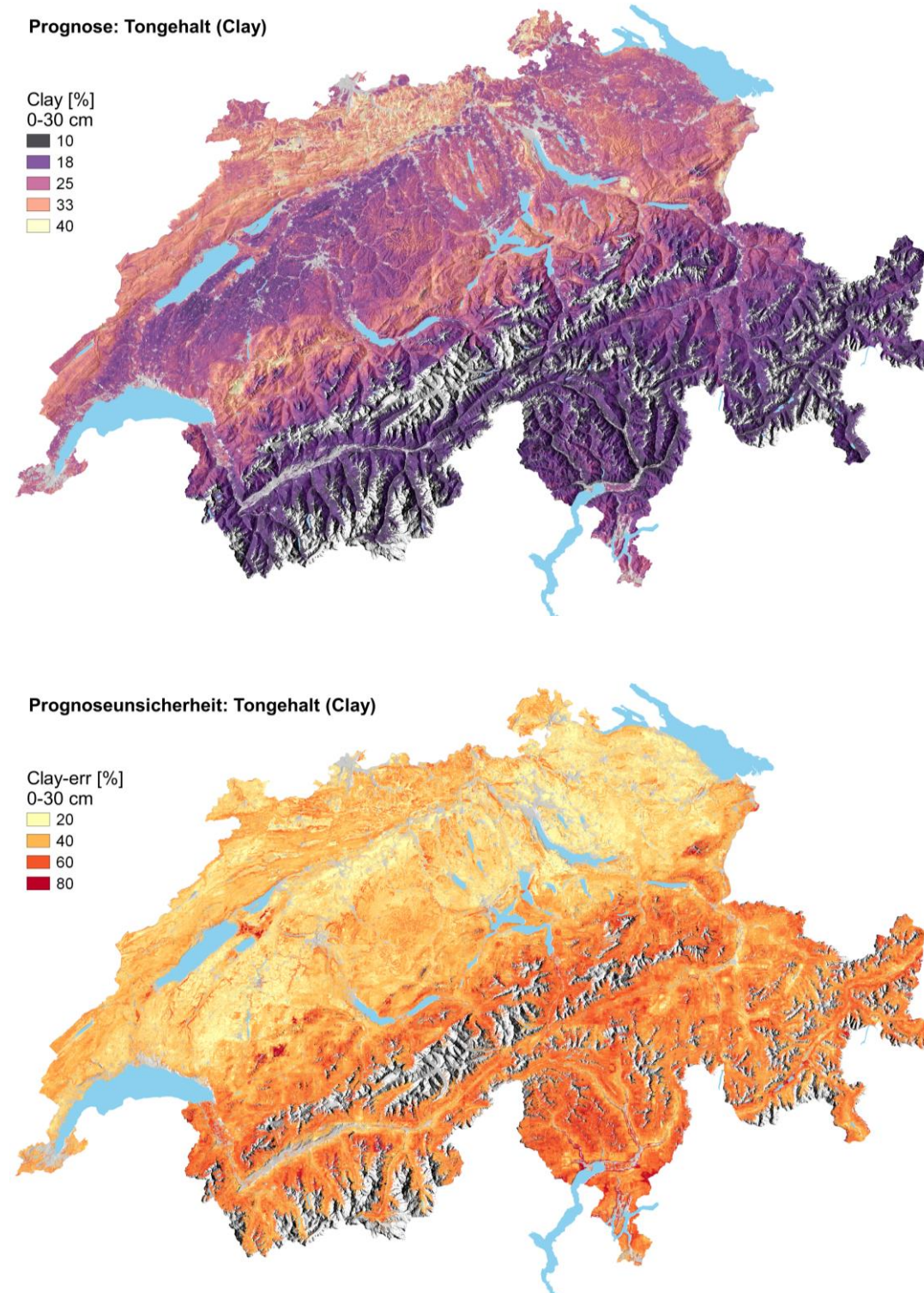


Abb. 16: Bodentongehalt (Clay) - Flächendeckende Prognose und Prognoseunsicherheit (Clay-err) für den Oberboden (0-30 cm) der Schweiz in einer räumlichen Auflösung von 30 x 30m.

Tab. 6: Modell- und Prognosegüte für Modellierungen zum Tongehalt (Clay) im Oberboden (0-30 cm) der Schweiz (RMSE: Root mean Square Error, R²: Bestimmtheitsmass, OOB: Out-of-Bag-Error, CV-10: Cross-Validation 10-fold, Ind.: Unabhängiger Validierungsdatensatz; siehe Kapitel 4).

Clay	Cropland				Grassland				Woods			
	Split data		All data		Split data		All data		Split data		All data	
	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
OOB	5.27	0.71	4.99	0.74	6.7	0.63	6.47	0.66	8.03	0.45	7.86	0.47
CV-10	5.44	0.7	5.12	0.73	6.84	0.62	6.58	0.65	8.12	0.44	7.91	0.49
Ind.	5.28	0.72			6.9	0.63			8.13	0.44		

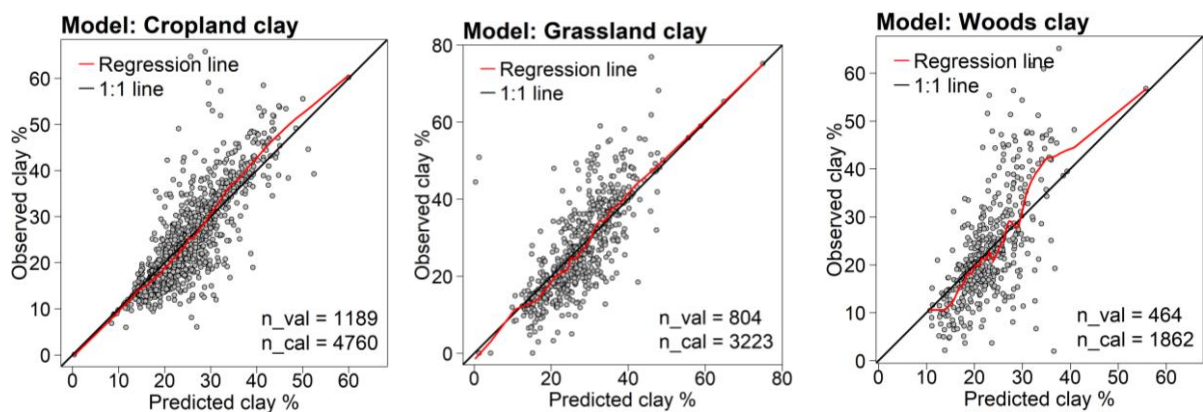


Abb. 17: Streudiagramm von prognostiziertem versus beobachtetem Tongehalt (Ton) des Oberbodens (0-30 cm) der Schweiz anhand eines Split-Data-Modellansatzes (Regression line: lokal gewichtete Regressionslinie, n_val: Anzahl unabhängiger Validierungspunkte, n_cal: Anzahl Modellkalibrierungspunkte).

6 Referenzen

- Ambroise C., McLachlan G.J., 2002. Selection bias in gene extraction on the basis of microarray gene-expression data. *PNAS* 10, 6562-6566.
- BDM, 2020. Biodiversitätsmonitoring Schweiz. <https://biodiversitymonitoring.ch/index.php/de/> (13.12.2021).
- Behrens T., Schmidt K., Zhu A.X., Scholten T., 2010: The ConMap approach for terrain-based digital soil mapping. *European Journal of Soil Science* 61, 133-143.
- Behrens T., Schmidt K., MacMillan R.A., Viscarra Rossel R. A., 2018a. Multiscale contextual spatial modelling with the Gaussian scale space. *Scientific Reports* 8, 15244.
- Behrens T., Schmidt K., MacMillan R.A., Viscarra Rossel R.A., 2018b: Multiscale digital soil mapping with deep learning. *Geoderma* 310, 128-137.
- BFS, 2020. Bundesamt für Statistik, Schweiz: Arealstatistik. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/erhebungen/area.html> (13.12.2021).
- Breiman L., 2001. Random Forests. *Machine Learning* 45, 5-32.
- Brevik EC., 2013: The potential impact of climate change on soil properties and processes and corresponding influence on food security. *Agriculture* 3, 398-417.
- Dematté J.A.M., Safanelli J.L., Poppiel R.R., Rizzo R., Silvero N.E.Q., et al., 2020. Bare earth 's surface spectra as a proxy for soil resource monitoring. *Scientific Reports* 10, 4461.
- De Vries FT., Thebault E., Liiri M., Birkhofer K., et al., 2013 : Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *PNAS* 35, 14296-14301.
- Diek S., Fornallaz F., Schaepman M.E., De Jong R., 2017. Barest pixel composite for agricultural areas using Landsat time series. *Remote Sensing* 9, rs9121245.
- Dokuchaev V.V., 1883. Russian chernozem. In: *Selected Works of V.V. Dokuchaev, Volume 1. Moscow, 1948* (ed. S. Monson), pp. 14– 419. Israel Program for Scientific Translations Ltd. (for USDA-NSF), Jerusalem, Israel.
- Fatholouloumi S., Vaezi A.R., Alavipanah S.K., Ghorbani A., Saurette D., Biswas A., 2020. Improved digital soil mapping with multitemporal remotely sensed satellite data fusion: A case study in Iran. *Science of the Total Environment* 721, 137703.
- Frei C., Schöll R., Fukutome S., Schmidli J., Vidale P., 2006: Future change of precipitation extremes in Europe – Intercomparison of scenarios from regional climate tools. *Journal of Geophysical Research* 111, D6.
- Frei C., 2014: Interpolation of temperature in a mountainous region using non-linear profiles and Euclidean distances. *International Journal of Climatology* 34, 1585-1605.
- Frei C., Willi M., Stöckli R., Dürr B., 2015. Spatial analysis of sunshine duration in complex terrain by non-contemporaneous combination of station and satellite data. *International Journal of Climatology* 35, 4471-4790.
- Gray J.M., Bishop T.F.A., Wilford J.R., 2016. Lithology and soil relationships for soil modelling and mapping. *Catena* 147, 429-440.
- Haghighi F., Gorji M., Shorafa M., 2010: A study of the effects of land use changes on soil physical properties and organic matter. *Land degradation and development* 21, 496-502.
- Horn, B.K.P., 1981. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE* 69, 14–47.
- Jenny H., 1941. *Factors of soil formation*. McGraw-Hill, N.Y. & London.
- Kiss R., 2004. Determination of drainage network in digital elevation model, utilities and limitations *Journal of Hungarian Geomathematics*, vol.2, p.16-29.
- Loiseau T., Richer-de-Forges A.C., Martelet G., Bialkowski A., Nehlig P., Arrouays D., 2020. Could airborne gamma-spectrometric data replace lithological maps as covariate for digital soil mapping of topsoil particle-size distribution? A case study in Western France. *Geoderma Regional* 22, 200295.

- McBratney A.B., Mendonça-Santos M.L., Minasny B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3–52.
- Meinshausen N., 2006. Quantile Regression Forests. *Journal of Machine Learning Research* 7, 983–999.
- Meteoswiss, 2020. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, Schweiz: Räumliche Klimaanalysen. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/raeumliche-klimaanalysen.html> (13.12.2021).
- NABODAT, 2020. Nationales Bodeninformationssystem, Schweiz. <https://nabodat.ch/index.php/de/> (13.12.2021).
- Pribyl D.W., 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma* 156, 75–83.
- Quinn P.F., Beven K.J., Chevallier P., Planchon O., 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes* 5, 59–79.
- Rogge D., Bauer A., Zeidler J., Mueller A., Esch T., Heiden U., 2018. Building an exposed soil composite processor (SCMaP) for mapping spatial and temporal characteristics of soils with Landsat imagery (1984–2014). *Remote Sensing of Environment* 205, 1–17.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., 1974: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-Symposium, Washington D.C. 1973.
- Stumpf F., Schmidt K., Goebes P., Behrens T., Schönbrodt-Stift S., Wadoux A., Xiang W., Scholten T., 2017. Uncertainty-guided sampling to improve digital soil maps. *Catena* 153, 30–38.
- Stumpf F., Keller A., Schmidt K., Mayr A., Gubler A., Schaepman M., 2018: Spatio-temporal land use dynamics and soil organic carbon in Swiss agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 258, 129–142.
- Stumpf F., Schneider M.K., Keller A., Mayr A., Rentschler T., Meuli R.G., Schaepman M., Liebisch F., 2020. Spatial monitoring of grassland management using multi-temporal satellite imagery. *Ecological Indicators* 113, 106201.
- Swisstopo, 2020. Bundesamt für Landestopografie, Schweiz: Das topographische Landschaftsmodell TLM. <https://www.swisstopo.admin.ch/de/wissen-fakten/topografisches-landschaftsmodell.html> (13.12.2021).
- Wilson M.F.J., O'Connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J., 2007. Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. *Marine Geodesy* 30, 3–35.
- WSL, 2020. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. <https://www.wsl.ch/de/index.html> (13.12.2021).
- Zevenbergen L.W., Thorne C.R., 1987: Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes Landforms* 12, 47–56.