

TerraPoly

Karten zu multiskaligen Reliefableitungen zur Unterstützung der Konzeptphase und Feldarbeiten in Bodenkartierungen

KOBO-Bericht Nr. 4

Juli 2023

Impressum

Autor:innen: T. Behrens, M. Hertzog, K. Schmidt, A. Keller

Erscheinungsjahr: 2023

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

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

Empfohlene Zitierweise: Behrens T., M. Hertzog, K. Schmidt und A. Keller (2023). TerraPoly - Karten zu multiskaligen Relieffableitungen zur Unterstützung der Konzeptphase und Feldarbeiten in Bodenkartierungen. KOBO-Bericht Nr. 4, BFH-HAFL, CH-3052 Zollikofen-Bern, verfügbar unter 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

1	Zusammenfassung	4
2	Einleitung	5
3	Prozessablauf	6
4	Reliefparameter	7
	4.1 Hangneigung - FAL24+	7
	4.2 Hangneigung – Nutzungseignungsklasse (NEK)	7
	4.3 Profilkrümmung	8
	4.4 Fliessakkumulation	9
	4.5 Exposition	11
5	Datenstruktur der Produkte	12
6	Kontakt und Datenlieferung	12
7	Literaturverzeichnis	13

1 Zusammenfassung

Das Relief spielt als bodenbildender Faktor im Hinblick auf die Verbreitungssystematik der Böden eine zentrale direkte wie indirekte Rolle (Jenny, 1941; Behrens et al., 2019). Daher stellen Reliefableitungen aus digitalen Geländemodellen (DGM), wie beispielsweise die Hangneigung, die Profilkrümmung oder die Fliessakkumulation, wertvolle Grundlagenkarten zur Unterstützung der Konzeptphase und der Feldarbeiten in der Bodenkartierung dar. Solche Karten können sowohl in der Erkundungsphase als Unterstützung für die Erstellung einer Konzeptkarte fungieren, als auch während oder nach der Feldkartierung als Hilfsmittel für die Polygonabgrenzung von Bodeneinheiten dienen. Bisher gibt es keinen Standard, welche Umwelt- und Geodaten in der Konzeptphase zu verwenden sind. Je nach Gebiet und Kanton stehen unterschiedliche Grundlagenkarten zur Verfügung.

In Hinblick auf die Erstellung von Bodenkarten spielt die Klassifikation der Reliefableitungen, die meist als kontinuierliche Daten vorliegen, eine sehr wichtige Rolle. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Art der Darstellung der Daten. Bodenkarten sind in den allermeisten Fällen Polygondaten, wobei jedes Polygon eine pedologisch möglichst homogene Zone beschreibt (Bodeneinheiten bzw. Bodenformen). Die Erzeugung von Polygondaten geschieht grösstenteils durch manuelles Zeichnen oder Digitalisieren am Bildschirm. Ableitungen aus DGM liegen jedoch in Form von Rasterdaten vor und können so nicht direkt in Form von Polygonen für die Kartenerstellung genutzt werden. Eine Konvertierung von Raster- zu Polygondaten ist zwar in den meisten GIS enthalten, jedoch liefern die unterschiedlichen Algorithmen jeweils spezifische Artefakte (z.B. nicht relevante Kleinstflächen), die eine direkte Nutzung als Grundlage für Bodenkarten zumindest erschweren.

Das KOBO bietet den Kantonen für Bodenkartierungen daher den Service TerraPoly an. Für gewünschte Gemeinden leitet das KOBO ein standardisiertes Set an Reliefparametern (Hangneigung nach FAL24+, Hangneigung nach NEK, Profilkrümmung, Fliessakkumulation und Exposition) auf unterschiedlichen Skalen bzw. Auflösungen (4m, 8m und 12m) ab, klassifiziert diese nach bodenkundlich relevanten Vorgaben, entfernt Kleinstflächen, und erzeugt für jeden Reliefparameter auf jeder Skala optimierte Polygonkarten. Parallel zu allen Daten liefert das KOBO für das ausgewählte Gebiet eine Vorauswahl bezüglich der Skala, die als erste Grundlage für die Feldarbeiten dienen können. Je nach Gebiet können jedoch unterschiedliche Reliefparameter im Hinblick auf die Bodenbildung mehr oder weniger relevant sein. Es ist dann Aufgabe der zuständigen Kartierbüros, die für das Kartiergebiet jeweils optimalen Reliefableitungen und Skalen zu selektieren. Die Rohdaten (Rasterdaten der abgeleiteten Reliefparameter) werden als GeoTiff (*.tif) Dateien und die klassifizierten Polygondaten als Shapefiles (*.shp) zur Verfügung gestellt. Die Polygondaten sind mit einer interpretierbaren Legende in einem QGIS-Projekt organisiert.

Die vorliegende Dokumentation beschreibt die Methoden und erläutert das Prozedere für Anfragen bezüglich des Services an das KOBO.

2 Einleitung

Digitale Geländemodelle (DGM) liegen heute meist in Form von hochauflösenden Rasterdaten aus flugzeuggestützten LIDAR Messungen vor. SwissTopo bietet diese Daten aktuell in Auflösungen von 0,5m, 2m, 25m und 200m an. Dabei stellt sich die Frage nach der bodenkundlich relevanten Auflösung (Behrens et al. 2018, 2019). Sehr hochauflösende Höhenmodelle können anthropogene Bearbeitungsspuren zeigen, die keine pedogenetische Relevanz haben und sich daher in Bezug auf die Fragestellung negativ auf die Ableitung von Reliefparametern auswirken. Beispiele sind grössere Steine, Pflugfurchen, Wegestrukturen oder Heuballen. Bei Reliefableitungen aus stark aggregierten Rasterdaten (> 15m) gehen hingegen oftmals bodenkundlich relevante Informationen verloren (z.B. schwach ausgeprägte Mulden, Hangversteilungen oder Gräben). Im Hinblick auf die kleinräumige Variabilität der Böden und einen Kartiermassstab von ca. 1:5000 empfehlen sich Auflösungen von grösser 4 m. Es empfiehlt sich daher, die Reliefparameter auf unterschiedlichen Rasterweiten bzw. Skalen abzuleiten und hinsichtlich ihrer bodenkundlichen Relevanz projektspezifisch zu bewerten, um so für das jeweilige Kartiergebiet optimal nutzbare Datensätze zur Verfügung zu haben. In der aktuellen Version von TerraPoly werden die Reliefparameter standardmässig auf Basis der Rastergrössen 4m, 8m, und 12m abgeleitet.

Bodenkarten liegen in den allermeisten Fällen als Polygondaten vor, in denen bodenkundlich homogene und massstabsgerechte Bereiche in separaten Flächen zusammengefasst werden (z.B. Bodeneinheiten). Dies geschieht durch manuelles Übertragen in verfügbare Kartengrundlagen oder direktes Digitalisieren am Bildschirm oder Tablet durch die Kartierenden. Spezifisch vorgegebene Grenzen, wie der Neigungsgrenze von 18° der NEK zur Ausscheidung von Fruchtfolgeflächen (FFF) (ARE, 2020), sind im Gelände nur sehr aufwändig exakt ermittelbar. Sie können jedoch durch eine Klassifikation, der aus dem DGM abgeleiteten Hangneigung, sehr einfach und einheitlich ermittelt werden. Eine automatisierte Konvertierung von Raster- zu Polygondaten ist zwar in den meisten GIS enthalten, jedoch liefern die unterschiedlichen Algorithmen jeweils spezifische Artefakte, die eine direkte Nutzung als Grundlage für Bodenkarten zumindest erschweren. Mit TerraPoly werden erstmals nicht nur unterschiedliche räumliche Auflösungen berücksichtigt, sondern die als Rasterdaten vorliegenden Ableitungen in artefaktfreie Polygondatensätze überführt (Behrens, unveröffentlicht), die teilweise auch direkt als Grundlage für die Erstellung der Bodenkarten herangezogen werden können.

Neben der Auflösung der Rasterdaten, spielt auch die Frage der minimalen Flächengrösse in den Polygondaten für den jeweiligen projektspezifischen Massstab eine Rolle. Folglich muss parallel zur Bewertung der bodengenetischen Relevanz eines Reliefparameters auf einer spezifischen Skala auch die minimale Flächengrösse im resultierenden Polygondatensatz analysiert werden und Kleinstflächen in Abhängigkeit zur räumlichen Auflösung systematisch aggregiert werden.

3 Prozessablauf

Abbildung 1 zeigt die internen Arbeitsschritte sowie die benötigten Eingangsdaten für die Erstellung der TerraPoly-Karten. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte kurz erläutert.

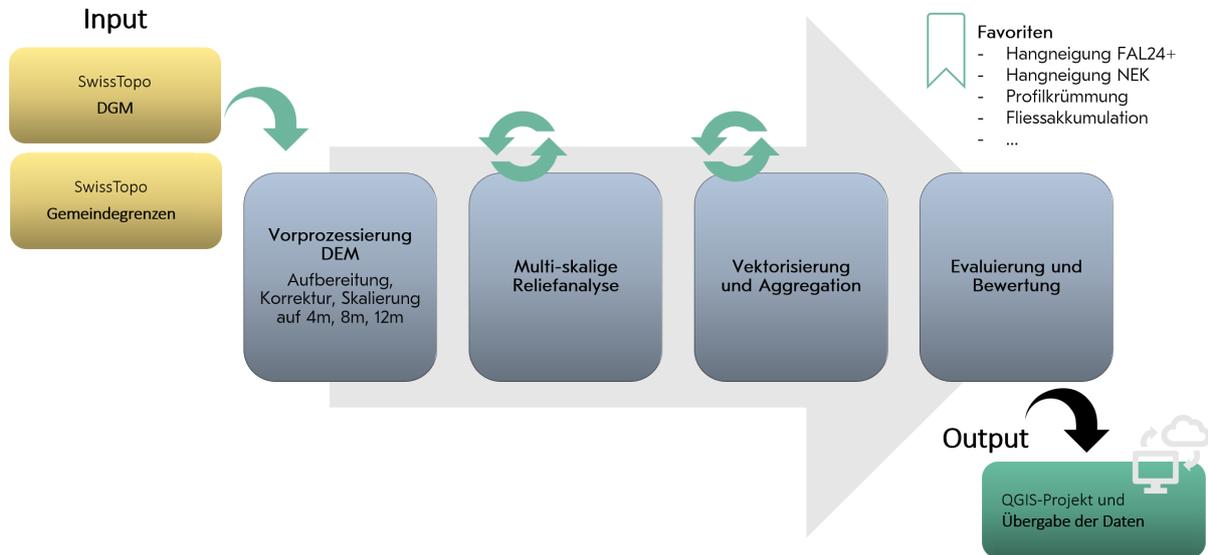


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Prozessablaufs bei der Erstellung der TerraPoly Karten für ein ausgewähltes Gebiet.

Grundlage für die Berechnungen in TerraPoly sind die SwissTopo-Datensätze swissALTI3D mit einer räumlichen Auflösung von 0.5m, swissBOUNDARIES und swissTLM3D. Im Rahmen der Vorprozessierung wird das DGM korrigiert und skaliert. Dabei erfolgt eine Glättung zur Reduktion anthropogener Artefakte. Des Weiteren wird für die Ableitung der Fliehsakkumulation das Strassen- und Wegenetz aus dem DGM entfernt und anschliessend per Interpolation wieder geschlossen. Damit wird versucht, die pedogenetisch relevanten Stoffflüsse besser darzustellen.

Bei der multiskaligen Reliefanalyse (Behrens et al. 2018; Behrens et al. 2019; Behrens and Viscarra Rossel 2020) handelt es sich um eine systematische Berechnung relevanter Reliefparameter auf unterschiedlichen Skalen bzw. räumlichen Auflösungen des Rasterdatensatzes. Dabei wird das Höhenmodell schrittweise in seiner Auflösung reduziert und anschliessend für jede Auflösungsstufe die Reliefparameter berechnet. In der aktuellen Version von TerraPoly werden aufgrund der bisherigen Erfahrungen in der Praxis Auflösungen von 4m, 8m und 12m verwendet. Im Rahmen der Reliefanalyse werden die Hangneigung nach FAL24+, die Hangneigung nach NEK, die Profilkrümmung, die Fliehsakkumulation und die Exposition berechnet. Diese werden in Kapitel 4 im Detail beschrieben.

Die klassifizierten Reliefparameter werden anschliessend in Polygone umgerechnet. Die z.T. durch das Rasterformat bzw. die Rasterauflösung entstehenden Splitterflächen werden dabei gefiltert und die Grenzen geglättet, so dass für einen spezifischen räumlichen Massstab geeignete Entscheidungsgrundlagen erzeugt werden können. Dieses Vorgehen entspricht der Erfassung im Feld und ermöglicht somit eine synergetische Nutzung. Zur Entfernung von Kleinstflächen werden 6 Pixel angesetzt.

Das KOBO liefert neben allen vektorisierten Reliefableitungen sowie den dazugehörigen Rasterdaten, für jeden Reliefparameter eine Auswahl in Bezug auf die Auflösung. Diese vektorisierten Reliefklassifikationen werden in einem QGIS-Projekt aufbereitet und zur Verfügung gestellt.

4 Reliefparameter

4.1 Hangneigung - FAL24+

Die Geländeform ist eine wichtige und grundlegende Grösse in der Feldkartierung, da sie über die Gravitation massgeblich auf die Material- und Stoffflüsse in der Umwelt wirkt. Sie wird in der FAL24+ (AfU Solothurn) als zusammengesetzte Grösse aus Oberflächengestalt (Krümmung) und Hangneigung hergeleitet. Die Hangneigung wird dabei in folgende Klassen unterteilt:

Tabelle 1: Hangneigungsklassen nach FAL24+.

Klasse	Hangneigung [%]
1	0-5
2	5-10
3	10-15
4	15-20
5	20-25
6	25-35
7	35-50
8	50-75
9	75-100

Hangneigung FAL24+

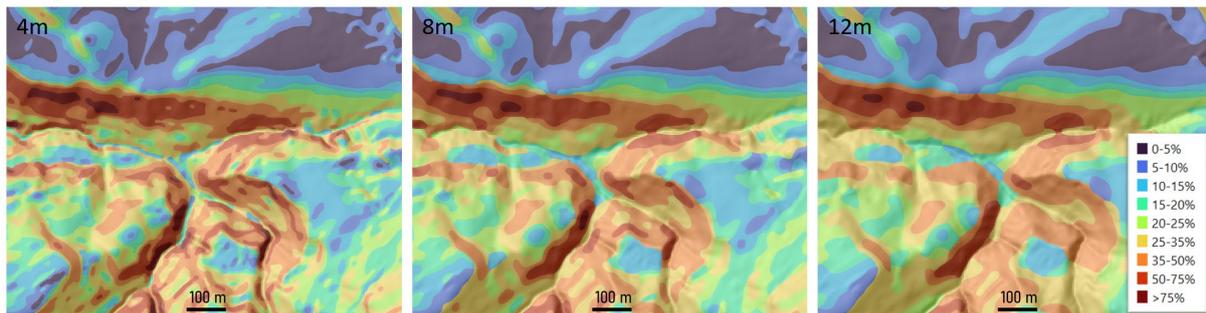


Abbildung 2: Polygonkarten mit Hangneigungsklassen nach FAL24+ für ein Fallstudiengebiet und für DEM Auflösungen von 4m, 8m und 12m.

Für die Berechnung der Hangneigung wurde der Algorithmus von Zevenbergen & Thorne (1987) verwendet.

4.2 Hangneigung – Nutzungseignungsklasse (NEK)

Für die Ausscheidung von Fruchtfolgeflächen (FFF) darf die Hangneigung 18% nicht überschreiten (ARE, 2020). Im Erläuterungsbericht wird darauf hingewiesen, dass die Festlegung der effektiven Hangneigung vorrangig aufgrund von digitalen Geländemodellen vorzunehmen ist. Ergänzende oder korrigierende Feldprüfungen können dabei jedoch herangezogen werden. Dies ist auch notwendig da, wie in Abbildung 2 gezeigt, die jeweilige Grenzziehung von der Auflösung des Höhenmodells abhängig ist. Deswegen kommt der Expertise der Kartierenden in der Auswahl des Polygondatensatzes hier eine besondere Bedeutung zu. Für die Berechnung der Hangneigung wurde der Algorithmus von Zevenbergen und Thorne (1987) verwendet.

Tabelle 2: Hangneigungsklassen für die Beurteilung der Erfüllung des FFF-Kriteriums.

Klasse	Hangneigung [%]	FFF-Kriterium zur Hangneigung
1	0-18	erfüllt
2	>18	nicht erfüllt

Hangneigung NEK

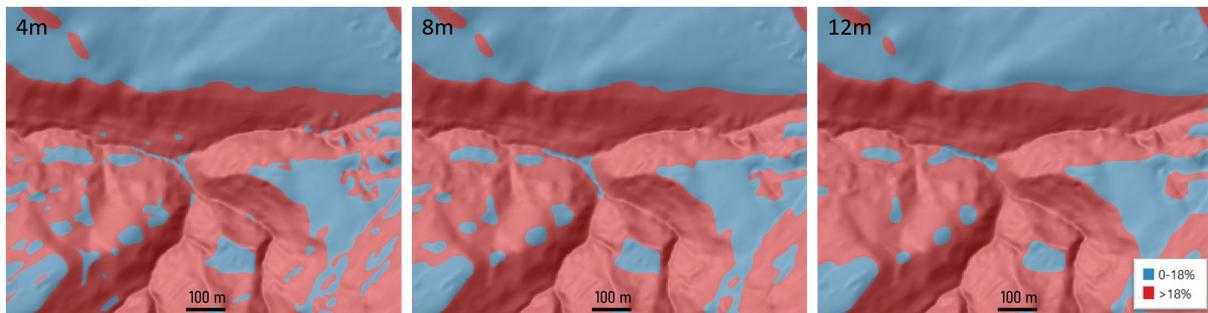


Abbildung 3: Beispiele für Polygonkarten der Hangneigung in zwei Klassen für die Beurteilung der Erfüllung des FFF-Kriteriums betreffend der Hangneigung auf Basis einer DEM Auflösung von 4m, 8m und 12m.

4.3 Profilkrümmung

Die Geländeform ist eine zentrale Grösse in der Feldkartierung und wird nach FAL24+ als zusammengesetzte Grösse aus Oberflächengestalt und Hangneigung hergeleitet. Für die vier unterschiedlichen Wölbungen nach FAL24+ (gleichmässig geneigt, konvex, konkav und ungleichmässig), werden jedoch keine Wölbungsradien genannt, sodass die Einteilung im Rahmen der Kartierung bisher rein expertenbasiert stattfindet.

Die Oberflächengestalt kann mit unterschiedlichen Krümmungen beschrieben werden. Die Profilkrümmung wird in der Richtung der maximalen Neigung gemessen (senkrecht zu den Höhenlinien, Abbildung 4). Sie wirkt in Verbindung mit der Hangneigung und der Hanglänge (s. Fliessakkumulation) massgeblich auf den gravitativen Materialtransport. Wie für die Hangneigungen, wurde für die Krümmung der Algorithmus von Zevenbergen und Thorne (1987) verwendet.

In der Literatur sind wenige Angaben zu bodenkundlich relevanten Klassengrenzen zu Wölbungsradien zu finden. Daher wurde hier auf die Klassifikation nach der geomorphologischen Kartieranleitung zurückgegriffen (Leser und Stäblein, 1975). Problematisch ist hierbei die direkte Übersetzung der Wölbungsradien in das GIS, da diese stark von der Glättung des DGM abhängen. Daher wurden die Klassifikationen der Krümmungen für TerraPoly expertenbasiert erweitert (Tabelle 3).



Abbildung 4: Visualisierung von Profilkrümmung.

Tabelle 3: Klassen der Profilkrümmung basierend auf Wölbungsradien [m].

Klasse	Wölbungsradius [m]	Beschreibung Profilkrümmung
7	$-\infty$ - -1000	Gestreckt
6	-1000 - -600	Sehr schwach konkav
5	-600 - -300	Schwach konkav
4	-300 - -100	Mittel konkav
3	-100 - -60	Konkav
2	-60 - -30	Stark konkav
1	-30 - 0	Sehr stark konkav
13	0 - 30	Sehr stark konvex
12	30 - 60	Stark konvex
11	60 - 100	Konvex
10	100 - 300	Mittel konvex
9	300 - 600	Schwach konvex
8	600 - 1000	Sehr schwach konvex
7	1000 - ∞	gestreckt

Profilkrümmung

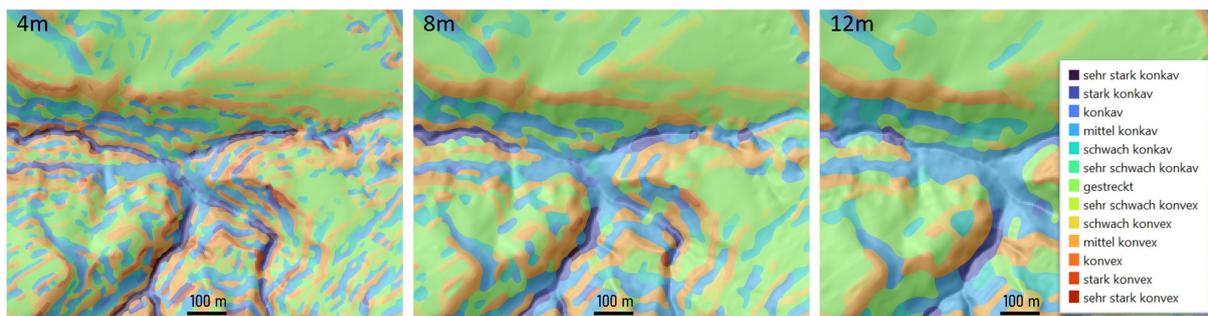


Abbildung 5: Beispiele für Polygonarten der Profilkrümmung auf Basis einer DEM Auflösung von 4m, 8m und 12m.

4.4 Fliessakkumulation

Die Fliessakkumulation berechnet wie viele Rasterzellen eines Einzugsgebietes potenziell und ohne Versickerung in jede Rasterzelle eines DGM entwässern können. Je näher eine Rasterzelle an der Wasserscheide liegt, desto trockener, und je näher sie an einem Vorfluter liegt, desto feuchter ist es durchschnittlich und desto mehr Material kann verlagert worden sein. Die Fliessakkumulation verteilt den Abfluss jeder Rasterzelle an alle direkt benachbarten Zellen, die tiefer liegen (Qin et al., 2011, Abbildung 6). Vor der Berechnung der Fliessakkumulation müssen in dem DGM die abflusslosen Senken gefüllt werden (Wang, L. und H. Liu, 2006). Dabei handelt es sich meist um Senken, die anthropogen entstanden sind (z.B. durch Brücken). Diese verhindern dann eine weitere Abflussakkumulation, obwohl diese in der Natur stattfindet. Strassen und Wege können den Abfluss darüber hinaus auch umleiten. Da es bei Bodenkartierungen jedoch hauptsächlich um Phänomene der langzeitlichen Bodengenese geht, wurden die Strassen und Wege per Interpolation aus dem DGM entfernt. Die Klassifikation erfolgte expertenbasiert.

112	109	107
110	109	108
109	107	106

Abbildung 6: Schematische Darstellung zur Abflussdivergenz (blau: hohe Abflussanteile, orange: geringe Abflussanteile).

Tabelle 4: Klassen der Fliessakkumulation.

Klasse	Beschreibung Fliessakkumulation
1	Sehr trocken
2	Trocken
3-4	Mässig trocken
5-6	feucht
7-8	Sehr feucht
9	Nass
10	Sehr nass

Fliessakkumulation

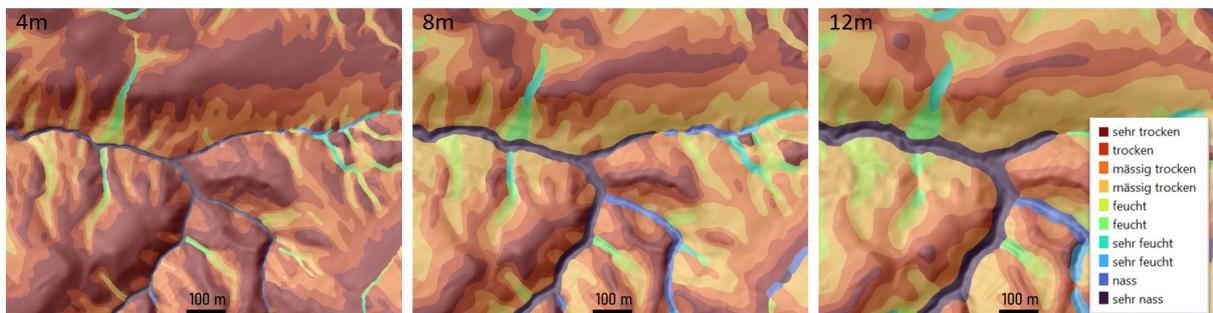


Abbildung 7: Beispiele für Polygonkarten der Fliessakkumulation auf Basis einer DEM Auflösung von 4m, 8m und 12m.

4.5 Exposition

Die Exposition beschreibt die Ausrichtung des Geländes in Bezug auf die Himmelsrichtung bzw. der Einfallrichtung der mittäglichen Sonnenstrahlen (Wikipedia, 2023). Die Exposition von 180° kennzeichnet beispielsweise einen Südhang. In Kombination mit der Hangneigung werden damit die Einstrahlungsintensität der Sonne und damit wichtige Wuchsbedingungen für Pflanzen und Bodenlebewesen abgebildet. Diese haben langfristig einen Einfluss auf bodenbildende Faktoren und beeinflussen unterschiedliche Bodeneigenschaften wie beispielsweise den Kohlenstoffgehalt, den Wasserhaushalt oder die biologische Aktivität.

Tabelle 3 : Klassen der Exposition.

Klasse	Exposition	Lage zur mittäglichen Sonne	[°]
1	Nord	Schatten	337,5 bis 22,5
2	Nordost	Schatten	22,5 bis 67,5
3	Ost	Schatten	67,5 bis 112,5
4	Südost	Sonne	112,5 bis 157,5
5	Süd	Sonne	157,5 bis 202,5
6	Südwest	Sonne	202,5 bis 247,5
7	West	Sonne	247,5 bis 292,5
8	Nordwest	Schatten	292,5 bis 337,5

Exposition

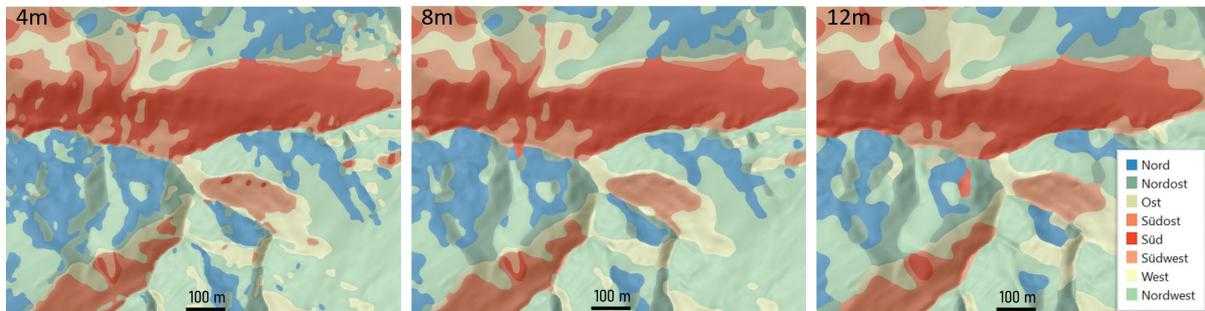


Abbildung 8: Beispiele für Polygonkarten der Exposition auf Basis einer DEM Auflösung von 4m, 8m und 12m.

5 Datenstruktur der Produkte

Durch die Kombination aus den fünf Reliefparametern und den drei Skalen ergeben sich pro Gebiet insgesamt 15 standardisierte Datensätze. Anhand von bisherigen Erfahrungen mit TerraPoly hat sich gezeigt, dass eine zu grosse Anzahl an Reliefparametern in der Handhabung und für die Interpretation nicht praktikabel ist. Daher kann je Reliefparameter eine Auswahl bestimmter Auflösungskombinationen eigenständig erstellt werden (vgl. z.B. Tabelle 6). Der gesamte Vektordatensatz wird dem Nutzer in einem QGIS-Projekt zur Verfügung gestellt. Die vektorisierten Layer sowie die dazugehörigen originalen Rasterdaten werden zudem in einem zip-File mitgeliefert. Die Struktur im gelieferten zip-Dokument gestaltet sich wie folgt:

[\\TerraPoly\Polygon](#): Reliefparameter im shp-Format mit der empfohlenen Auflösung (QGIS Layer)

[\\TerraPoly\Raster](#): Reliefparameter im tif – Format mit weiteren Auflösungen

Tabelle 6: Ausgewählte Skalen der Reliefparameter, die in einem QGIS-Projekt zusammengestellt werden können.

Parameter	Auflösung [m]	Dateinamen *
Hangneigung FAL24+	4	Neigung_FAL24p_d6px_4.shp
Hangneigung NEK	8	Neigung_NEK_d6px_8.shp
Profilkrümmung	8	Profil_Kruemmung_d6px_8.shp
Fliessakkumulation	4	Fliessakkumulation_d6px_4.shp
Exposition	8	Exposition_d6px_8.shp

* Die letzte Ziffer gibt die Auflösung an, das Kürzel d6px in den Dateinamen bezieht sich auf die räumliche Berechnung der Karten (Glättung) und ist für alle Reliefparameter gleich.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Struktur eines exemplarischen QGIS-Projekts dargestellt. Darin befindet sich max. 1 Layer je Reliefableitung (Hangneigung FAL24+, Hangneigung NEK, Fliessakkumulation, Profilkrümmung und Exposition). Die Dateinamen enthalten keine Leerzeichen und keine Umlaute.



Abbildung 9: Übersicht der Struktur in einem exemplarischen QGIS-Projekt.

6 Kontakt und Datenlieferung

Die Berechnungen multiskaligen Reliefableitungen dient zur Unterstützung der Konzeptphase und Feldarbeiten in kantonalen Bodenkartierungen. Die Berechnung und Lieferung der Produkte erfolgt auf **Stufe der Gemeindegrenzen**. Anfragen für diesen Service sind über das online-Formular auf der KOB-

Webseite mit Angabe der BFS Nummer der Gemeinde (Bundesamt für Statistik) und dem Gemeindefnamen zu stellen. Nach Bearbeitung der Anfrage wird dem Nutzer **pro Gemeinde** die Daten per Link als Download zur Verfügung gestellt. Um den Arbeitsablauf zu optimieren, bitten wir sie, Anfragen, die mehr als 3 Gemeinden umfassen, in dem online-Formular zu begründen.

Ihr Feedback ist für uns sehr wichtig. So können wir Ihre Anregungen aufnehmen und TerraPoly als Service des KOBO für die Kantone stets weiterentwickeln. Teilen Sie uns daher gerne Ihre Erfahrungen und Verbesserungswünsche mit. Nutzen Sie hierfür folgenden Kontakt: service@ccsols.ch.

7 Literaturverzeichnis

Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2020): Sachplan Fruchtfolgeflächen. Bern.

AfU Solothurn (Hg.) (2020): Projekthandbuch Kanton Solothurn. Kartiermethodik, Teil III, Kartiermethode FAL24+. 6. Auflage.

Brunner, Johann; Jäggli, Friedrich; Nievergelt, Jakob; Peyer, Karl (1997): Kartieranleitung. Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. Zürich Reckenholz: Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz (FAL).

Behrens, T., Viscarra Rossel, R. A., Kerry, R., MacMillan, R., Schmidt, K., Lee, J., Scholten, T., Zhu, A-X., 2019. The relevant range of scales for multi-scale contextual spatial modelling. Scientific Reports. 9: 14800

Behrens, T., Schmidt, K., MacMillan, R.A., Viscarra Rossel, R., 2018. Multi-scale Digital Soil Mapping with deep learning. Scientific Reports 8:15244.

Behrens, T., MacMillan, R. A., Rossel, R. A. V., Schmidt, K., & Lee, J. .2019. Teleconnections in spatial modelling. Geoderma, 354:113854.

Behrens, T., 2020. Vectorizing raster data. Unpublished. Soilution GbR.

Qin, C. Z., Zhu, A. X., Pei, T., Li, B. L., Scholten, T., Behrens, T. & Zhou, C. H., 2011. An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient. Precision Agriculture, 12(1).

Wang, L. & H. Liu, 2006. An efficient method for identifying and filling surface depressions. IJGIS. 20/2.

Wikipedia (2023): [https://de.wikipedia.org/wiki/Exposition_\(Geographie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Exposition_(Geographie))

Wilson, J.P. & Gallant, J.C., 2000. Primary Topographic Attributes. In: Wilson, J.P. & Gallant, J.C. [Eds.]: Terrain Analysis: Principles and Applications, John Wiley & Sons.

Zevenbergen, L.W., Thorne, C.R., 1987. Quantitative analysis of land surface topography. ESPL, 12.
