Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope

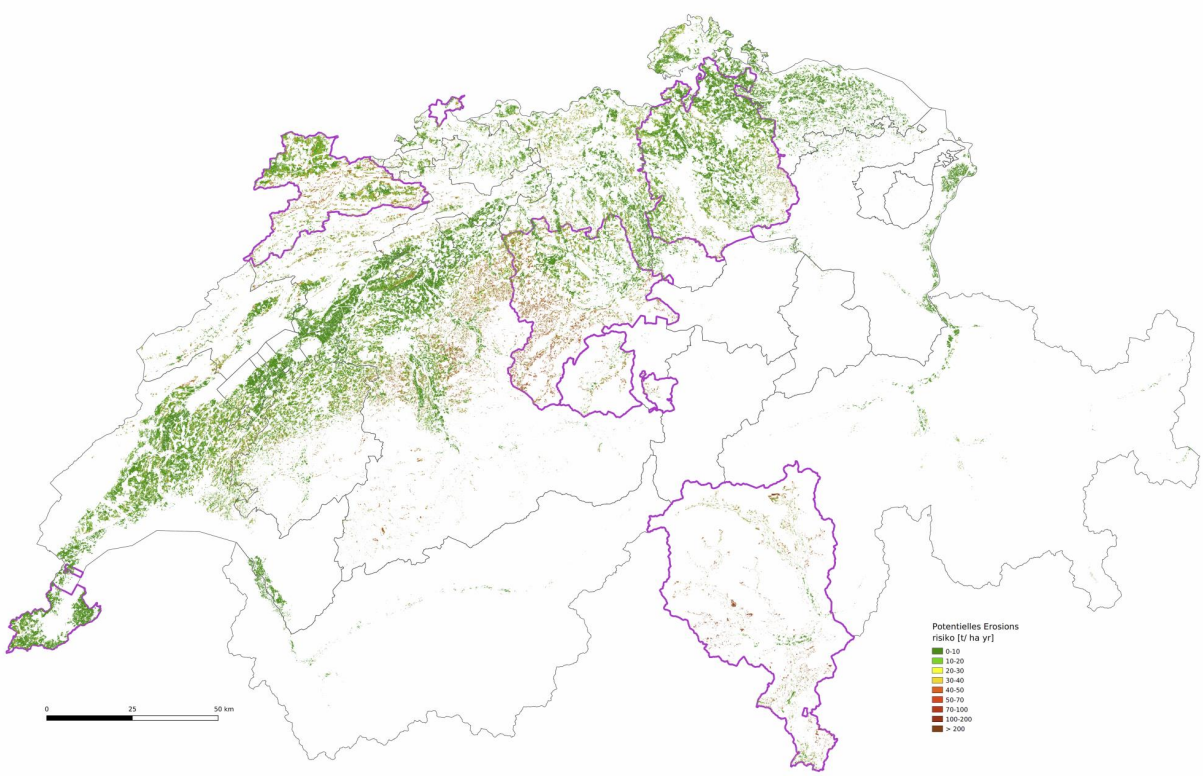
UNIVERSITÄT
BERN

CDE
CENTRE FOR DEVELOPMENT
AND ENVIRONMENT

Aktualisierung und Optimierung der Erosionsrisikokarte (ERK2)
Die neue ERK2 (2019) für das Ackerland der Schweiz

Schlussbericht

2019



Pascal Bircher (CDE)

Hanspeter Liniger (CDE)

Volker Prasuhn (Agroscope)

Auftraggeber: Bundesamt für Landwirtschaft (BLW)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 3
1. Einleitung 8
1.1 Ausgangslage und Auftrag 8
1.2 Ziel der neuen Erosionsrisikokarte 8
1.3 Inhalt des vorliegenden Berichtes 9
2. Methodik 9
2.1 Verwendetes Erosionsmodell 9
2.2 Neue Feldblockkarte 10
2.3 Vorgehen 12
3. Resultate unkorrigiertes Erosionsmodell 12
3.1 Topographiefaktoren (LS) [-] 12
3.2 Erodibilitätsfaktor (K) [t h N-1 ha-1] 18
3.3 Erosivitätsfaktor (R) [N h-1] 20
3.4 Potentielles Erosionsrisiko (LS*K*R) [t/ha a] 22
3.5 Unterscheidung von Ackerland und Dauergrünland 23
3.6 Zusammenfassende Beurteilung der neuen Grundlagen bzw. Faktoren 26
4. Kalibrierung und Validierung des Erosionsmodells 28
4.1 Quantitative Statistik 28
4.2 Pseudo-Qualitative Analyse 30
4.3 Synthese der verschiedenen statistischen Verfahren 32
5. Korrektur der Erosionsrisikokarte und Ergebnisse der neuen ERK2 (2019) des Ackerlandes 32
5.1 Korrektur der Erosionsrisikokarte 32
5.2 Die neue, korrigierte Erosionsrisikokarte des Ackerlandes der Schweiz 39
5.3 Methodische Probleme und Ungenauigkeiten bei der Erstellung der Ackerlandkarte 42
6. Web-Applikation zur Berechnung des aktuellen Erosionsrisikos 49
7. Schlussfolgerung und Ausblick 49
Referenzen 50
Anhang 53

Zusammenfassung

Die neue Erosionsrisikokarte (ERK2 2019) der Schweiz basiert weiterhin auf der Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), allerdings mit einem neuen Berechnungsalgorithmus und anderer Software. Die RUSLE ist ein empirisches Erosionsmodell und zeigt das mittlere langjährige Erosionsrisiko in Tonnen pro Hektare und Jahr. Sie erlaubt mit ihrem modularen Aufbau von sechs Faktoren Daten unterschiedlicher Qualität zu verbinden. Die ERK2 2019 verwendet hierzu vier der sechs erwähnten Faktoren, um das potentielle Erosionsrisiko ohne Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor sowie erosionsmindernde Massnahmen (C- und P-Faktor) darzustellen. Neu gegenüber der alten Erosionsrisikokarte (ERK2) sind folgende Punkte: A) Die neue Feldblockkarte basiert nun auf den neuen Daten des topographischen Landschaftsmodells (TLM3D; 2015; Version 1.3) von Swisstopo. B) Zur Berechnung des L-Faktors (Hanglänge bzw. Grösse des Einzugsgebietes) wurden verschiedene Multiple Flow Algorithmen auf der Grundlage des Höhenmodells SwissALTI3D im 2x2m-Raster ausführlich getestet und bewertet. Der Ansatz MTFD von Seibert & Glynn (2007) mit der Konvergenzeinstellung 1.1 wurde schliesslich ausgewählt. C) Die Berechnung des S-Faktors (Hangneigung) blieb weitgehend unverändert. D) Der neue LS-Faktor unterscheidet sich statistisch nicht markant von der bisherigen ERK2, basiert nun aber auf der Open Source Software SagaGis. E) Der K-Faktor (Bodenerodibilität) wurde methodisch gleich wie bei der bisherigen ERK2 umgesetzt, beinhaltet aber zusätzliche detaillierte kantonale Bodendaten. F) Die neue R-Faktor-Karte (Erosivität der Niederschläge) erreicht deutlich höhere Durchschnittswerte als der R-Faktor der bisherigen ERK2. Dies ist auf eine andere Methodik und eine bessere Datenlage zurückzuführen.

Das berechnete potentielle Erosionsrisiko wurde in der Region Frienisberg mit C- und P-Faktoren zum aktuellen Erosionsrisiko verrechnet und mit den 10-jährigen Erosionsschadenskartierungen in der Region Frienisberg verglichen. Das Erosionsmodell führte zu einer massiven Überschätzung des Bodenabtrages in der Grössenordnung von Faktor 5. Deshalb wurde das potentielle Erosionsrisiko entsprechend korrigiert und neu klassiert. Die neue, korrigierte ERK2 2019 unterscheidet sich daher deutlich von der alten ERK2 2010. Die neue ERK2 2019 kann durch diese Korrektur mit C- und P-Faktoren zum aktuellen Bodenabtrag verrechnet und zu den gesetzlichen Richtwerten für tolerierbaren Bodenabtrag in Bezug gesetzt werden.

Die Unterscheidung von Acker- und Dauergrünland – und damit eine ERK2 nur für das Ackerland (inklusive Kunstwiese) – konnte bisher nur für 19 Kantone, für die die entsprechenden parzellenscharfen digitalen Daten vorhanden waren, umgesetzt werden. Entsprechend liegt neu eine Karte des potentiellen Erosionsrisikos des Ackerlandes für diese 19 Kantone vor. Rund 75 % der Ackerfläche der Schweiz konnte dadurch parzellenscharf erfasst werden. Der längjährige mittlere potentielle Bodenabtrag dieser Flächen beträgt rund 17 t ha^{-1} a^{-1}. Für die restlichen sieben Kantone beruht die Unterscheidung von Ackerland und Dauergrünland unter anderem auf Satellitendaten (Fcover 300m, MODIS). Die Datenqualität ist hier deutlich schlechter. Zusätzlich zur Erosionsrisikokarte wird neu eine Karte der Fliesswege für Oberflächenabfluss auf der landwirtschaftlich genutzten Fläche basierend auf dem L-Faktor zur Verfügung gestellt.

Ein C-Faktor-Tool, welches die Bewirtschaftung (Fruchtfolge und Bodenbearbeitung) berücksichtigt, wurde neu entwickelt. Es ist als Alpha-Version auf einem virtuellen Rechner verfügbar. Eine Web-Applikation, die das neue C-Faktor-Tool mit der neuen ERK2 2019 verknüpfen soll, ist noch in Entwicklung.

Résumé

La nouvelle carte de risques d'érosion (CRE2 2019) de la Suisse se fonde toujours sur la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), mais avec un nouvel algorithme de calcul et un autre logiciel. La RUSLE est un modèle d'érosion empirique montrant le risque d'érosion moyen à long terme en t ha^{-1} a^{-1}. Elle permet de relier des données de différente qualité grâce à sa conception modulaire en six facteurs. La CRE2 2019 utilise à cette fin quatre des six facteurs mentionnés afin de représenter le risque potentiel d'érosion en excluant les facteurs de la couverture et du mode de travail du sol, ainsi que les mesures de réduction de l'érosion (facteurs C et P). Les nouveautés par rapport à l'ancienne carte de risques d'érosion (CRE2) sont les suivantes :
A) La nouvelle carte des blocs de parcelles se base désormais sur les nouvelles données du modèle topographique de paysage (TLM3D ; 2015 ; version 1.3) de Swisstopo.
B) Divers algorithmes Multiple Flow ont été testés et évalués en profondeur sur la base du modèle numérique de terrain SwissALTI3D dans une grille de 2x2 m, en vue du calcul du facteur L (déclivité et longueur des pentes). L'approche MTFD de Seibert & Glynn (2007) avec le réglage de convergence 1.1 a été finalement choisie.
C) Le calcul du facteur S (déclivité) reste largement inchangé.
D) Le nouveau facteur LS ne se distingue pas de manière marquante au plan statistique de l'actuelle CRE2, mais se fonde sur le logiciel Open Source SagaGis.
E) Le facteur K (potentiel d'érosion du sol) a été appliqué de manière semblable à la CRE2 actuelle au plan de la méthode, mais il comprend des données cantonales détaillées supplémentaires sur le sol.
F) La nouvelle carte du facteur R (agressivité des précipitations) atteint des valeurs moyennes nettement plus élevées que le facteur R de l'actuelle CRE2. Cela s'explique par un changement de méthode et par une amélioration des données disponibles.

Le risque d'érosion potentiel calculé dans la région du Frienisberg a été multiplié par les facteurs C et P. Il en est résulté le risque d'érosion actuel, qui a été comparé à la cartographie décennale des dommages causés par l'érosion dans la région du Frienisberg. Le modèle d'érosion a conduit à une surestimation massive de l'érosion des sols de l'ordre du facteur 5 et par conséquent, le risque potentiel d'érosion a été corrigé et reclassifié. La nouvelle ERK2 2019 corrigée diffère donc sensiblement de l'ancienne ERK2 2010. La correction avec les facteurs C et P permet de calculer l'érosion actuelle du sol avec la nouvelle ERK2 2019. Ceci peut être comparé avec les valeurs indicatives légales pour l'érosion tolérable des sols.

La distinction entre les terres assolées et les prairies permanentes – et donc une CRE2 uniquement pour les terres assolées (y compris les prairies temporaires) – n'a pu être effectuée jusqu'ici que pour 19 cantons pour lesquels les données numériques correspondantes concernant chaque parcelle étaient disponibles. Une carte du potentiel de risque d'érosion des terres assolées est donc maintenant disponible pour ces 19 cantons. Environ 75% des terres assolées de Suisse ont ainsi été saisies à la parcelle près. La perte potentielle moyenne de sol à long terme pour ces surfaces est d'environ 17 t ha^{-1} a^{-1}. Pour les sept autres cantons, la différenciation entre les terres assolées et les prairies permanentes repose entre autres sur des données satellites (Fcover 300m, MODIS). La qualité des données est nettement moins bonne dans ce cas. En plus de la carte des risques d'érosion, une carte des lignes d'écoulement pour le ruissellement sur les surfaces agricoles est mise à disposition sur la base du facteur L.

Un nouvel outil Facteur C prenant en compte l'exploitation (assolement et travail du sol) a été développé. Il s'agit d'une version alpha disponible sur une machine virtuelle. Une application web servant à connecter l'outil facteur C avec la nouvelle CRE2 2019 est en cours de développement.

Riassunto

La nuova carta del rischio d'erosione (CRE2 2019) della Svizzera continua a basarsi sulla Revised Universal Soil Equation (RUSLE), tuttavia con un nuovo algoritmo di calcolo e altri software. La RUSLA è un modello d'erosione empirico e mostra il rischio d'erosione medio a lungo termine in t $ha^{-1}a^{-1}$. Grazie alla sua struttura modulare di sei fattori permette di collegare dati di qualità diversa. La CRE2 2019 utilizza a tal proposito quattro dei sei fattori menzionati per rappresentare il rischio d'erosione potenziale senza fattore di copertura e di lavorazione nonché le misure di riduzione dell'erosione (fattore C e P). Le novità rispetto alla vecchia carta del rischio d'erosione (CRE2) sono:
A) La nuova carta dei blocchi di particelle si basa ora sui nuovi dati del modello topografico del paesaggio (TLM3D; 2015; versione 1.3) di Swisstopo.
B) Per il calcolo del fattore L (lunghezza del pendio e dimensione del comprensorio) sono stati testati e valutati approfonditamente vari algoritmi Multiple Flow in base al modello altitudinale SwissALTI3D nel reticolo a celle 2x2 metri. Infine è stato selezionato l'approccio MTFD di Seibert & Glynn (2007) con l'impostazione di convergenza 1.1.
C) Il calcolo del fattore S (declività) è rimasto sostanzialmente invariato.
D) A livello statistico il nuovo fattore LS non è molto diverso rispetto alla CRE2 finora in uso, ma si basa sul software open source SagaGis.
E) Il fattore K (erodibilità del suolo) è stato ottenuto dal profilo metodico analogamente alla CRE2 finora in uso, pur contenendo supplementari dati sul suolo cantonali dettagliati.
F) La nuova carta fattore R (erosività delle precipitazioni) raggiunge valori medi nettamente più elevati rispetto al fattore R della CRE2 finora in uso. Ciò è riconducibile a un metodo diverso e a una migliore base di dati.

Il potenziale rischio d'erosione calcolato è stato combinato per la regione di Frienisberg con i fattori C e P per il rischio d'erosione attuale e confrontato con le mappe decennali dei danni da erosione nella regione di Frienisberg. Il modello di erosione ha portato ad una massiccia sovrastima dell'erosione del suolo nell'ordine di un fattore 5. Pertanto, il potenziale rischio d'erosione è stato corretto e riclassificato di conseguenza. La nuova CRE2 2019 corretta differisce quindi in modo significativo dalla vecchia CRE2 2010. Grazie a questa correzione, la nuova CRE2 2019 può essere combinata con i fattori C e P, ottenendo così la perdita di suolo attuale. Questa può a sua volta essere posta in relazione con i valori guida legali per la perdita di suolo tollerabile.

Finora la differenziazione tra la superficie coltiva e quella permanentemente inerbita, e quindi una CRE2 soltanto per la superficie coltiva (incl. prato artificiale), ha potuto essere realizzata soltanto per 19 Cantoni per i quali erano disponibili i relativi dati digitali a livello particellare. Di conseguenza vi è una nuova carta del potenziale rischio d'erosione della superficie coltiva per questi 19 Cantoni. Circa l'75 per cento della superficie coltiva svizzera ha potuto essere rilevata in tal modo a livello particellare. La potenziale perdita di suolo media a lungo termine di queste superfici ammonta a 17 t ha^{-1} a^{-1} circa. Per i restanti 7 Cantoni la differenziazione tra superficie coltiva e superficie permanentemente inerbita si basa, tra l'altro, su dati satellitari Fcover 300m, MODIS), il che pregiudica considerevolmente la qualità dei dati. Oltre alla carta del rischio d'erosione è ora messa a disposizione una nuova carta delle vie d'infiltrazione per i deflussi superficiali sulla superficie agricola utilizzata a scopo agricolo in base al fattore L.

È stato sviluppato un nuovo strumento per il fattore C, che considera la gestione (avvicendamento delle colture, lavorazione del suolo), ed è disponibile quale versione alfa su una macchina virtuale. È

ancora in fase di sviluppo un'applicazione web che connetta questo strumento con la nuova CRE2 2019.

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage und Auftrag

Vom Centre for Development and Environment (CDE) der Universität Bern und Agroscope wurde im Jahr 2010 im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW) eine Erosionsrisikokarte der Schweiz im 2x2m-Raster (ERK2) erstellt (Gisler et al. 2010; Gisler et al. 2011; Prasuhn et al. 2013) und auf dem Geoportal öffentlich zugänglich gemacht (https://map.geo.admin.ch). Die ERK2 erfasst das potentielle Erosionsrisiko, d.h. das aufgrund der Standortfaktoren Niederschlag, Boden und Relief bedingte Erosionsrisiko für die landwirtschaftlich genutzte Fläche der Schweiz bis zur Bergzone 2. Die ERK2 dient zur Sensibilisierung der Landwirtinnen und Landwirte sowie den Behörden als Hilfsmittel für den Vollzug. Sie wird in der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft, Modul Boden, explizit als Hilfsmittel erwähnt (BLW & BAFU 2013). Der bisherige Einsatz der ERK2 hat gezeigt, dass sie ein brauchbares Instrument sowohl für die Praxis als auch für die Behörden ist. Ein häufig geäussertes Manko der ERK2 ist es aber, dass sie nicht nur die Ackerflächen, sondern auch die Dauergrünlandflächen umfasst. Weiterhin wurde häufig der Wunsch geäussert, nicht nur das potentielle Erosionsrisiko zu erfassen, sondern auch das aktuelle Erosionsrisiko unter Einbezug von Landnutzung und Bodenbearbeitung (Hänni 2017). Da es zwischenzeitlich auch zahlreiche neue Datengrundlagen gibt und das Modell, auf dem die ERK2 beruht, auf aktueller GIS-Umgebung nicht mehr läuft, wurde vom BLW der Auftrag erteilt, eine neue, aktualisierte und verbesserte ERK2 zu erstellen.

1.2 Ziel der neuen Erosionsrisikokarte

Ab 2018 soll eine neue und stark verbesserte ERK2 für den Vollzug im Umwelt- und im Landwirtschaftsrecht zur Verfügung stehen, welche für die darauf folgenden 5-10 Jahre ihre Gültigkeit hat. Dazu werden zunächst die zahlreichen, in der letzten Zeit erneuerten Grundlagendaten verwendet. Zudem werden die für die Erstellung der Karte notwendigen EDV-Tools durch neue Instrumente abgelöst. Mit diesen Anpassungen kann die ERK2 für den Vollzug gesetzlicher Grundlagen im Bereich Erosion im Umweltschutzgesetz bzw. der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) auch in 10 Jahren sinnvoll genutzt und ab 2018 auch allenfalls im Landwirtschaftsgesetz bzw. der Direktzahlungsverordnung (DZV) berücksichtigt werden.

Die Entwicklung im Bereich digitaler Daten verläuft rasant. In absehbarer Zukunft wird das der ERK2 zugrunde liegende Erosionsmodell AVErosion nicht mehr verwendet werden können. Seit dem Start zur Erarbeitung der ERK2 im Jahr 2008 wurden viele weitere Grundlagendaten aktualisiert oder stehen neu zur Verfügung. Vor allem war es bislang nicht möglich, Landnutzung und Bodenbearbeitung – wichtige Faktoren im Bodenschutz – flächenhaft in das Modell zu integrieren. Somit geht die momentane Erosionsrisikokarte praktisch von einer „Schweiz ohne Pflanzenbedeckung“ mit unrealistisch hohen – rein theoretischen – Erosionswerten aus. Mit der Ausscheidung der Dauergrünflächen und der Modellierbarkeit der Fruchtfolgen von Ackerland besteht nun erstmals die Chance, eine noch realitätsnähere Karte zu produzieren. Zudem sollen neu digitale Parzellenpläne in die ERK2 (2019) aufgenommen werden. Damit werden die Voraussetzungen geschaffen, dass die ERK2 (2019) für den Vollzug der DZV als Hilfsmittel genutzt werden kann. Daher ist eine vollständige Überarbeitung der ERK2 nötig.

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) wird vom geowissenschaftlichen Institut der Universität Basel parallel zu diesem Projekt eine Erosionsrisikokarte für das Dauergrünland (inklusive Söm-

merungsgebiet) erstellt. Dazu wurde teilweise ein anderes methodisches Vorgehen gewählt (siehe dazu Schmidt et al. 2018; Schmidt et al. in prep)

1.3 Inhalt des vorliegenden Berichtes

Im vorliegenden Bericht werden die Grundlagen zur Erstellung der neuen ERK2 (2019) kurz erläutert und die verschiedenen neuen Karten der einzelnen Faktoren und des potentiellen Erosionsrisikos präsentiert. Detaillierte Ausführungen zum methodischen Vorgehen erfolgen in wissenschaftlichen Publikationen im Rahmen der Dissertation von Pascal Bircher (Bircher et al. 2019a; 2019b). Da die erforderlichen Grundlagen für die Separierung des Ackerlandes bis Ende 2018 – wider Erwarten – nicht flächendeckend zur Verfügung standen, kann hier nur für 19 Kantone das Ergebnis aufgezeigt werden. Alle Berechnungen zum potentiellen Erosionsrisiko erfolgten zunächst für die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche der Schweiz auf Basis von Feldblöcken. Die Separierung des Ackerlandes erfolgte erst anschliessend.

Im zweiten Teil des Berichtes (Kap. 4) erfolgt eine Überprüfung des verwendeten Erosionsmodells anhand langjähriger Feldkartierungen zur Bodenerosion in der Region Frienisberg. Basierend auf diesem Vergleich erfolgt eine Korrektur des Erosionsmodells (Kap. 5). Die auf dem Geoportal des Bundes verfügbare neue ERK2 (2019) des Ackerlandes entspricht dieser korrigierten Version.

2. Methodik

2.1 Verwendetes Erosionsmodell

Es wurden verschiedene Erosionsmodelle für die Erstellung der neuen ERK2 (2019) in Erwägung gezogen. Physikalisch-deterministische Erosionsmodelle wie Erosion 3D (Schmidt 1991, Schmidt et al. 1999) scheiden aus, da eine Parametrisierung eines solchen Modelles für die ganze Schweiz nicht möglich ist und auch enorme Rechenkapazitäten notwendig wären. Die „Unit Stream Power - based Erosion Deposition“ (USPED) (Mitasova et al. 1996, Mitas and Mitasova 1998) wurde als Alternative getestet, da sie Erosion und Deposition abbildet. Sie führte aber zu unbefriedigenden Resultaten. Erosion und Deposition lagen häufig unmittelbar in benachbarten Zellen. Eine mögliche Ursache dafür war vermutlich die hohe Auflösung des von uns verwendeten Höhenmodells (2mx2m).

Die Entscheidung fiel auf die „Revised Universal Soil Loss Equation“ (RUSLE) (Renard et al. 1997), die auch Modellgrundlage der bisherigen ERK2 war. Die RUSLE bzw. ihre Vorgängerversion USLE ist das bewährteste und weitläufig bekannteste Erosionsmodell zur Risikoabschätzung. Ausserdem entspricht die RUSLE internationalen Standards und kann somit einfach mit Erosionskarten anderer Regionen und Ländern abgeglichen werden. Daneben bietet die RUSLE durch ihren modularen Aufbau die höchste Transparenz für den Vollzug, da sie sich einfach in einzelne, nachvollziehbare Faktoren zerlegen lässt und sich damit einfach verändern, verbessern und erneuern lässt. Das „Joint Research Centre“ (JRC) (Panagos et al. 2012, European Soil Data Centre ESDAC) und die Uni Basel haben die Diskussion zur Auswahl des Modells RUSLE bereits ausführlich geführt und auch publiziert (Panagos et al. 2015 a,b,c).

Das RUSLE-Modell erlaubt die Berechnung des mittleren langjährigen Erosionsrisikos (A) in t ha^{-1} a^{-1} über sechs Faktoren

$$A=R*K*LS*C*P$$

- Der Erosivitätsfaktor (R) erfasst die Erosivität des Niederschlags in [MJ mm ha^{-1} h^{-1} a^{-1} oder N h^{-1} a^{-1}].
- Der K-Faktor (Erodibilitätsfaktor) [t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1} oder t h N^{-1} ha^{-1}] berücksichtigt die Bodeneigenschaften Körnung und organisches Material.
- Der LS-Faktor [-] ist der Hanglängen (L) und Hangneigungsfaktor (S) und wird basierend auf dem Höhenmodell (SwissALTI3D; 2015) modelliert.
- Der C-Faktor [-] ist der Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor und enthält Informationen bezüglich Feldfruchtwechsel und Bearbeitungsmethoden wie Pflug, Mulch-, und Direktsaat.
- Der P-Faktor [-] entspricht dem Faktor, welcher erosionsschützende Massnahmen berücksichtigt, wie hangparallele oder hangquere Bearbeitung sowie Terrassierung (z.B.: Reben und Hecken).

Das potentielle Erosionsrisiko [t ha^{-1} a^{-1}] unterscheidet sich vom aktuellen Erosionsrisiko [t ha^{-1} a^{-1}] dadurch, dass der C- und P-Faktor fehlen. Deshalb ist das potentielle Erosionsrisiko erheblich höher (Faktor 10-100; abhängig von der Feldfrucht und Bearbeitungsmethode) als das aktuelle Erosionsrisiko (A) (Wischmeier & Smith 1978, Renard et al. 1997).

2.2 Neue Feldblockkarte

Feldblöcke bilden die Grundlage für die Erosionsberechnung. Einerseits stellen sie die räumliche Berechnungseinheit für die Relieffaktoren dar, da sie als hydrologisch abgeschlossen betrachtet werden. Andererseits wurde die landwirtschaftlich genutzte Fläche der Schweiz pro Feldblock ermittelt. Im Feldblockplan sind Ackerflächen, Reben und andere Dauerkulturen, Wiesen, Weiden und alpwirtschaftlich genutzte Graslandflächen enthalten. Verglichen mit der amtlichen Vermessung der Schweiz entspricht die Feldblockkarte mit grosser Übereinstimmung (92 %) dem Attribut 8, 9 und 10 (Tabelle 1) der amtlichen Vermessung der Schweiz (Quelle: Amtliche Vermessung Bern).

Tabelle 1: Attribute und deren Beschreibungen basierend auf den Daten der amtlichen Vermessung.

Attribut	Beschreibung nach amtlicher Vermessung
8	Acker, Wiese, Weide
9	Intensivkultur (Reben)
10	Übrige Intensivkultur

Die bisherige Feldblockkarte der ERK2 (Gisler et al. 2010) basiert auf den Vector 25-Daten von 2008 (Genauigkeit: 3 - 8 m) und wurde aus den 1:25‘000 Kartenblättern digitalisiert (Swisstopo). Die neue Datengrundlage, das topographische Landschaftsmodel (TLM3D Version 1.3; 2015), weist eine höhere Qualität (Genauigkeit: 1 - 3 m) auf, ist aktueller und hat eine höhere Deckungsgleichheit mit der amtlichen Vermessung. Die Daten der amtlichen Vermessung konnten aufgrund der unvollständigen kantonalen Datenlage nicht berücksichtigt werden. Die Anzahl der Feldblöcke ist um etwa 14‘000 höher als im alten Feldblockplan (Tabelle 2), wenn die die gleiche Maske wie bei der ERK2 verwendet

wurde. Der Durchschnitt und der Median der Feldblockgrösse sind nicht erheblich höher. Die Minimalfläche wurde auf 0.25 ha festgelegt, um Verschneidungsartefakte zu entfernen. Die neue Feldblockkarte unter Einschluss der Bergzonen 3 und 4 sowie des Sömmerungsgebietes hat eine deutlich höhere Anzahl an Feldblöcken und umfasst eine grössere Fläche (Tabelle 2, Abbildung 1).

Tabelle 2: Statistischer Überblick der alten und neuen Feldblockkarten der Schweiz.

Feldblockkarte	ERK2, Gisler et al. (2010); (bis Bergzone 2)	ERK2 (2019); gleiche Maske wie 2010	ERK2 (2019) mit Dauergrünland und Sömmerungsgebiet
Anzahl	176‘159	190‘276	328‘477
Fläche in ha	886‘835	993‘109	2‘018‘510
Fläche in km^2	8‘868	9‘931	20‘185
Min in ha *	0.25	0.25	0.25
Max in ha	545	381	5‘674
Durchschnitt in ha	5.03	5.22	6.15
Standardabweichung in ha	8.06	8.24	34.69
Median in ha	2.48	2.56	1.69

Die Unterschiede zwischen alter und neuer Feldblockkarte sind nicht sehr gross (siehe Abbildung 1: Anzahl, Durchschnitts- und Medianwerte im Diagramm), jedoch ist nun auch das Dauergrünland im Sömmerungsgebiet erfasst worden. Die Feldblöcke in Gisler et al. (2010) wurden nur bis und mit Bergzone II erzeugt. Die Werte der beiden Feldblockkarten sind ziemlich ähnlich, wobei in der neuen Karte alle Werte in der Tal- bis Bergzone I immer etwas höher sind. Einzig in der Bergzone II ist die Anzahl an Feldblöcken von Gisler et al. (2010) höher. Im Sömmerungsgebiet gibt es eine hohe Anzahl an Feldblöcken, vergleichbar mit der Talzone. Der Medianwert im Sömmerungsgebiet zeigt, dass vereinzelte dieser Feldblöcke eine grosse Ausdehnung aufweisen, was auf die Produktionsmethode zurückzuführen ist und grosse Alpweiden einschliesst (Abbildung 1).

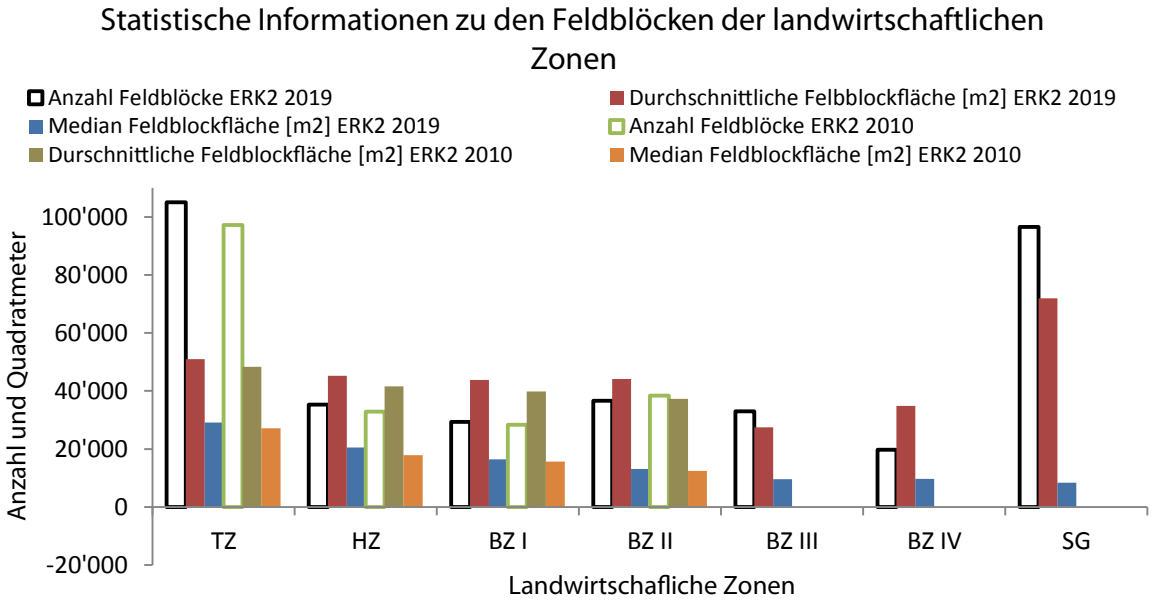


Abbildung 1: Statische Werte der neuen und alten Feldblockkarten im Vergleich über die verschiedenen Landwirtschaftlichen Zonen (TZ = Talzone, HZ = Hügelzone, BZ = Bergzone, SG = Sömmerungsgebiet).

2.3 Vorgehen

Die Berechnung mit dem neuen Erosionsmodell bzw. die Ermittlung der einzelnen Faktoren erfolgte i.d.R. auf drei räumlichen Ebenen. Zuerst wurden die Berechnungen auf Feldblock- bzw. Parzellenebene in der Region Frienisberg (265 ha) durchgeführt, vor allem für die Berechnung der L- und S-Faktoren. Für dieses Gebiet ist zum einen die Datenlage am besten und es existiert viel Felderfahrung und Expertenwissen, zum anderen erlauben kurze Rechenzeiten für solch ein kleines Gebiet zahlreiche Variantenberechnungen. Dieses Gebiet wurde auch für Plausibilitätstest und die Kalibrierung und Validierung (s. Kap. 4) des Modelles verwendet.

Im zweiten Schritt wurden ausgewählte Berechnungsvarianten auf dem Kartenblatt 1146 Lyss der Landeskarte der Schweiz 1:25‘000 (LK 1146 Lyss) durchgeführt. Abhängig von der Datengrundlage unterscheidet sich die Grösse der landwirtschaftlich genutzten Fläche im Kartenblatt 1146. Mit dem neuen topographischen Landschaftsmodell TLM3D (2015) ergibt sich eine Fläche von 11‘597 ha gegenüber der Feldblockkarte der ERK2 2010 mit einer Fläche von 11‘854ha. Die LK 1146 Lyss ist typisch für die Ackerbauregion des Schweizerischen Mittellandes, und alle Berechnungen sind mit vertretbarem Rechenaufwand durchführbar. Auf Grundlage der Ergebnisse dieses Kartenblattes wurde die definitive Entscheidung für die zu verwendende Variante getroffen.

Im letzten Schritt wurden die Berechnungen für die ganze Schweiz bzw. die in der Feldblockkarte abgebildeten Flächen durchgeführt. Aufgrund der hohen Auflösung des Höhenmodells und damit verbundenen Rechenaufwand mussten die Berechnungen auf 1:100‘000 Kartenblätter durchgeführt werden. Entsprechend mussten 25 Kartenblätter gerechnet und wieder zusammengesetzt werden.

Um den Einfluss der Auflösung des verwendeten digitalen Geländemodells auf die Resultate der Erosionsmodellierung abzuschätzen, wurden die Berechnungen der Topographiefaktoren (L- und S-Faktor) mit dem Höhenmodell SwissALTI3D im 2x2m-Raster (Ausgabe 2015) und dem DHM25 im 25x25m Raster durchgeführt und verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind nicht Bestandteil dieses Berichtes. Siehe dazu Bircher et al. (2019a).

Zur Überprüfung der neuen ERK2 (2019) wurde neben der Berechnung des potentiellen Erosionsrisikos (Faktor R, K und LS) auch das aktuelle Erosionsrisiko (Faktoren C und P zusätzlich) für die Region Frienisberg berechnet. Die Resultate dazu und die daraus abgeleiteten Korrekturfaktoren des Erosionsmodells finden sich im zweiten Teil dieses Berichtes in den Kapiteln 4 und 5. Details dazu siehe auch Bircher et al. (2019b).

3. Resultate unkorrigiertes Erosionsmodell

3.1 Topographiefaktoren (LS) [-]

Zunächst wurde eine Korrektur des digitalen Geländemodells SwissALTI3D durchgeführt, um kleine abflusslose Senken und Artefakte zu eliminieren und so die hydrologische Konnektivität zu gewährleisten. Verschiedene Füllhöhen wurden mittels Arc Hydro Tools in ArcGis v.10.2.2 getestet, schliesslich wurde eine Füllhöhe von 0,5m verwendet. Dadurch werden kleine Senken hydrologisch verbunden, grosse abflusslose Senken und Talebenen bleiben aber erhalten (Details siehe Bircher et al. 2019a).

Der Topographiefaktor (LS) zusammengesetzt aus Fliessweg L (Länge) und der Hangneigung S (englisch slope) wurde in der alten ERK2 in ArcView mit AV Erosion 1.1 (Schäuble 2005) berechnet. Dieses Plugin ist in der neuen ArcGis-Umgebung nicht mehr ausführbar, folglich musste eine Alternative gefunden werden. Die Auswahl von GIS-Systemen ist heute gross (Arc-Gis, SagaGis, GrassGis etc.). Unter den quelloffenen Programmen wurden fünf verschiedene Multiple Flow Algorithmen (MFA) ausgewählt und mit unterschiedlichen Einstellungen (Konvergenzwerten) verglichen (Tabelle 3, Abbildung 3 und Abbildung 4) (Details hierzu siehe Bircher et al. 2019a und b). Multiple Flow Algorithmen erlauben die Fliesswege-Modellierung auf komplexem Terrain. Anders als bei Single Flow Algorithmen (Abbildung 2a) berücksichtigen Multiple Flow Algorithmen nicht nur die tiefste Rasterzelle von acht Nachbarzellen, sondern geben das virtuelle Wasser in unterschiedlichen Portionen an alle tieferliegenden Zellen ab, dargestellt mit unterschiedlichen Grauwerten (Abbildung 2b,c,d).

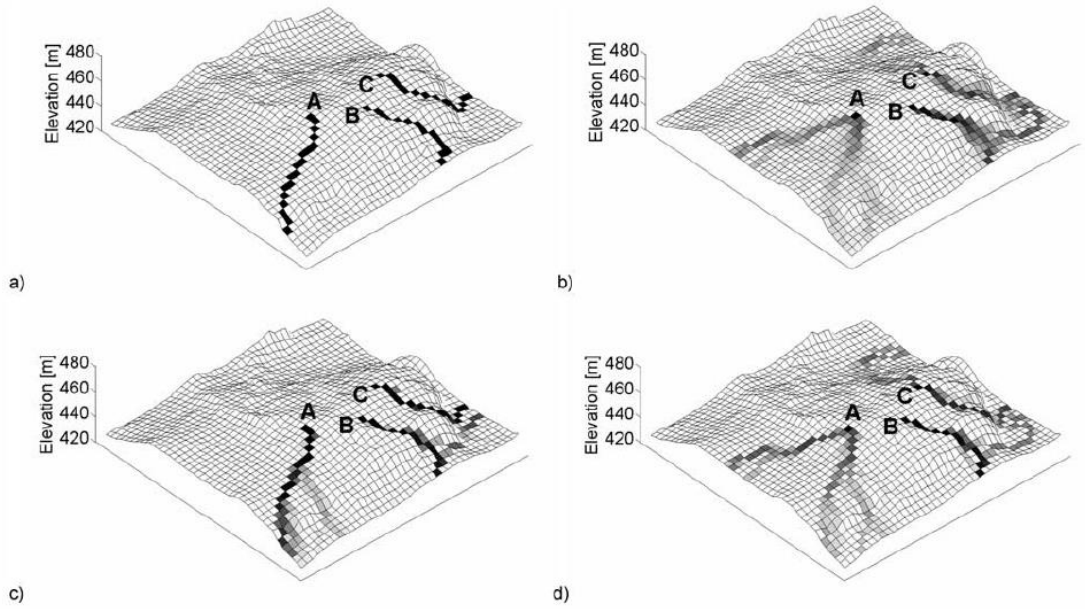


Abbildung 2: Verhalten ausgewählter Algorithmen der Fliesswegberechnungen im Terrain (a=Single Flow Algorithmus, b= Multiple Flow Algorithmus MFD, c = DINF, d = MTFD) aus Seibert & McGlynn (2007).

Tabelle 3: Die im Projekt verwendeten fünf Multiple Flow Algorithmen (MFA) zur Fliesswegberechnung mit Abkürzungen, Referenzen und dazugehörendem GIS-Programm (MUSLE 87 = ERK2, Gisler et al. (2010)).

No.	Approach	Abr.	Program/ Tool	Reference
a)	Deterministic Infinity	DINF	Saga-Gis	Tarboton (1997)
b)	Multiple Flow Direction	MFD	Saga-Gis	Freeman (1991)
c)	Multiple Triangular Flow Direction	MTFD	Saga-Gis	Seibert & McGlynn (2007)
d)	Watershed	WAT	GrassGis	Quinn et al. (1991)
e)	MUSLE 87	-	AvErosion in Arc View	Hensel (1991)

Der Entscheid für den optimalen Fliesswegalgorithmus zur Berechnung des L-Faktors (Tabelle 3, Abbildung 3) wurde auf Basis dreier statistischer Analysen und Expertengesprächen gefällt.

1. Es wurden die Abträge aller 203 Parzellen der Region Frienisberg anhand der kartierten Erosionsereignisse 1997-2007 den verschiedenen Modellergebnissen gegenübergestellt (Abbildung 4) (siehe Kap 4.1).
2. Es wurden die verschiedenen Modellergebnisse mit den aufsummierten Abträgen der fünf Gebiete (Frienisberg, Schwanden, Seedorf, Suberg und Lobsigen) verglichen (siehe Kap 4.1).

3. Die kartierten Bodenabträge > 4t ha^{-1} wurden in zwei Abtragsklassen (4-10 t ha^{-1}, >10 t ha^{-1}) eingeteilt, um pixelbasiert qualitativ und quantitativ die Modellgüte zu eruieren (siehe Kap 4.2).

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen sind nicht sehr gross, sowohl beim statistischen Vergleich (Abbildung 3, Tabelle 4) als auch beim visuellen Vergleich (Abbildung 4) der Berechnungen in der Region Frienisberg (Details siehe Bircher et al. 2019a, b). Die detaillierte Kalibrierung und Validierung des Modells mit den 10-jährigen Feldabschätzungen (1997-2007) von Prasuhn (2010; 2011; 2012) befinden sich im Kapitel 4 und 5. **Ausgewählt für die Berechnung der neuen ERK2 (2019) wurde der Algorithmus MTFD von Seibert & Glynn (2007) mit der Konvergenzeinstellung 1.1.** Abbildung 5 zeigt den angewendeten L-Faktor für die Schweiz.

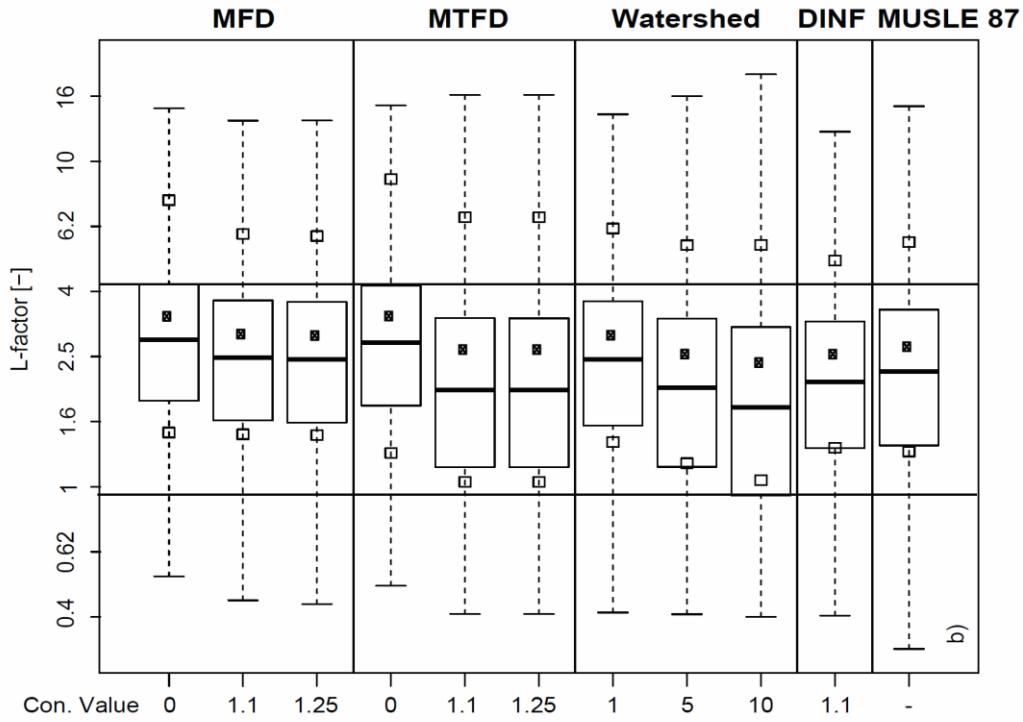


Abbildung 3: Berechnete Fliessweg L-Faktoren [-] für die verglichenen Algorithmen im Teilgebiet Frienisberg; gefüllte Quadrate= Mittelwert; helle Quadrate= Mittelwert ± Standard Abweichung; Con. Value= Konvergenzwert; Abkürzungen der Modelle siehe Tab. 3 (Quelle: Bircher et al. (2019a)).

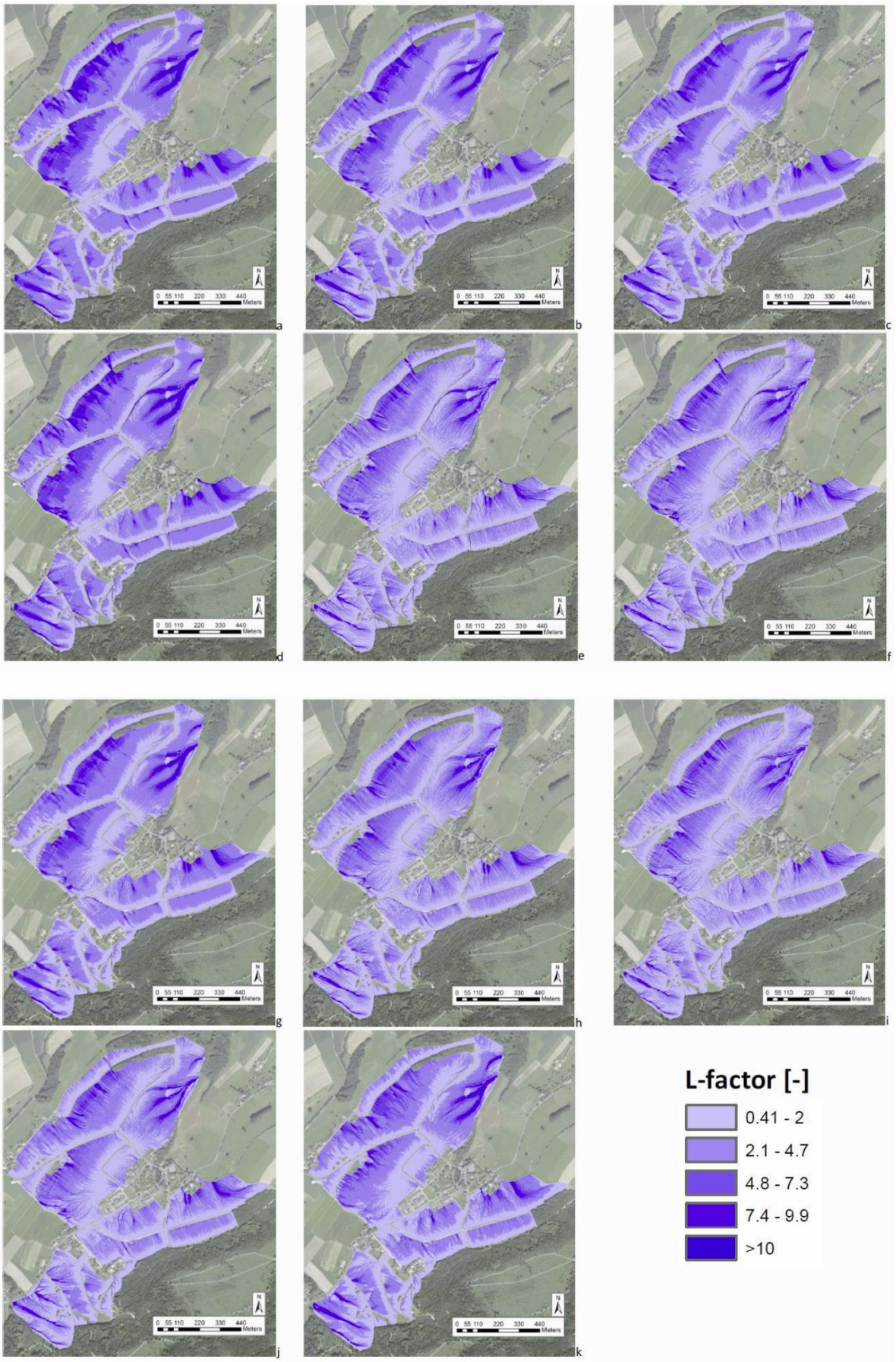


Abbildung 4: Fliessweg L-Faktor-Berechnungen mit unterschiedlichen Multiple Flow Algorithmen und steigenden Konvergenzwerten von links nach rechts im Teilgebiet Frienisberg; Reihenfolge gleich wie bei Abbildung 3; a-b = MFD, d-f = MTFD, g-i = WAT, j= DINF, k= MUSLE87; Abkürzungen der Modelle siehe Tab. 3, (Quelle: Bircher et al. 2019 a).

Die Unterschiede des L-Faktors aufgrund der unterschiedlichen Feldblockkarten (ERK2 2010 vs 2019) sind ebenfalls sehr gering. Trotz geringer Unterschiede bei der Anzahl an Feldblöcken (11 % Unterschied) und deren summierter Flächen (2 % Unterschied) ergeben sich für den Mittelwert des L-Faktors kaum Unterschiede; die Streuung ist bei der neuen Berechnung aber grösser (Tabelle 4).

Tabelle 4: Ergebnisse der Fliessweg L-Faktor-Berechnungen nach Gisler et al. (2010) und ERK2 (2019) für den Ausschnitt LK 1146 Lyss.

	Mit Feldblockkarte von 2010		Mit neuer Feldblockkarte von 2019
L-Faktor [-]	ERK2 (Gisler et al. (2010)	ERK2 (2019)	ERK2 (2019)
Anzahl Feldblöcke	2'305	2'305	2'587
Fläche [ha]	11'854	11'854	11'597
Minimum	0.16	0.4	0.39
Maximum	72.5	103.0	97.8
Mittelwert	1.38	1.39	1.39
Standardabweichung	1.14	1.28	1.28

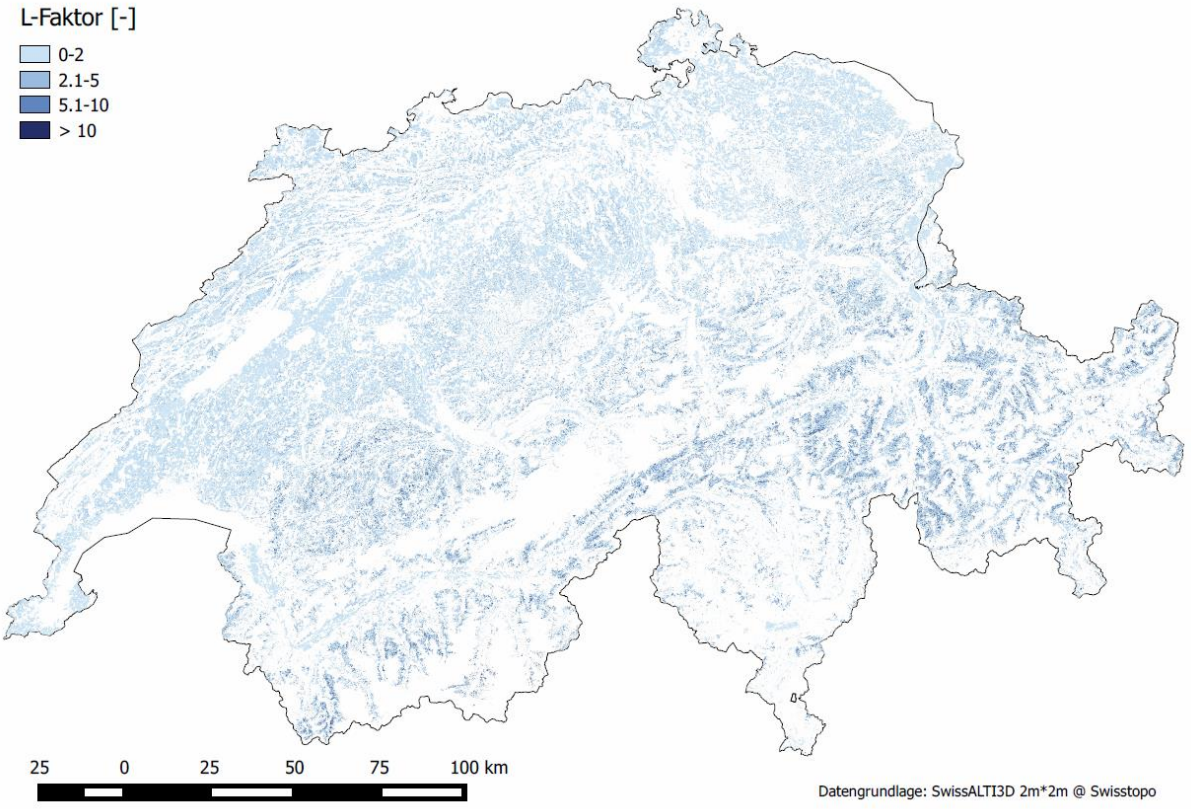


Abbildung 5: Fliessweg L-Faktor-Karte [-] der LN der Schweiz und dem Fürstentum Liechtenstein, berechnet mit MTFD 1.1 und 0.5 m gefülltem DEM (inklusive Dauergrünlandflächen mit Sömmerungsgebiet) (grössere Karte siehe Anhang).

Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt der L-Faktor Karte im Kanton Luzern. Der L-Faktor bildet das hydrologische Einzugsgebiet basierend auf dem 2m*2m Höhenmodell ab und zeigt wo sich Fliesswege akkumulieren und konzentrieren. Dadurch werden die Fliesswege für Oberflächenabfluss und lineare Erosion sowie mögliche Übertrittstellen (Off-site Schäden) gut erkennbar (dunkelblau in Abbildung 6). In der Praxis hat sich gezeigt, dass die L-Faktorkarte neben der potentiellen Erosionsrisikokarte hilfreich ist. Entsprechend wird auf dem Geoportal in Zukunft auch diese Karte online zur Verfügung zu stehen.

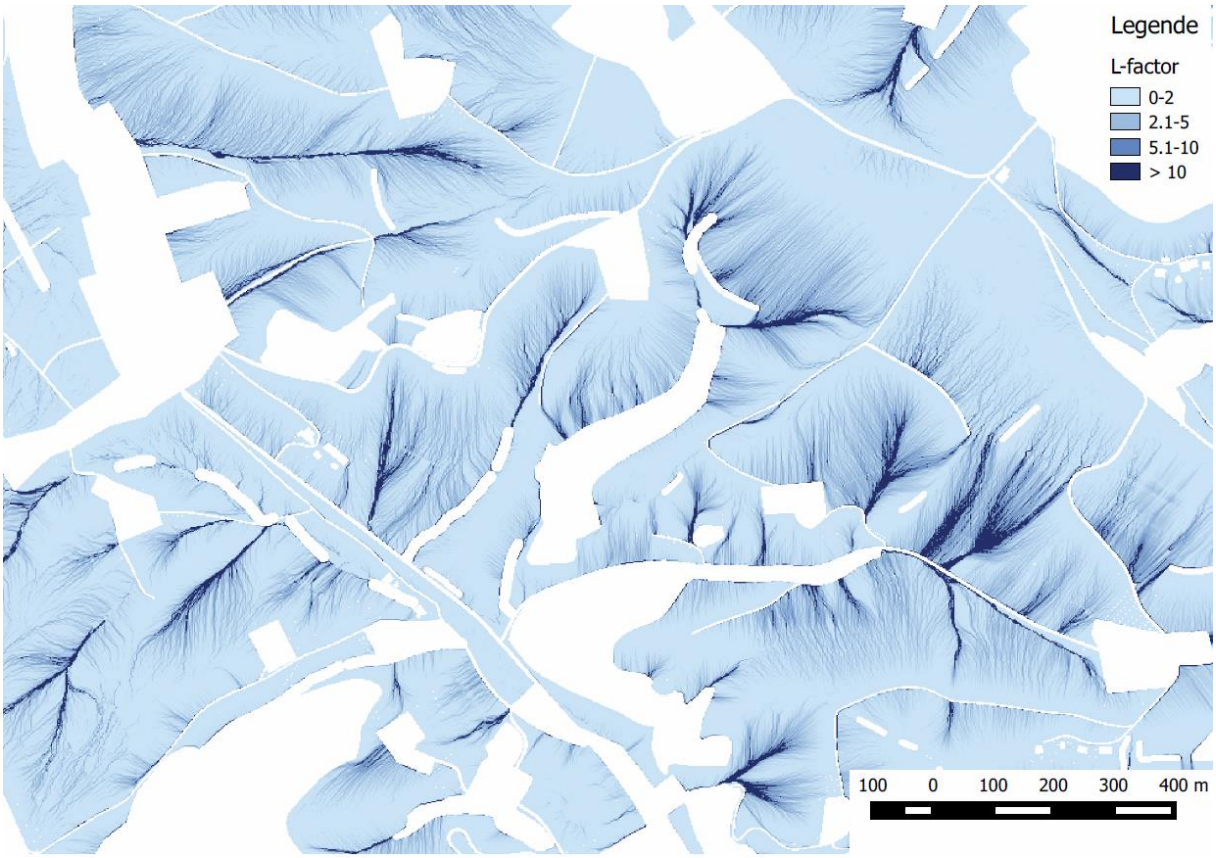


Abbildung 6: Ausschnitt der Fliessweg L-Faktor-Karte [-] der LN der Schweiz im Kanton Luzern, berechnet mit MTFD 1.1 und 0.5 m gefülltem DEM.

Der Hangneigung S-Faktor (Abbildung 7) wurde für die LN der gesamten Schweiz (inklusive Dauergrünland) mit dem gleichen Ansatz wie bei Gisler et al. (2010) berechnet und weist entsprechend keine grossen Unterschiede zur bisherigen ERK2 auf (Tabelle 5). Die S-Faktor-Berechnung basiert auf den Gleichungen von McCool et al. (1987), wobei die Neigung nach Zevenbergen & Thorne (1987) berechnet wurde. Die Dauergrünlandflächen wurden für die Berechnung des S- und L-Faktors mitberücksichtigt, da die Fliesswege für Oberflächenabfluss auch über Dauergrünlandflächen stattfinden. Die Dauergrünlandflächen werden später noch extrahiert (siehe Kapitel 3.5 Dauergrünland-Ackerland-Unterscheidung). Die Unterschiede des S-Faktors beim Mittelwert aufgrund der unterschiedlichen Feldblockkarten (ERK2 2010 vs 2019) sind mit +4 % ebenfalls gering (Tabelle 5).

Tabelle 5: Ergebnisse der Hangneigung S-Faktor-Berechnungen nach Gisler et al. (2010) und ERK2 (2019) für den Ausschnitt LK 1146 Lyss.

	Mit Feldblockkarte von 2010		Mit neuer Feldblockkarte von 2019
S-Faktor [-]	ERK2 (Gisler et al. (2010)	ERK2 (2019)	ERK2 (2019)
Anzahl Feldblöcke	2‘305	2‘305	2‘587
Fläche [ha]	11‘854	11‘854	11‘597
Minimum	0.03	0.03	0.03
Maximum	14.86	16.10	15.6
Mittelwert	0.87	0.93	0.91
Standardabweichung	0.99	1.04	0.99

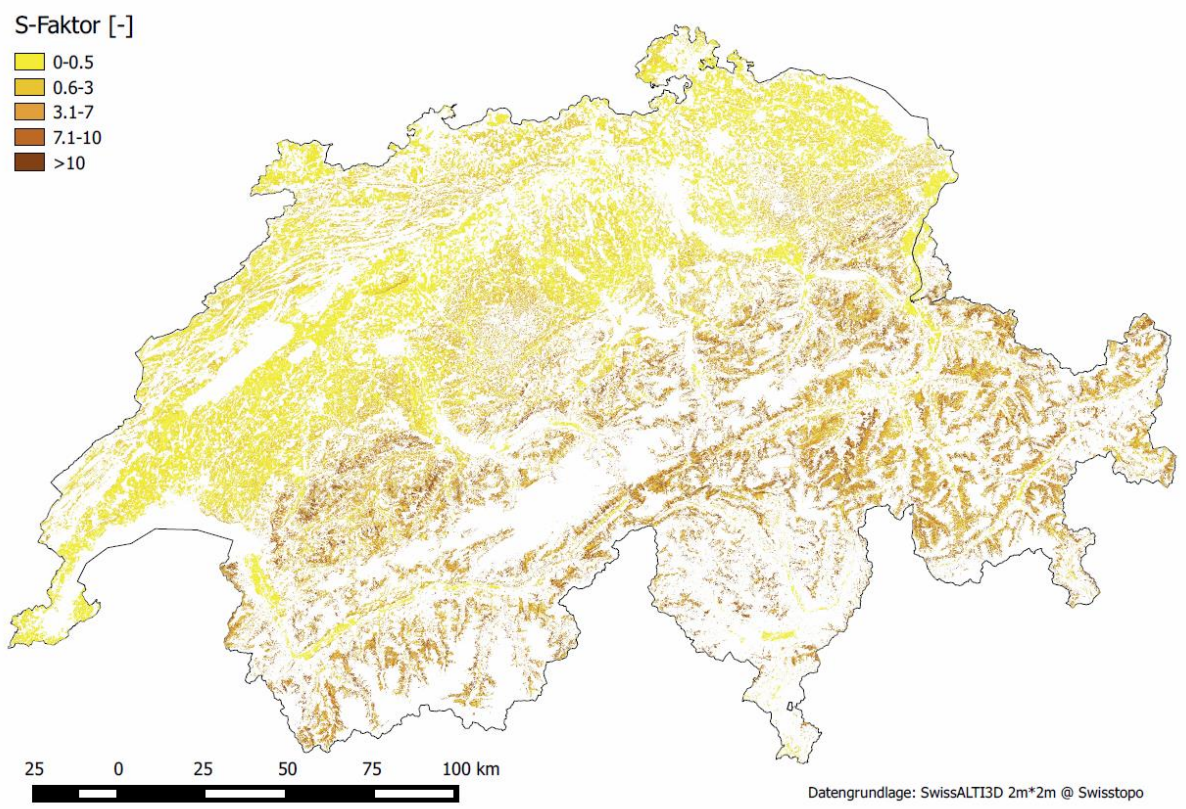


Abbildung 7: Hangneigung S-Faktor-Karte [-] der LN der Schweiz und dem Fürstentum Liechtenstein, inklusive Dauergrünlandflächen mit Sömmerungsgebiet (grössere Karte siehe Anhang).

3.2 Erodibilitätsfaktor (K) [t h N^{-1} ha^{-1}]

Der Erodibilitätsfaktor (K) wurde aus Bodenkarten unterschiedlicher Massstäbe berechnet. Die Massstäbe reichen von 1:1‘000 bis 1:200‘000, wobei Letzterer die gesamtschweizerische Bodeneignungskarte (BEK200) darstellt, die bereits seit 1980 existiert. Wo neue Daten vorhanden waren, wurden kantonale Bodenkarten für die Berechnung hinzugezogen. In den Kantonen Bern, Freiburg, Solothurn, Graubünden, Wallis und Luzern sind seit 2010 neue Daten hinzugekommen. Insgesamt sind mit den erwähnten Kantonen detaillierte Bodendaten mit einer Fläche von 59‘935 ha hinzugekommen. Die Anteile am Feldblockplan 2010 und 2019 haben sich gesamtschweizerisch etwas verändert Die Anteile der Karten 1:5‘000 und 1:25‘000 haben sich um 1.4 % bzw. um 2.1 % erhöht (Tabelle 6, Abbildung 8). Die unterschiedliche Gesamtfläche ist darauf zurückzuführen, dass mit neuen Grundlagendaten gearbeitet wurde (TLM3D 2015; Swisstopo).

Tabelle 6: Anteile Bodendaten verschiedener Qualität für den alten (Gisler et al.2010) und neuen Erodibilitätsfaktor (K) (2019).

Massstab	ERK2 (Gisler et al. 2010)	ERK2 (2019)
Gesamtfläche [km^2]	9’058	9’931
Bis 1:5‘000 [%]	11.7	13.1
Bis 1:10‘000[%]	4.3	4.2
Bis 1:25'000 [%]	1.9	4.0
Bis 1:50'000 [%]	6.1	5.6
Bis 1:200‘000 [%]	75.9	73.0

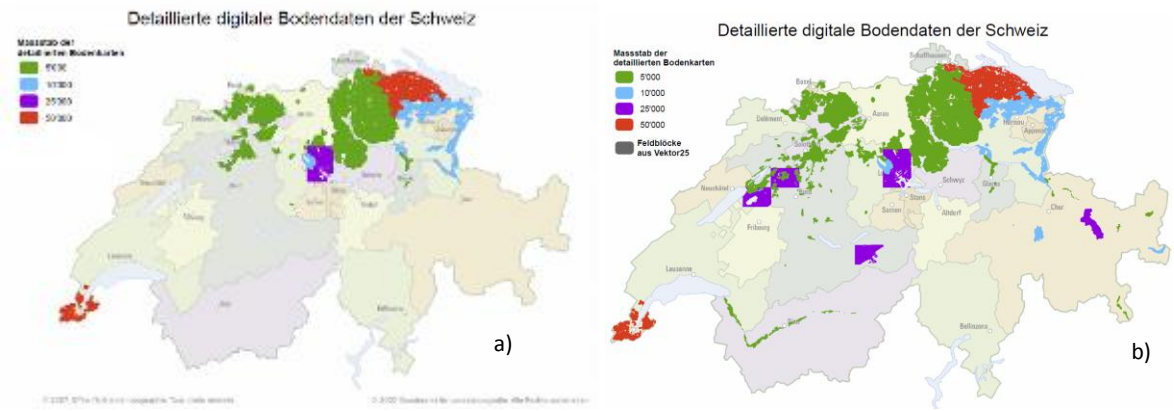


Abbildung 8: a) Datenlage Erodibilitätsfaktor (K) 2010 (Gisler et al.2010); b) Datenlage für Erodibilitätsfaktor (K) 2019.

Gesamtschweizerisch ergeben sich folgende Werte für den K-Faktor. Das Minimum liegt bei **0.02,** das Maximum bei **0.70** der Durchschnitt bei **0.22** und die Standardabweichung bei **0.088** [t h N^{-1} ha^{-1}], was nahezu identische Werte wie bei der ERK2 (Gisler et al. 2010) sind. Für das Kartenblatt LK 1146 Lyss ändert sich bezüglich verschiedener Massstäbe der Durchschnitt im K-Faktor (Tabelle 7). Die Spannweite ist beim Massstab 1:5‘000 am höchsten, was durch die bessere Datenlage und Varianz zu begründen ist. Die Interpolation der Daten ist auf ein kleineres Gebiet beschränkt, was sich in einer besseren Qualität der Daten widerspiegelt.

Tabelle 7: Deskriptive Statistik für den Erodibilitätsfaktor (K) für das Kartenblatt LK 1146 Lyss, basierend auf unterschiedlicher Datenlage; mit Feldblockkarte 2010 als Grundlage.

K-Faktor[t h N^{-1} ha^{-1}]	1:5‘000	1:25‘000	1:200‘000
Minimum	0.03	0.05	0.15
Maximum	0.52	0.50	0.45
Range	0.50	0.45	0.30
Mittelwert	0.24	0.26	0.35
Standardabweichung	0.058	0.028	0.036

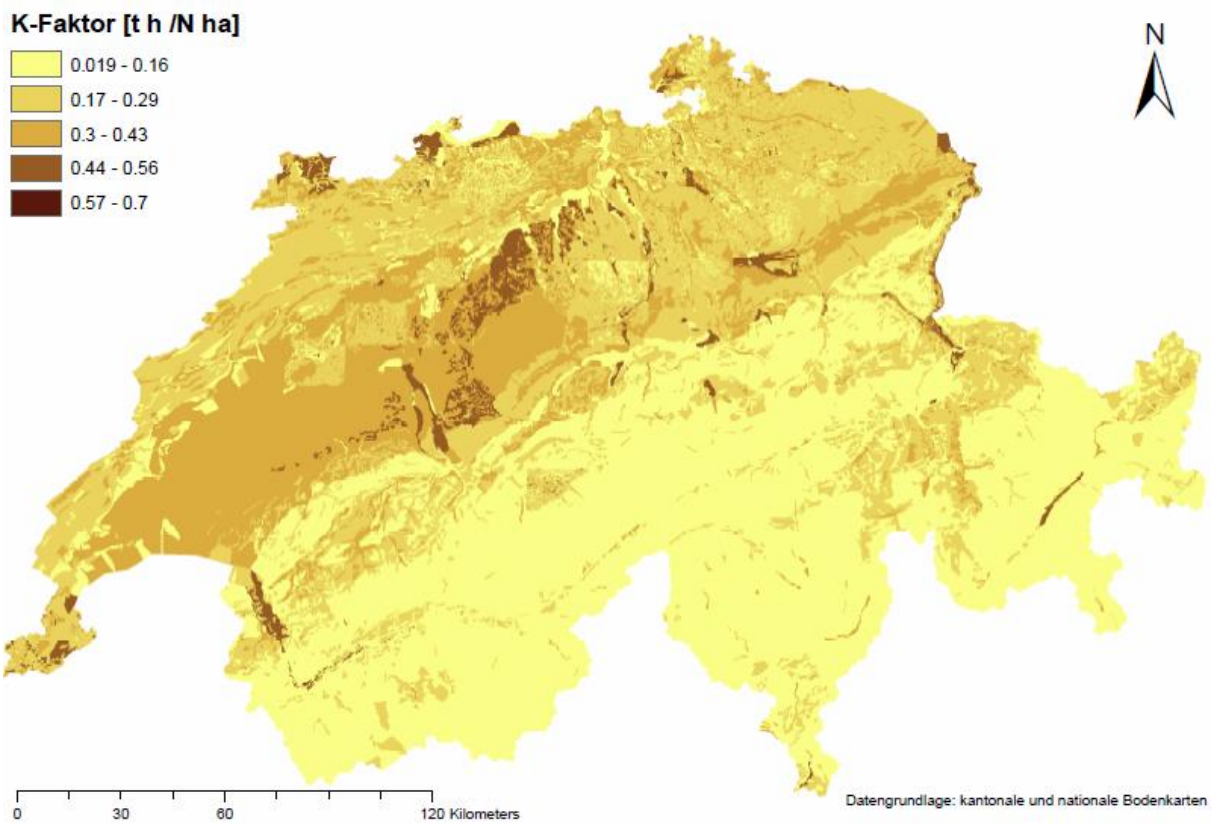


Abbildung 9: Erodibilität K-Faktor-Karte [t h N^{-1} ha^{-1}] der gesamten Schweiz (grössere Karte siehe Anhang).

Die Datengrundlage für die LK 1146 Lyss ist im Vergleich zur restlichen Schweiz gut. Immerhin annähernd 20 % der Fläche sind im Massstab 1:5‘000 oder besser vorhanden. Und nur 9.6 % der Fläche haben eine Datenlage niedriger Qualität mit 1:200‘000 (Tabelle 8). Der Dauergrünlandanteil in der LK 1146 Lyss erreicht 25 %. Der Flächenüberschuss von 12.4 % erklärt sich damit, dass die Massstäbe 1:1‘000 bis 1:5‘000 den Massstab 1:25‘000 teilweise überlagern und deshalb eine Doppelzählung vorkommt.

Tabelle 8: Anteil der verschiedenen Massstäbe von Bodenkarten am Kartenblatt LK 1146 Lyss in Hektar und Prozent der Gesamtfläche ohne Berücksichtigung der Feldblockkarte.

MASSSTAB	Fläche [ha]	Prozent [%]
1:1'000	35.7	0.2
1:2'000	7.1	0.03
1:5'000	4‘027.7	19.2
1:25'000	17‘549.2	83.5
1:200'000	2‘024.3	9.6
Summe	23‘643.9	112.4
Gesamtgebiet von LK 1146	21‘028.8	

3.3 Erosivitätsfaktor (R) [N h^{-1}]

Bei der ERK2 (Gisler et al. 2010) wurde die Hektarrasterkarte von Friedli (2006) verwendet, welche auf Daten aus dem hydrologischen Atlas der Schweiz basierte und einen Durchschnittswert des R-Faktors von 92.1 N h^{-1} hatte. Nogler (2012) berechnete für den R-Faktor einen Mittelwert von 153 N h^{-1} und Meusburger (2012) 133 N h^{-1}. Der neu berechnete und in der ERK2 (2019) verwendete Mit-

telwert des R-Faktors liegt bei 114.6 N h^{-1} (Schmidt et al. 2016) (Tabelle 9). Der Niederschlagsfaktor wurde von (Schmidt et al. 2016) auf Grundlage verschiedener eidgenössischer und kantonaler Meteodaten (86 Stationen; Meteoschweiz & Kantone BE, LU, SG) mit Kovariaten (Schneehöhen, CombiPrecip, DEM u.a.) interpoliert. Die Karte zeigt hohe Werte in den nördlichen Voralpen und im Süden der Schweiz (Tessin), was auf die Niederschlagscharakteristik der Schweiz zurückzuführen ist (Sommergewitter im Süden; Herbstgewitter in den nördlichen Voralpen). Der R-Faktor (Abbildung 10) wurde für die ERK2 (2019) mit einer bikubischen Methode neu interpoliert, da die Ausdehnung und Auflösung nicht mit den Faktoren LS und K übereinstimmten.

Tabelle 9: Statistik des Erosivitätsfaktors (R) der Schweiz (Schmidt et al. 2016).

R-Faktor [N h^{-1} a^{-1}]	Gesamte Schweiz
Minimum	12.1
Maximum	1042.4
Mittelwert	114.6
Standardabweichung	76.3

Im Kartenblatt LK 1146 Lyss erreicht der R-Faktor einen 13 % höheren Durchschnittswert als in der ERK2, was sich auch auf das potentielle Erosionsrisiko auswirkt (Tabelle 10).

Tabelle 10: Statistik des Erosivitätsfaktors (R) der Schweiz (Schmidt et al. 2016) im Kartenblatt LK 1146; mit Feldblockkarte 2010 als Grundlage.

R-Faktor [N h^{-1} a^{-1}]	ERK2, Gisler et al. (2010)	ERK2 (2019) Schmidt et al. (2016)
Minimum	79.7	88.7
Maximum	95.4	115.5
Mittelwert	87.5	100.8
Standardabweichung	2.46	3.6

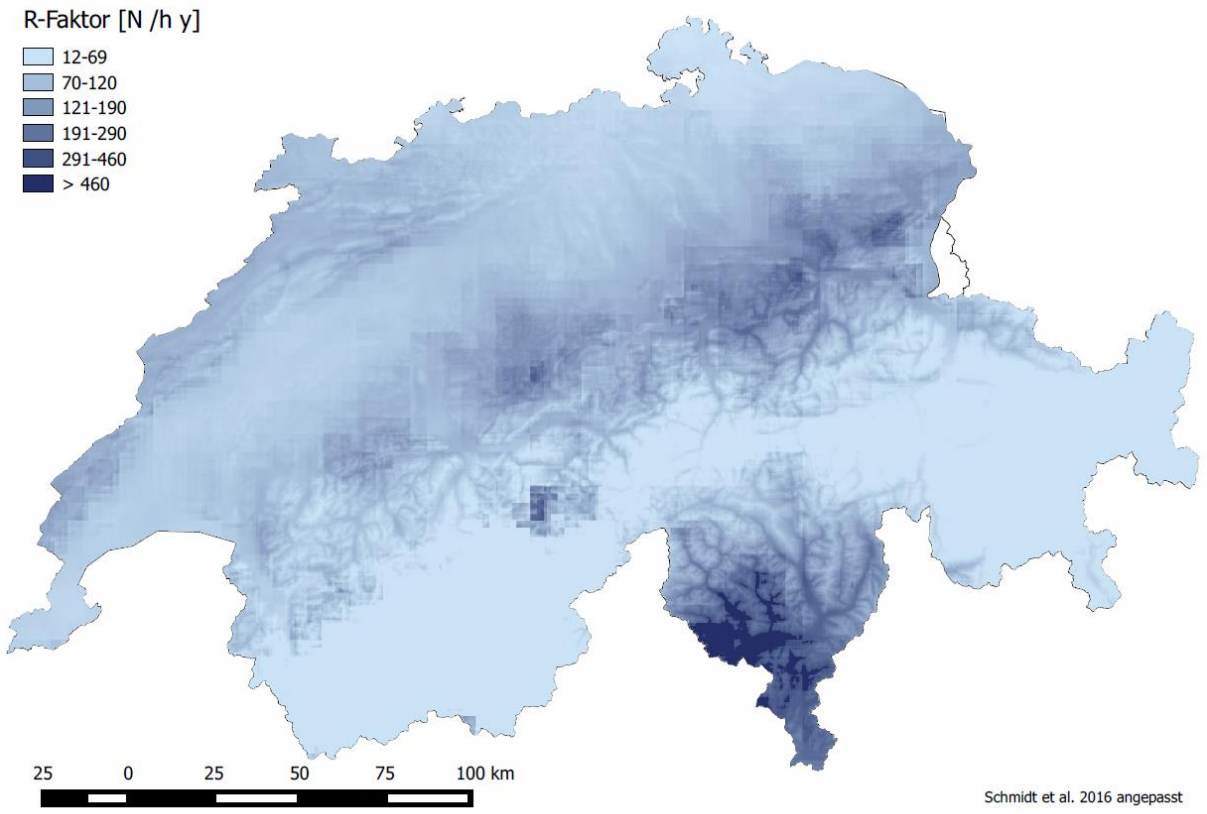


Abbildung 10: Erosivität R-Faktor-Karte der gesamten Schweiz [N h^{-1} a^{-1}] (Schmidt et al. 2016) (grössere Karte siehe Anhang).

3.4 Potentielles Erosionsrisiko, unkorrigiert (LS*K*R) [t/ha a]

Der statistische Vergleich des potentiellen Erosionsrisikos im Kartenblatt LK 1146 Lyss zeigt keine grossen Unterschiede beim Mittelwert zwischen der alten Erosionsrisikokarte (ERK2; Gisler et al. 2010) und der neuen ERK2 (2019) (Tabelle 11). Dies war aufgrund der Ähnlichkeit der Ergebnisse der verschiedenen Algorithmen zu erwarten (Abbildung 4). Eine leichte Abnahme von 5 % ergibt sich für den Mittelwert des Bodenabtrages. Der Maximalwert und die Standardabweichung unterscheiden sich jedoch erheblich (Tabelle 11), da der neue Fliesswegalgorithmus die Abflüsse stärker konzentriert im Vergleich zur ERK2. Die Unterschiede des potentiellen Erosionsrisikos aufgrund der unterschiedlichen Feldblockkarten (ERK2 2010 vs 2019) wirken sich mit einem 7 % niedrigeren Durchschnittswert für das Kartenblatt LK 1146 Lyss nicht erheblich aus (Tabelle 11).

Tabelle 11: Deskriptive Statistik potentielles Erosionsrisiko (unkorrigiert) für Kartenblatt LK 1146 Lyss.

	Mit Feldblockkarte von 2010		Mit neuer Feldblockkarte von 2019
Pot. Erosionsrisiko	ERK2, Gisler et al. (2010)	ERK2 (2019)	ERK2 (2019)
Anzahl Feldblöcke	2‘305	2‘305	2‘587
Fläche [ha]	11‘854	11‘854	11‘597
Minimum [t ha^{-1} a^{-1}]	0.15	0.16	0.16
Maximum [t ha^{-1} a^{-1}]	4‘123	23‘177	24‘357
Mittelwert [t ha^{-1} a^{-1}]	45.4	43.0	42.4
Standardabweichung [t ha^{-1} a^{-1}]	80.8	99.0	96.3

Die Berechnung des potentiellen Erosionsrisikos wurde für die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche der Schweiz mit der vorgestellten Methode durchgeführt (Abbildung 11). Diese Karte bildet auch die Grundlage für die Neuberechnung der Gewässeranschlusskarte (GAK2) (Joss und Prasuhn 2019). In den Bergzonen und im Sömmerungsgebiet sind diese Resultate mit Unsicherheiten behaftet, da die verwendete Methode im alpinen Gebiet mit sehr grossen Hangneigungen und Hanglängen nicht validiert ist. Für diese Gebiete ist der Ansatz von Schmidt et al. (in prep.) geeigneter und wird aucht für das Dauergrünland verwendet. Es ergeben sich somit zwei Erosionsrisikokarten; eine für das Ackerland (Abbildung 12) und eine für das Dauergrünland (BAFU-Projekt).

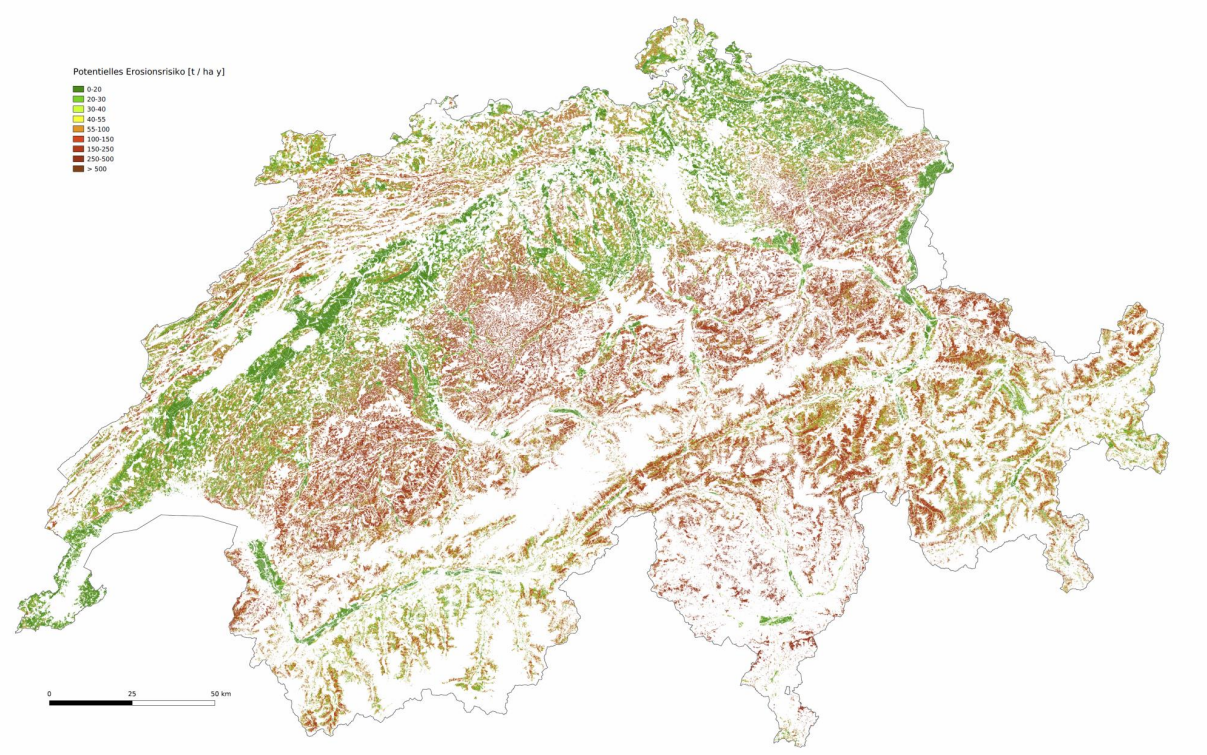


Abbildung 11: Karte des potentiellen Erosionsrisikos (unkorrigiert) der LN der Schweiz [t ha^{-1} a^{-1}] der neuen ERK2 (2019), inklusive Dauergrünlandflächen mit Sömmerungsgebiet; gleiche Klassen wie bei ERK2 2010 (grössere Karte siehe Anhang).

3.5 Unterscheidung von Ackerland und Dauergrünland

Die Unterscheidung von Acker- und Dauergrünland wurde mit parzellenscharfen, digitalen kantonalen Daten umgesetzt, wobei einige Kantone leider erst Ende 2019 oder 2020 diese Daten zur Verfügung stellen können. Komplette Daten haben bisher 19 von 26 Kantonen geliefert. Der Kanton Zürich hat Daten geliefert, welche aber noch nicht vollständig sind und deswegen unberücksichtigt blieben. Eine Zusammenstellung der Daten der Kantone liefert Tabelle 22 in Kapitel 5.2. Ebenfalls ersichtlich sind dort die Flächenangaben zur Landwirtschaftlichen Nutzfläche und zum Ackerland nach der Arealstatistik 2016 und aus der Betriebsstrukturerhebung (2015). Um das Ackerland (inklusive Kunstwiese) zu erhalten, wurden drei verschiedene Methoden angewendet. Diese unterschiedlichen Vorgehensweisen waren notwendig, da je nach Kanton die Datenlage unterschiedlich war. Wir wollten damit die genaueste Übereinstimmung des jeweiligen Ackerlandlayers erreichen. Auf verschiedene methodische Probleme und Fehler bei der Erstellung der Ackerlandkarte mit den verschiedenen Methoden wird in Kapitel 5.3 mit Fallbeispielen noch detaillierter eingegangen.

Methode 1 (Kantone AG, AI, AR, BL, GL, GR, NE, NW, SG, SH, SZ, TG, UR, VD, VS, ZG): Im kantonalen Parzellen-Datensatz existierte die Kategorie „Ackerfläche (inklusive Kunstwiesen)“. Diese Flächen wurden mit der Feldblockkarte (LN) verschnitten.

Methode 2 (Kantone BE, FR, SO): Im kantonalen Parzellen-Datensatz lag keine Kategorie „Ackerfläche“ vor. Deshalb wurden die vorliegenden Kategorien „Dauergrünlandflächen, Dauerkulturen, Kulturen in ganzjährig geschütztem Anbau sowie andere, der Landwirtschaftsfläche zugeordnete Flächen wie Hecken, Gehölze, ökologische Ausgleichsflächen, Ruderalflächen, Hochstammfeldobstbäume“ aus den kantonalen Datensätzen von der Feldblockkarte (LN) entfernt, um das Ackerland zu erhalten.

Methode 3 (Kantone BS, GE, JU, LU, OW, TI, ZH): Für die sieben Kantone, welche keine kantonalen Parzellendaten zur Verfügung gestellt haben, wurde basierend auf Daten von Schmidt et al. (2018) zum Dauergrünland (Swissimage FCIR, FCover 300m und MODIS) das Dauergrünland mit der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) der Feldblockkarte verschnitten. Details zur Dauergrünlandkarte finden sich in Schmidt et al. (2018) (violett umrandet in Abbildung 12).

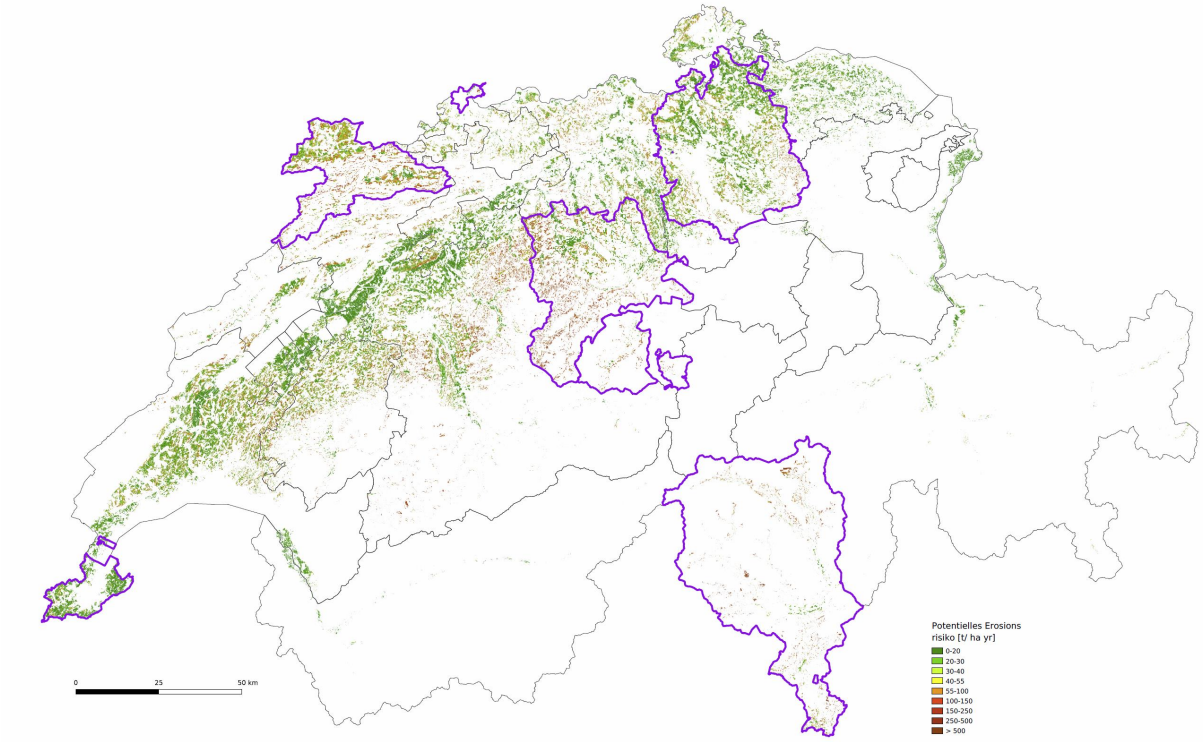


Abbildung 12: Potentielles Erosionsrisiko (unkorrigiert) für das Ackerland der Schweiz [t ha^{-1} a^{-1}] und verwendete kantonale Daten der Schweiz; violett umrandet; restliche 7 Kantone ohne parzellenscharfe Ackerlanddaten, stattdessen mit Satellitenbildern abgeschätzt.

Für den Kanton Bern wurde das Dauergrünland und das Sömmerungsgebiet (BLW 2016) beispielhaft mit Daten aus dem GELAN (LANDKULT 2016) bereits entfernt (Tabelle 12, Abbildung 13). Im Kanton Bern beträgt die berechnete Dauergrünlandfläche fast 65 % an der LN, entsprechend geht die berücksichtigte Fläche um fast 65 % zurück, wenn man nur das Ackerland betrachtet, da im Kanton Bern grosse Anteile in alpinen, voralpinen und Jura-Regionen liegen (Abbildung 13). Der mittlere potentielle Bodenabtrag (unkorrigiert) geht markant um 56 % zurück, da die Dauergrünlandflächen

häufig in Steillagen liegen und ein überdurchschnittliches potentielles Erosionsrisiko haben. Er hat mit 144 t ha^{-1} aber immer noch einen vergleichsweise hohen Wert. Der aufsummierte Bodenabtrag (unkorrigiert) geht wegen der geringeren Fläche und dem niedrigerem mittleren Bodenabtrag entsprechend mit 85 % noch stärker zurück (Tabelle 12).

Tabelle 12: Potentielles Erosionsrisiko (unkorrigiert) im Kanton Bern mit und ohne Dauergrünland und Sömmerungsgebiet: statistische Grundlagen basierend auf der Feldblockkarte 2019.

Kanton Bern	Feldblockkarte mit Dauergrünland	Feldblockkarte ohne Dauergrünland und Sömmerungsgebiet
Fläche [ha]	255‘123	89‘200
Mittelwert [t ha^{-1} a^{-1}]	324.9	144
Standardabweichung [t ha^{-1} a^{-1}]	810.4	369.8
Summe [t]	82‘889‘333	12‘812‘303

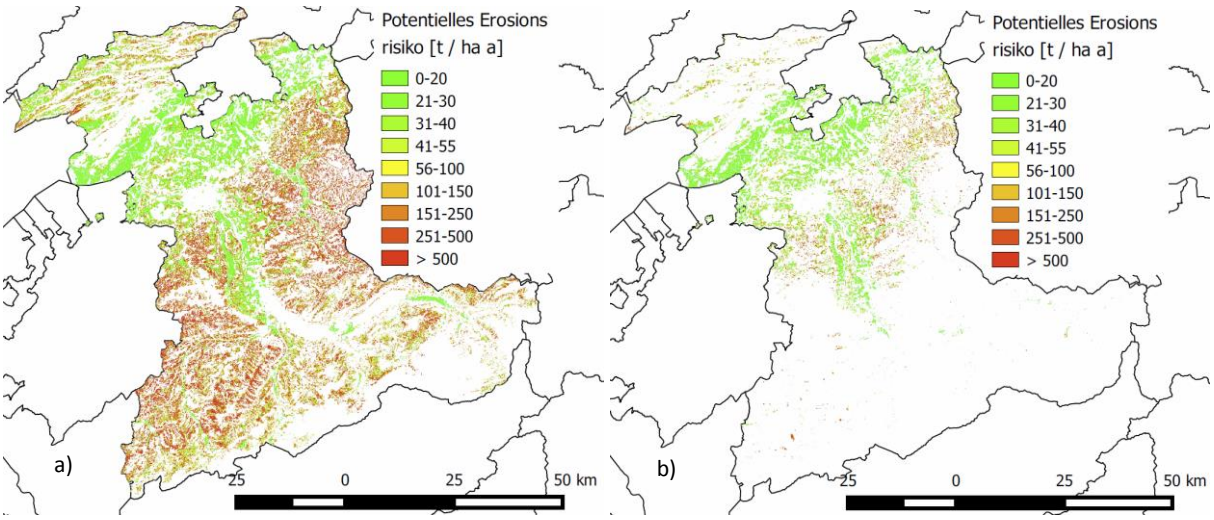


Abbildung 13: Potentielles Erosionsrisiko (unkorrigiert) a) mit Dauergrünland und Sömmerungsgebiet b) ohne Dauergrünland und Sömmerungsgebiet für den Kanton Bern.

Ähnliches lässt sich im Kartenblatt Lyss beobachten; allerdings nicht so ausgeprägt, da wir uns hier ausschliesslich im Mittelland befinden. Im ackerbaulich geprägten Kartenblatt LK 1146 Lyss beträgt der Dauergrünlandanteil nur rund 25 %. Der mittlere potentielle Bodenabtrag (unkorrigiert) geht um 23 % zurück, da die Dauergrünlandflächen auch hier häufig in steileren Lagen liegen und ein überdurchschnittliches potentielles Erosionsrisiko haben. Der aufsummierte Bodenabtrag (unkorrigiert) geht durch den Ausschluss des Dauergrünlandes um ca. 43 % zurück (Tabelle 13).

Tabelle 13: Potentielles Erosionsrisiko (unkorrigiert) der LK 1146 Lyss mit und ohne Dauergrünland und Sömmerungsgebiet: statistische Grundlagen basierend auf der Feldblockkarte 2019.

Blatt Lyss	Feldblockkarte mit Dauergrünland	Feldblockkarte ohne Dauergrünland und Sömmerungsgebiet
Fläche [ha]	11‘597	8‘645
Mittelwert [t ha^{-1} a^{-1}]	42.4	32.6
Standardabweichung [t ha^{-1} a^{-1}]	96.3	67.6
Summe [t]	491‘652	281‘459

Vergleicht man das berechnete potentielle Erosionsrisiko auf Ackerflächen des Blattes LK 1146 Lyss der alten ERK2 mit den Berechnungen der neuen ERK2 (2019), ergibt sich folgendes Bild: Die Fläche des Ackerlandes unterscheidet sich um ca. 270 ha bzw. 3 %, wenn die gleiche Maske für die Ackerflä-

che wie bei der ERK2 (2019) verwendet wurde (Tabelle 14). Dies ist auf die unterschiedlichen Datengrundlagen zurückzuführen (Vector 25 vs TLM3D). Ein Vergleich auf der Ebene Ackerfläche ist folglich nur eingeschränkt möglich. Ähnlich wie beim potentiellen Erosionsrisiko mit Dauergrünland (Tabelle 11) ist der mittlere Bodenabtrag (unkorrigiert) bei der Berechnung mit der ERK2 (2019) ebenfalls etwas geringer (Abnahme um 11 %). Trotz grösserer Ackerflächen bei der ERK2 (2019) ergibt sich wegen des geringeren mittleren Bodenabtrages ein um 8 % geringerer aufsummierte Gesamtabtrag (Tabelle 14). Die Ursache für diese Abnahme liegt in dem deutlich geringeren K-Faktor aufgrund neuer Bodeninformationen für die LK 1146 Lyss. Die Auswirkungen der Dauergrünlandentfernung sind zusätzlich im Gebiet Frienisberg dargestellt (Abbildung 14).

Tabelle 14: Statistische Grundlagen des Kartenblatts LK 1146 Lyss bezüglich potentiellem Erosionsrisiko (unkorrigiert) auf Ackerland; unterschiedliche Feldblockkarten als Grundlage.

KB 1146 Lyss	ERK2, Gisler et al. (2010)	ERK2 2019
Fläche [ha]	8‘371	8‘645
Mittelwert [t ha^{-1} a^{-1}]	36.7	32.6
Standardabweichung [t ha^{-1} a^{-1}]	61.3	67.6
Summe [t]	307‘455	281‘459

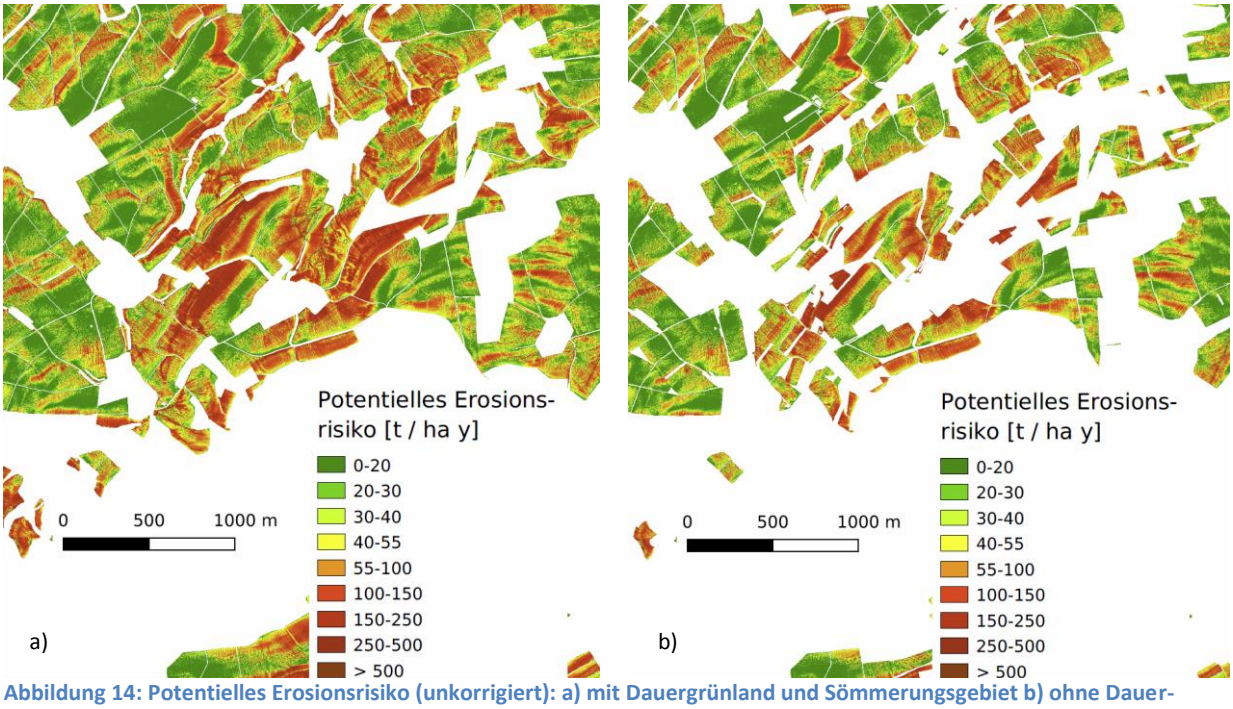


Abbildung 14: Potentielles Erosionsrisiko (unkorrigiert): a) mit Dauergrünland und Sömmerungsgebiet b) ohne Dauergrünland und Sömmerungsgebiet für das Gebiet um Frienisberg.

3.6 Zusammenfassende Beurteilung der neuen Grundlagen bzw. Faktoren

- **Feldblockkarte:** Die neue Feldblockkarte führt zu genaueren und aktuelleren Feldblöcken. Der Einfluss auf das berechnete Erosionsrisiko ist schweizweit gering. Im Einzelfall kann die veränderte Feldblockgrösse zu höherem oder niedrigerem Erosionsrisiko führen. Bezüglich Kartenblatt LK 1146 Lyss sinkt das potentielle Erosionsrisiko um rund 1 % aufgrund der unterschiedlichen Feldblockkarten (ERK 2010 vs 2019).

- **Fliessweg L-Faktor:** Ausgewählt für die Berechnung der neuen ERK2 (2019) wurde der Algorithmus MTFD von Seibert & Glynn (2007) mit der Konvergenzeinstellung 1.1. Der mit einer neuen Methode und neuen Datengrundlagen berechnete L-Faktor unterscheidet sich nicht relevant vom bisherigen L-Faktor. Auf der LK 1146 Lyss ist der neu berechnete L-Faktor im Mittel um knapp 1 % höher, d.h. das Erosionsrisiko für das Ackerland der Schweiz wird auch ca. 1 % höher eingestuft. Auf einzelnen Parzellen kann es aber zu grösseren Abweichungen kommen.
- **Hangneigung S-Faktor:** Die Berechnungsweise des S-Faktors hat sich nicht geändert. Das neue digitale Geländemodell und die neue Feldblockkarte können vereinzelt zu geringen Abweichungen führen. Auf der LK 1146 Lyss ist der neu berechnete S-Faktor sehr ähnlich. Der S-Faktor weist im LK 1146 Lyss einen 4 % höheren Mittelwert als in der alten ERK2 auf. Folglich erhöht sich das Erosionsrisiko im Vergleich zur alten ERK2 leicht.
- **Erodibilität K-Faktor:** Die Berechnungsweise des K-Faktors hat sich nicht geändert. In den Regionen, in denen neue Bodenkarten zur Verfügung standen (Teile der Kantone BE, FR, LU, SO, GR, VS), liegen räumlich und qualitativ bessere Daten vor, die zu positiven oder negativen Abweichungen beim Bodenabtrag führen können. Auf der LK 1146 Lyss ist der neu berechnete K-Faktor aufgrund detaillierter neuer Bodendaten im Mittel um rund 24 % geringer.
- **Erosivität R-Faktor**: Die neu erstellte R-Faktorkarte der Schweiz führt zu generell höheren R-Faktoren. Dadurch erhöht sich der berechnete mittlere Bodenabtrag um ca. 20 % im Mittel für die Schweiz. Für das Kartenblatt LK 1146 Lyss ist eine Erhöhung um 13 % gegenüber der alten ERK2 berechnet worden.
- **Potentielles Erosionsrisiko**: Das potentielle Erosionsrisiko (unkorrigiert) der LN ist auf der LK 1146 Lyss im Mittel um knapp 5 % niedriger als in der bisherigen ERK2. Das potentielle Erosionsrisiko (unkorrigiert) der Ackerflächen ist im Mittel um 11 % geringer. Der deutlich niedrigere K-Faktor (neue Bodenkarte) wird durch einen deutlich höheren R-Faktor und leicht erhöhten LS-Faktor nicht komplett kompensiert. Auf einzelnen Parzellen kann es zu grösseren Abweichungen kommen. Insgesamt ist in der Schweiz aber im Mittel mit einer Erhöhung des potentiellen Erosionsrisikos von ca. 17 % zu rechnen, da nur vereinzelt neue Bodenkarten vorliegen. Die im Mittel deutlich höheren R-Faktoren und leicht höheren LS-Faktoren der neuen Berechnungsweise führen zu diesem Anstieg.
- **Separierung Ackerland**: Durch das Ausschneiden des Dauergrünlandes sinkt das berechnete mittlere potentielle Erosionsrisiko. Im Kanton Bern mit sehr hohem Dauergrünlandanteil ist dies massiv. Legt man das Kartenblatt LK 1146 Lyss als Ackerbauregion zugrunde, beträgt der Dauergrünlandanteil 25 %, was ein Absinken des mittleren Bodenabtrages (unkorrigiert) von 23 % und des aufsummierten Bodenabtrages (unkorrigiert) um 43 % zur Folge hat.
- Für 19 Kantone mit knapp 75 % der Ackerfläche der Schweiz konnte die Ackerfläche parzellenscharf separiert werden. Das potentielle Erosionsrisiko (unkorrigiert) auf diesen Ackerflächen beträgt im Mittel 87 t ha^{-1} a^{-1}.

4. Kalibrierung und Validierung des Erosionsmodells

Die wissenschaftlichen Grundlagen des verwendeten Erosionsmodells und dessen Kalibrierung und Validierung werden in wissenschaftlichen Publikationen ausführlich beschrieben (Bircher et al. 2019a, b). Im Folgenden werden nur die wichtigsten Erkenntnisse zusammenfassend widergegeben.

4.1 Quantitative Statistik

Für die Kalibrierung und Validierung des Erosionsmodells standen die von Prasuhn (2010, 2011, 2012) kartierten Bodenabträge der Periode 1997 bis 2007 für 203 Parzellen der Region Frienisberg zur Verfügung. Sie stellen den langjährigen mittleren Bodenabtrag dar und können mit den verschiedenen Modellberechnungen der RUSLE verglichen werden, wenn entsprechende Bedeckungs- und Schutzfaktoren (C und P) im Modell eingesetzt werden. Parzellenscharfe C- und P-Faktoren für diese Periode standen von Prasuhn (unveröffentlicht) zur Verfügung. Die analogen Kartierungen wurden von Schelbert (2016) digitalisiert und in ein 2x2m-Raster transformiert, um auch eine räumliche Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

Im ersten Schritt der Kalibrierung und Validierung wurden die mittleren modellierten Abtragswerte mit den mittleren kartierten Abtragswerten aller 203 Parzellen verglichen. Die Modelle wurden zur besseren Vergleichbarkeit mit log10 transformiert und die kartierten Daten einer kubischen Transformation (Normalisierung) unterzogen. Den niedrigsten Standardfehler bezüglich der Abtragswerte aller 203 Parzellen weist der Algorithmus Watershed 10 auf, den grössten Standardfehler hat MTFD 0. Zu beachten ist jedoch, dass kartierte Erosionsursachen wie externer Wasserzufluss und Fahrspuren vom Erosionsmodell nicht berücksichtigt werden. Es wurden also die Parzellen entfernt, welche die oben erwähnten Erosionsursachen aufweisen. Auch die Parzellen, die keine Erosion innerhalb der 10-jährigen Messstudie hatten, wurden entfernt, da davon auszugehen ist, dass diese irgendwann einmal Bodenabtrag haben werden. Im Erosionsmodell ist eine Erosion von Null auf Ackerflächen nicht möglich. So wurde die bestmögliche Übereinstimmung von Modell und kartiertem Abtrag gewährleistet. Nun wurden die Modelle und Messungen erneut transformiert und nach dem höchsten und niedrigsten Standardfehler untersucht (Tabelle 15). Den niedrigsten Standardfehler weist der Ansatz nach MUSLE 87 bei Gisler et al. (2010) auf. Den zweitniedrigsten Standardfehler zeigt der MTFD 1.1-Algorithmus und den grössten Standardfehler hat der Watershed-Algorithmus mit Konvergenzwert 1. Da die Standardfehler jedoch sehr ähnlich sind, reicht diese Auswertung für einen Entscheid des passenden Algorithmus nicht aus. Eine Tendenz Richtung MTFD lässt sich aber erkennen, da der MUSLE87 Ansatz veraltet und nicht mehr verfügbar ist (Tabelle 15).

Tabelle 15: Standardfehler der gefitteten Modelle gegenüber den mittleren Abtragswerten der 203 Parzellen nach Entfernung von Erosionsursachen wie Fahrspuren, externer Wasserzufluss und Parzellen ohne Erosion (0 t ha^{-1} a^{-1}).

Algorithmus	**MFD**			**MTFD**			**Watershed**			**DINF**	**MUSLE87**
Konvergenzwert	0	1.1	1.25	0	1.1	1.25	1	5	10	1.1	-
Standardfehler	0.5876	0.5874	0.5874	0.5873	0.5871	0.5871	0.5905	0.5895	0.589	0.5874	0.5851

Im zweiten Schritt wurde eine weitere Kalibrierung und Validierung anhand der aufsummierten Bodenabträge der fünf Gebiete Frienisberg, Suberg, Seedorf, Schwanden und Lobsigen durchgeführt und ebenfalls mit dem Standardfehler überprüft. Zur Kalibrierung wurden die kartierten Abtragswer-

te um 10 % erhöht, da es möglich ist, dass die Bodenabträge bei der Kartierung leicht unterschätzt wurden, weil z.B. kleine Erosionsereignisse übersehen wurden (Prasuhn Expertenwissen). Den niedrigsten Standardfehler erreichte der MTFD 1.1-Algorithmus. Jedoch ergab die Validierung einen um 38 t a^{-1} niedrigeren Summenwert des Bodenabtrages als die aufsummierten Bodenabträge aus den 10-jährigen Kartierungen (1997-2007). Die anderen Modelle haben jedoch noch höhere Abweichungen (Tabelle 16; Abbildung 15).

Tabelle 16: Kalibrierung und Validierung der Modelle mit 10 jährigen Erosionsabschätzungen auf Basis der aufsummierten kartierten Abtragswerte + 10 % (1997-2007). Beispiele mit hohem (Watershed1), mittlerem (DINF 1.1) und niedrigem (MTFD1.1; grau hinterlegt) RMSE (Standardfehler); FR=Frienisberg LO=Lobsigen SCH=Schwanden SE=Seedorf SU=Suberg.

		Originale Mittelwerte der Modelle [t a^{-1}]			**Kalibrierte Modelle [t a^{-1}] $y=ax^b$**			**Validierte Modelle [t a^{-1}] Angewendete Fits**		
Gebiet	**Summierte kartierte Abtragswerte 1997-2007 in t/ yr+ 10%**	**MTFD 1.1**	**Watershed1**	**DINF 1.1**	**MTFD1.1 Eq.1: a=0.0623 b= 1.14053**	**Watershed 1 Eq.2: a=0.01135 b=1.39185**	**DINF 1.1 Eq.3: a= 0.04224 b=1.20824**	**MTFD 1.1**	**Watershed1**	**DINF 1.1**
FR	67.7	461.8	512.9	450.5	68.11	67.14	67.9	48.84	24.4	39.7
LO	18.1	189.7	270.4	200.1	24.66	27.54	25.5	16.52	8.5	13.6
SCH	8.0	81.0	102.9	84.7	9.34	7.17	9.02	7.10	3.08	5.7
SE	5.0	71.6	79.7	71.40	8.13	5.02	7.34	6.05	2.3	4.7
SU	33.2	181.09	247.4	187.42	23.37	24.3	23.5	15.10	6.9	11.8
Summe	132.0	985.1	1213.2	994.1	133.6	131.2	133.3	93.6	45.2	75.5

Die Validierung zeigt bei den drei Gebieten mit durchschnittlichen Abtragswerten niedriger als 20 t a^{-1} eine gute Übereinstimmung, jedoch zeigt sich eine Unterschätzung bei den beiden Gebieten mit hohen durchschnittlichen Abtragswerten > 20 t a^{-1}. D.h., dass von der Validierung Gebiete (3 & 5) mit hohen durchschnittlichen Abtragswerten (>20 t a^{-1}) unterschätzt werden und Gebiete (1, 2 & 4) mit niedrigen oder mittleren Werten (5-20 t a^{-1}) relativ gut abgeschätzt werden (Abbildung 15).

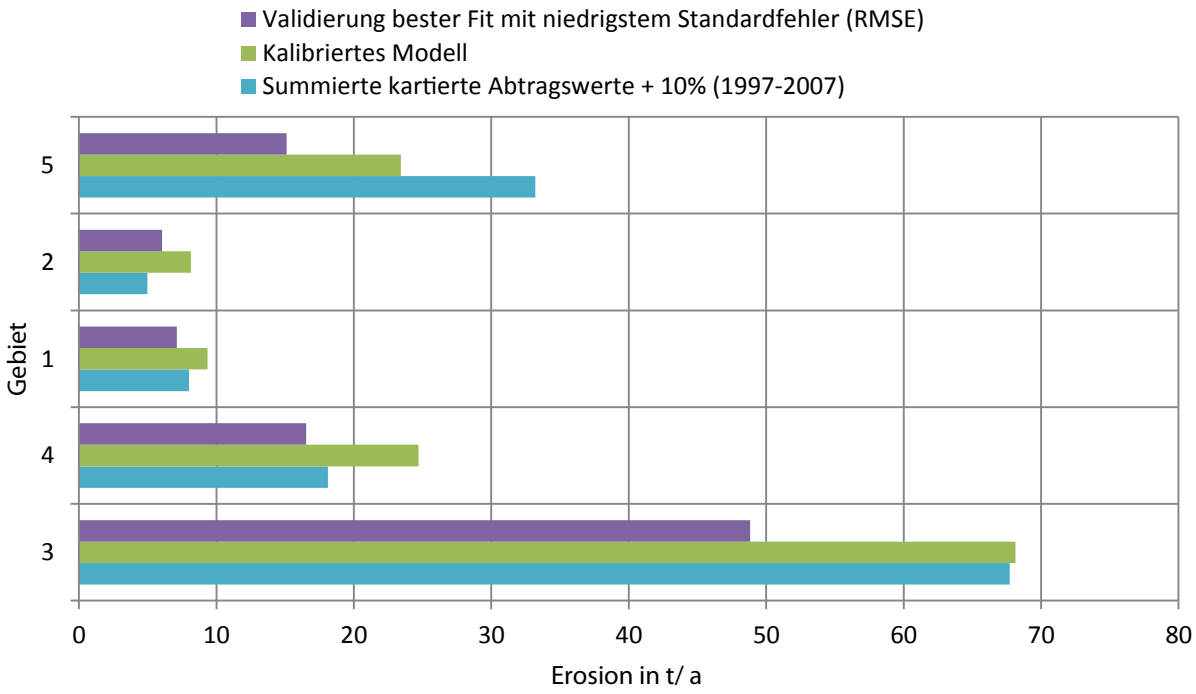


Abbildung 15: Darstellung der aufsummierten Abträge +10 % (1997-2007) gegenüber dem kalibrierten Modell und der angewendeten Validierung für MTFD 1.1; 1=Schwanden, 2=Seedorf,3=Frienisberg, 4=Lobsigen, 5=Subergentnommen aus Tabelle 16.

4.2 Pseudo -Qualitative Analyse

Ein direkter pixel-basierter Vergleich zwischen aufsummierten, digitalisierten kartierten Bodenabträgen über 10 Jahre und den mit verschiedenen Modellen berechneten Bodenabträgen war nicht zielführend. Die aufgezeigte und auch aus der Literatur bekannte Überschätzung der modellierten Abtragswerte sowie die Lageungenauigkeit der kartierten Bodenabträge lässt kaum exakte Übereinstimmungen der Abtragswerte einzelner Pixel erwarten. Entsprechend ergab sich auch kein Zusammenhang bei einem pixelbasierten Vergleich im Gebiet Frienisberg. Daher wurden die kartierten Abtragswerte klassiert und die Klassen verglichen. Da es von prioritärem Interesse ist, die Flächen mit hohen kartierten Bodenabträgen mit dem Modell bestmöglich abzubilden, haben wir uns bei diesem Vergleich auf Bereiche mit mittlerer bis hoher Erosion konzentriert. Zwei Bodenabtragsklassen wurden basierend auf den aufsummierten digitalisierten Kartierdaten von 1997-2007 gebildet (Schelbert 2016). Klasse 1 entspricht den aufsummierten Bodenabträgen zwischen 4 t ha^{-1} a^{-1} bis 10 t ha^{-1} a^{-1}, Klasse 2 stellen aufsummierten Bodenabträge über 10 t ha^{-1} a^{-1} dar. Dies wurde über das ganze Gebiet (Frienisberg, Suberg, Lobsigen, Seedorf und Schwanden) durchgeführt. (siehe Beispiel: Frienisberg; Abbildung 16).

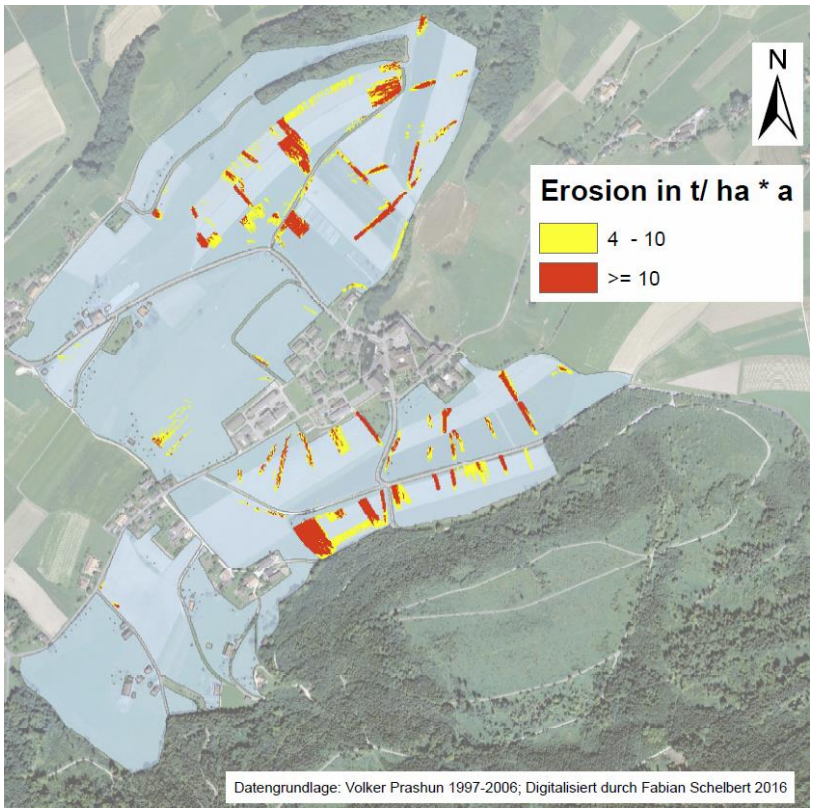


Abbildung 16: Aufsummierter Bodenabtrag nach Klassen in t/ha*a für den Zeitraum 1997-2007, digitalisiert von Schelbert (2016); hinterlegt mit Feldblockplan in Frienisberg.

Eine wichtige Rolle spielt in der pseudo-qualitativen Analyse die Streuung (Dispersion) der Fliesswege, die über die verschiedenen Konvergenzeinstellungen der Modelle gewählt werden kann. Insgesamt zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung zwischen 60-70 % - je nach Modell und Konvergenzeinstellung - bei der höheren Abtragsklasse 2. Bei der niedrigeren Abtragsklasse 1 ist die Übereinstimmung mit 20-25 % gering, d.h. im Modell werden diese Pixel häufig mit höherem oder geringerem Bodenabtrag abgebildet (Tabelle 17). Da die RUSLE-Modelle und deren Derivate ohne Kalibrierung und Validierung Bodenabträge überschätzen, ist ein Korrekturfaktor angezeigt, welcher zu einer höheren Übereinstimmung bei beiden Klassen führen könnte (Klik & Zartl 2001, Rymszewicz et al. 2015, Hammad et al. 2004). Details zum Korrekturfaktor werden in Bircher et al. (2019b) ausführlich diskutiert. Bei höherer Streuung (MFD & MTFD 0; Watershed 1) ist die Übereinstimmung besser als bei niedriger Streuung bezüglich Klasse 2 (>10 t ha^{-1} a^{-1}). Bezüglich Klasse 1 (4 t ha^{-1} a^{-1} – 10 t ha^{-1} a^{-1}) würde sich eher der Watershed-Algorithmus mit Konvergenzwert 10 eigenen, die Unterschiede zwischen den Modellen und Konvergenzen sind hier aber recht klein. Da das Ziel der Erosionsrisikokarte eher auf der möglichst guten Abbildung der grösseren Abträge (> 10 t ha^{-1} a^{-1}) liegt, zeigt der MTFD-Algorithmus mit dem Konvergenzwert 0 die besten Werte (Tabelle 17).

Tabelle 17: Qualitative Analyse von kartierten Ereignissen pixelbasiert und Vergleich der Modelle im gesamten Gebiet (Frienisberg, Suberg, Seedorf, Lobsigen und Schwanden); hellblau hinterlegt niedrigste Übereinstimmung; grün hinterlegt höchste Übereinstimmung.

Klasse	Gesamt-zahl Pixel	MFD			MTFD			Watershed			DINF	MUSLE 87
	Konvergenz	0	1.1	1.25	0	1.1	1.25	1	5	10	1.1	-
4 t - <= 10 t	12‘796	2626	2793	2810	2514	3056	3058	2822	3062	3159	3134	2871
Anteil in %	100	20.5	21.8	22.0	19.6	23.9	23.9	22.0	23.9	24.7	24.5	22.4
>10 t	9340	6334	6228	6210	6450	5850	5845	6323	5963	5599	5824	5750
Anteil in %	100	67.8	66.7	66.5	69.1	62.6	62.6	67.7	63.8	59.9	62.4	61.6

4.3 Synthese der verschiedenen statistischen Verfahren

Aufgrund der verschiedenen statistischen Auswertungen lässt sich der optimale Algorithmus eruieren. Die ausgewählten vier neuen Multiple Flow Algorithmen (mit verschiedenen Konvergenzeinstellungen) unterscheiden sich nicht gravierend untereinander und vom bisher verwendeten Algorithmus MUSLE87. Der **MTFD-Algorithmus** kristallisiert sich aber als Favorit bei den pseudo-qualitativen Analysen und den Auswertungen nach den fünf Gebieten heraus. Bei geringer Streuung sinkt die pseudo-qualitative Übereinstimmung (MTFD 1.25) allerdings. Um die Streuung und Konvergenz ausgeglichen zu berücksichtigen, haben wir den **Konvergenzwert 1.1** verwendet, welcher die beiden Extreme 0 und 1.25 berücksichtigt.

Der Vergleich von kartierten Bodenabtragsdaten und modellierten Abtragswerten unter Einbezug von parzellenscharfen K-, C- und P-Faktoren (= aktuelles Erosionsrisiko) zeigt eine massive Überschätzung der modellierten Abtragswerte gegenüber den kartierten Abträgen. Ein entsprechender Korrekturfaktor wurde entwickelt (Kap. 5). Eine präzise Kalibrierung und Validierung und deren Diskussion finden sich in Bircher et al. (2019b).

5. Korrektur der Erosionsrisikokarte und Ergebnisse der neuen ERK2 (2019) des Ackerlandes

5.1 Korrektur der Erosionsrisikokarte

Beim Vergleich der mit dem gewählten Algorithmus MTFD 1.1 (Seibert & Glynn (2007) berechneten aktuellen Bodenabträge mit den 10-jährigen kartierten Bodenabträgen in der Region Frienisberg ergab sich im Mittel eine massive Überschätzung der Bodenabträge durch das Erosionsmodell. Diese Überschätzung war jedoch nicht überall gleich gross. Dort, wo hohe Bodenabträge kartiert wurden, sagte das Modell auch ähnlich hohe Bodenabträge vorher und stimmte relativ gut. Dort, wo sehr geringe oder keine Bodenabträge kartiert wurden, sagte das Modell aber oftmals auch hohe Bodenabträge vorher. In den Bereichen, wo für Fliesswege hohe L-Faktoren vorkommen (Geländemulden, grosse Hanglängen, grosse hydrologische Wassereinzugsgebiete) und viel Rillenerosion oder flächenhaft-lineare Erosion kartiert wurde, stimmten Modell und Kartierung relativ gut überein, während in Bereichen mit hohen S-Faktoren (steile, gestreckte Hangpartien) das Modell hohe flächenhafte Erosion vorhersagt, die aber im Feld so nicht kartiert wurde. Aufgrund dieser Beobachtung haben wir verschiedene Varianten mit unterschiedlicher Gewichtung der LS-Faktoren getestet. Eine leichte Erhöhung des L-Faktors (Faktor 1,1) bei gleichzeitiger entsprechender Verringerung des S-Faktors (Faktor 0,9) führte zu einer besseren räumlichen Verteilung der modellierten Bodenabträge (Abbildung 18-22, Tabelle 18; Details dazu siehe Bircher et al. 2019b).

Visuell ergeben sich auf den ersten Blick zwischen alter ERK2 2010, neuer unkorrigierter ERK2 2019 und neuer LS-Faktor-korrigierter ERK2 2019 kaum Unterschiede (Abbildung 17). Bei einer detaillierten Analyse und statistischen Auswertung zeigen sich aber Unterschiede (Tabelle 18). Die Maximalwerte liegen bei der unkorrigierten ERK2 2019 und der LS-Faktor-korrigierten ERK2 2019 erheblich höher als bei der ERK2 2010. Die Mittelwerte hingegen und Standardabweichungen sowie Minimumwerte zeigen keine grossen Unterschiede, was die Ähnlichkeit der Ansätze unterstreicht.

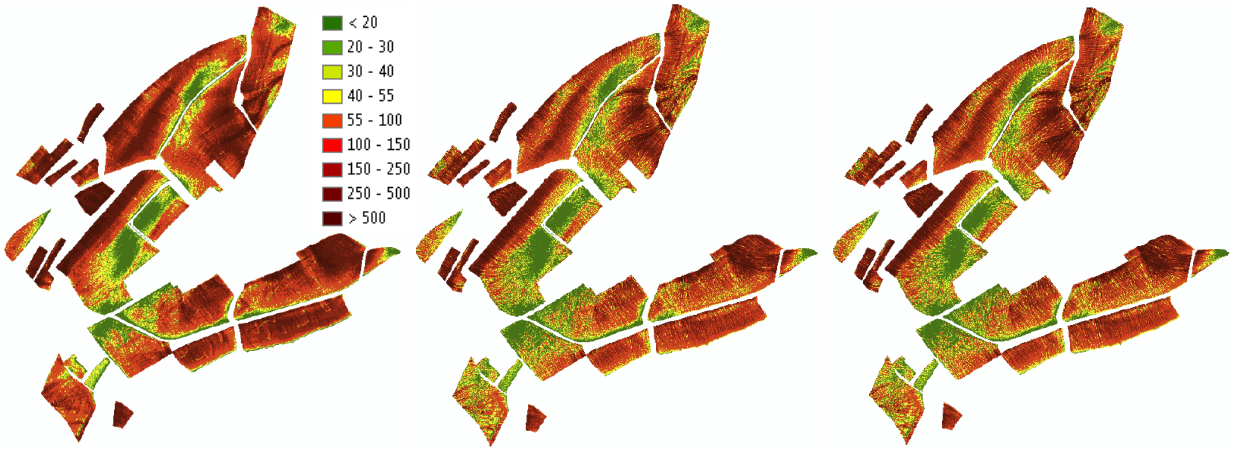


Abbildung 17: Vergleich der Karten des potentiellen Erosionsrisikos der alten ERK2 2010 (links) mit der unkorrigierten neuen ERK2 2019 (mitte) und der neuen ERK2 2019 mit korrigiertem LS-Faktor (Gewichtung L-Faktor 1,1 und S-Faktor 0,9) (rechts) für das Teilgebiet Frienisberg.

Tabelle 18: Potentielles Erosionsrisiko in t ha^{-1} a^{-1} der verschiedenen Ansätze für das Teilgebiet Frienisberg (s. Abb. 17).

	ERK2 2010 unkorrigiert	ERK2 2019 unkorrigiert standard Ansatz	ERK2 2019 Ansatz mit LS-Korrektur
Minimum	0.99	0.54	0.61
Mittelwert	166.3	134.8	117.7
Maximum	2202	5108	5285
Standardabweichung	146.5	157.5	149.2

In einem zweiten Schritt musste aber trotzdem noch eine generelle Modellkorrektur durchgeführt werden, da die so berechneten Bodenabträge deutlich zu hoch waren (Tabelle 19). Ein Vergleich der modellierten und gemessenen Werte für verschiedene Erosionsklassen zeigt dass die Überschätzung in den unteren und mittleren Klassen den einen Faktor von 4 bis 6 erreicht in den oberen Klassen Faktor 9 oder sogar 13 erreichen kann. Als Korrekturfaktor wurde der Wert 5 gewählt. D.h., alle modellierten Bodenabtragswerte wurde durch 5 dividiert. In Anbetracht der Unsicherheiten bei der Modellierung und der Kartierung und im Sinne der Prävention wurde diese eher konservative Korrektur gewählt. Mit dem Faktor 5 wurde sichergestellt, dass der mittlere modellierte Bodenabtrag weiterhin klar über dem kartierten mittleren Bodenabtrag liegt (Tabelle 19). Durch diese Korrektur kann die Berechnung des aktuellen Erosionsrisikos ohne weitere Korrektur direkt aus dem potentiellen Erosionsrisiko gemacht werden.

Tabelle 19: Einteilung in potentielle Erosionsklassen zur Kontrolle von Korrekturansätzen bezüglich der Gebiete (Frienisberg, Lobsigen, Seedorf, Suberg und Schwanden).

	Einheit	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5	Klasse 6	Summe
Erosionsklassen	t/ha	0-20	20-40	40-80	80-160	160-320	> 320	-
Anzahl Pixel	N	231'191	133'567	116'847	90'181	44'452	15'203	631'441
Fläche in ha	ha	92.5	53.4	46.7	36.1	17.8	6.1	252.6
Unkorrigiertes potentielles Erosionsrisiko der summierten Pixel pro Klasse	t	1082.9	1527.3	2678.8	4055.4	3878.3	2967.5	16190.3
Unkorrigiertes aktuelles Erosionsrisiko der summierten Pixel pro Klasse	t	98.1	136.0	231.3	356.3	359.1	281.4	1462.1
Kartierte Erosion	$t\ a^{-1}$	24.9	26.0	37.8	48.4	38.6	21.1	196.8
Korrekturfaktor berechnet	-	4	5	6	7	9	13	7
Aktuelles Risiko mit verwendetem Ansatz	$T\ a^{-1}$	17.3	23.5	40.5	62.6	63.6	52.3	259.7

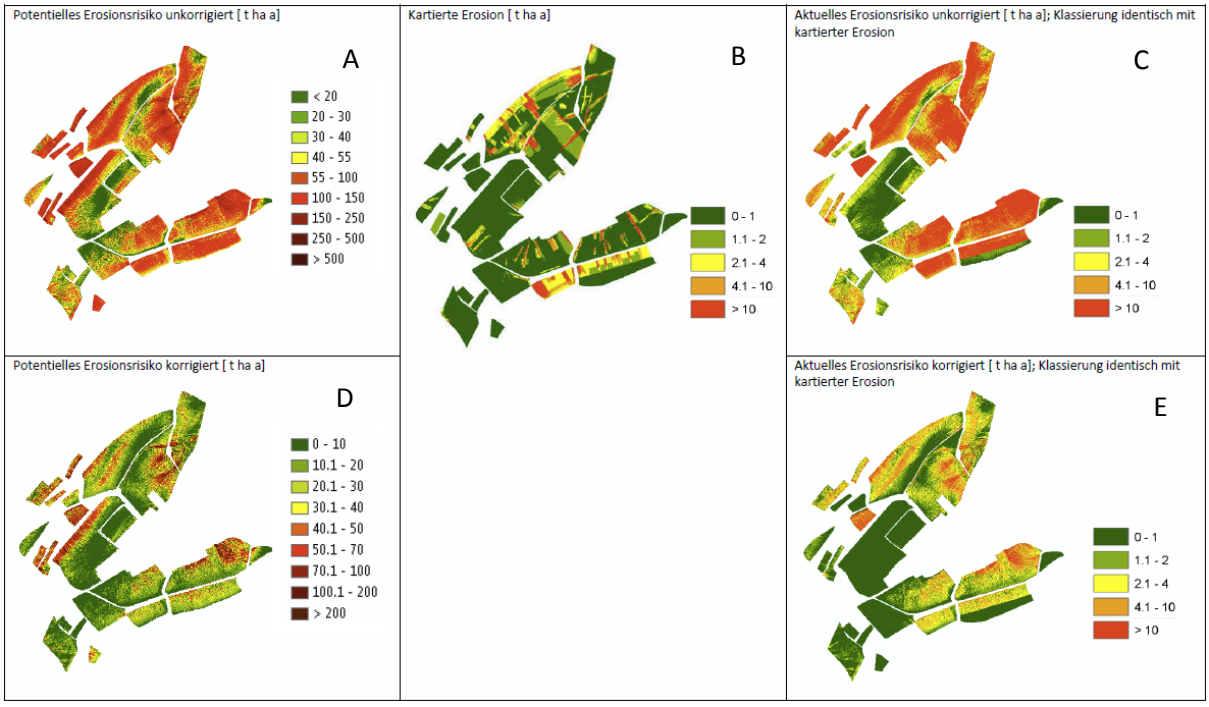


Abbildung 18: Vergleich von unkorrigierten und korrigierten Erosionsrisiko mit dem kartierten Erosionsrisiko für das Gebiet Frienisberg. A: unkorrigiertes potentielles Erosionsrisiko mit alter Klassierung, B: mittlerer kartierter Bodenabtrag über 10 Jahre, C: unkorrigiertes aktuelles Erosionsrisiko mit parzellenscharfen C- und P-Faktoren, D: korrigiertes potentielles Erosionsrisiko (LS-Faktorgewichtung 1.1 zu 0.9 und Division durch Faktor 5) mit neuer Klassierung, E: aktuelles korrigiertes Erosionsrisiko.

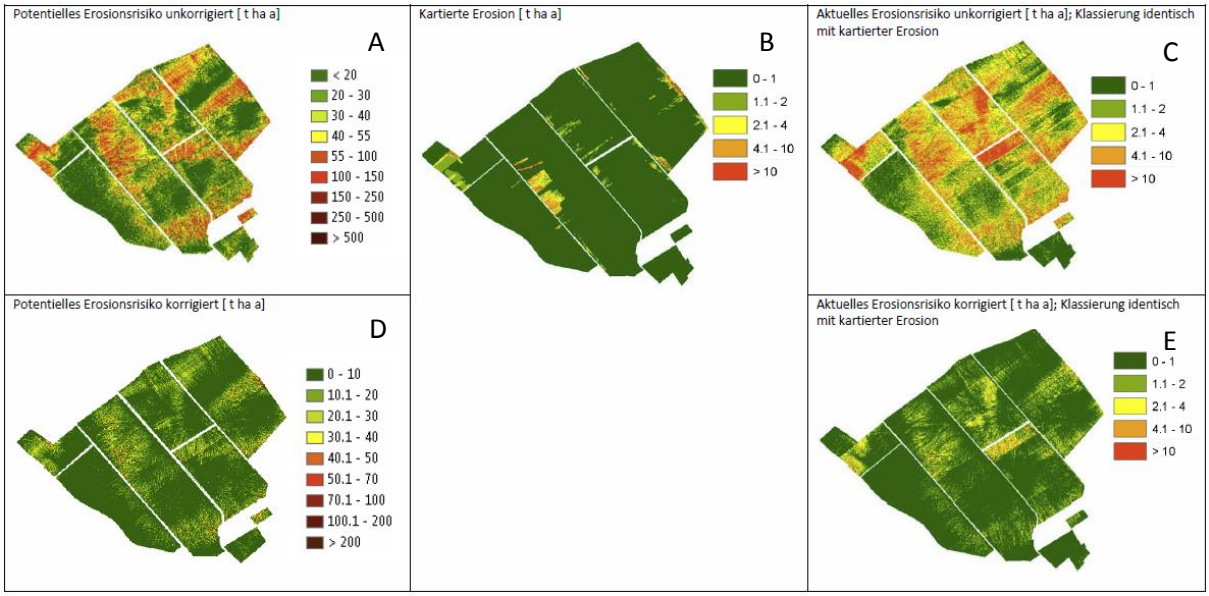


Abbildung 19: Vergleich von unkorrigierten und korrigierten Erosionsrisiko mit dem kartierten Erosionsrisiko für das Gebiet Lobsigen. A: unkorrigiertes potentielles Erosionsrisiko mit alter Klassierung, B: mittlerer kartierter Bodenabtrag über 10 Jahre, C: unkorrigiertes aktuelles Erosionsrisiko mit parzellenscharfen C- und P-Faktoren, D: korrigiertes potentielles Erosionsrisiko (LS-Faktorgewichtung 1.1 zu 0.9 und Division durch Faktor 5) mit neuer Klassierung, E: aktuelles korrigiertes Erosionsrisiko.

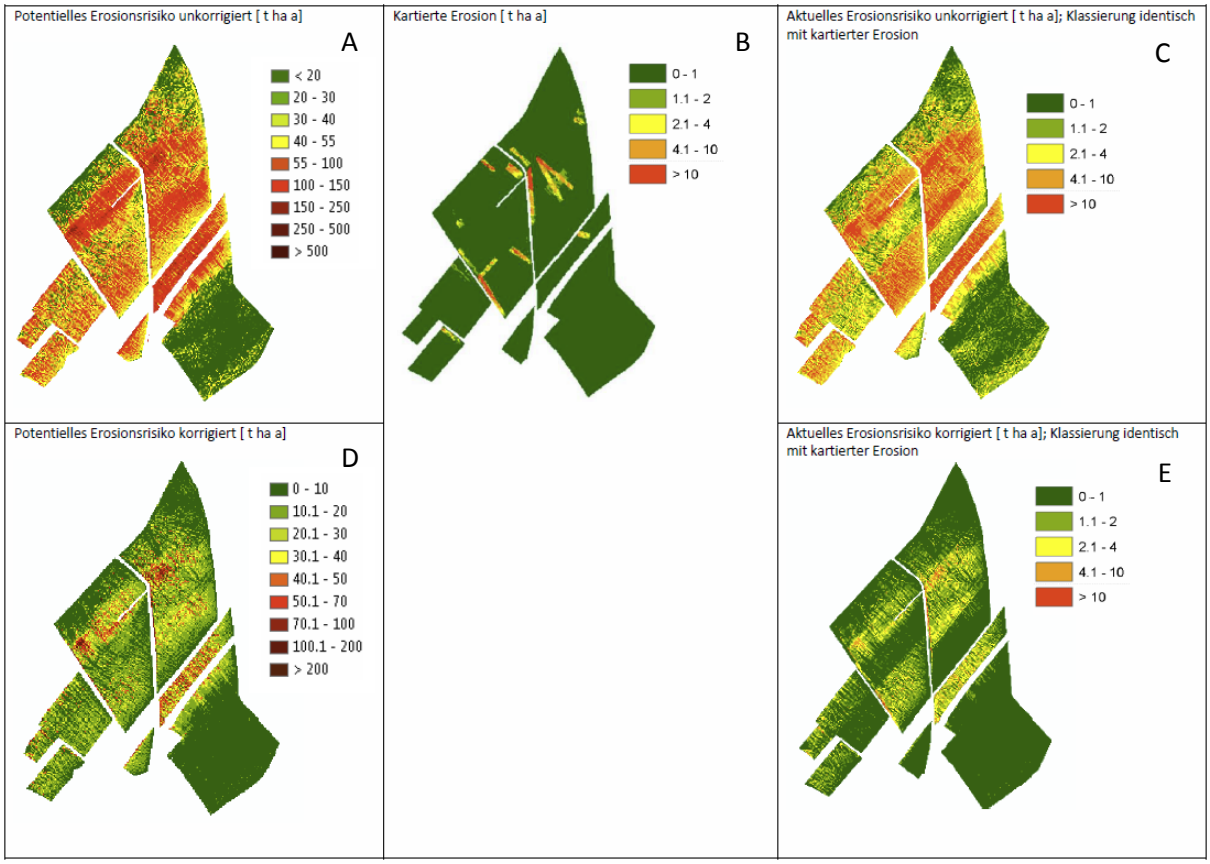


Abbildung 20: Vergleich von unkorrigierten und korrigierten Erosionsrisiko mit dem kartierten Erosionsrisiko für das Gebiet Seedorf. A: unkorrigiertes potentielles Erosionsrisiko mit alter Klassierung, B: mittlerer kartierter Bodenabtrag über 10 Jahre, C: unkorrigiertes aktuelles Erosionsrisiko mit parzellenscharfen C- und P-Faktoren, D: korrigiertes potentielles Erosionsrisiko (LS-Faktorgewichtung 1.1 zu 0.9 und Division durch Faktor 5) mit neuer Klassierung, E: aktuelles korrigiertes Erosionsrisiko.

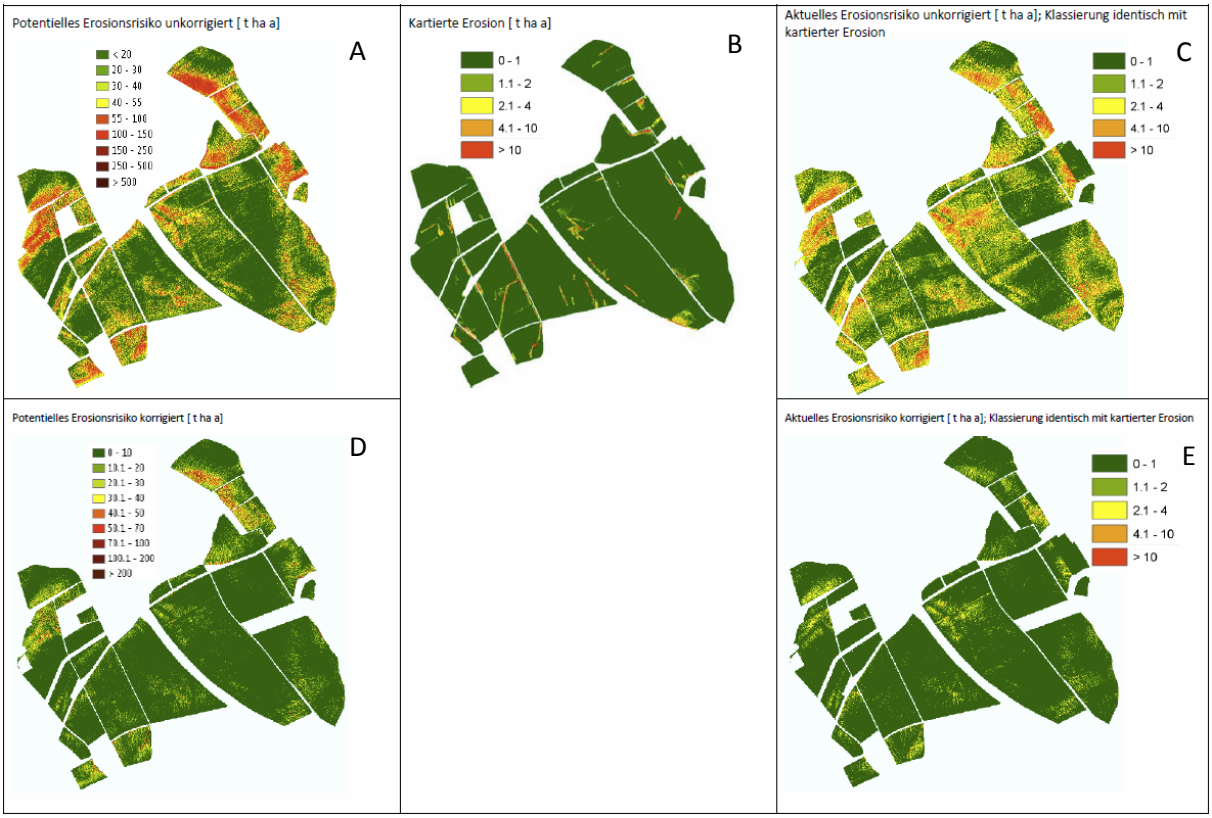


Abbildung 21: Vergleich von unkorrigierten und korrigierten Erosionsrisiko mit dem kartierten Erosionsrisiko für das Gebiet Suberg. A: unkorrigiertes potentielles Erosionsrisiko mit alter Klassierung, B: mittlerer kartierter Bodenabtrag über 10 Jahre, C: unkorrigiertes aktuelles Erosionsrisiko mit parzellenscharfen C- und P-Faktoren, D: korrigiertes potentielles Erosionsrisiko (LS-Faktorgewichtung 1.1 zu 0.9 und Division durch Faktor 5) mit neuer Klassierung, E: aktuelles korrigiertes Erosionsrisiko.

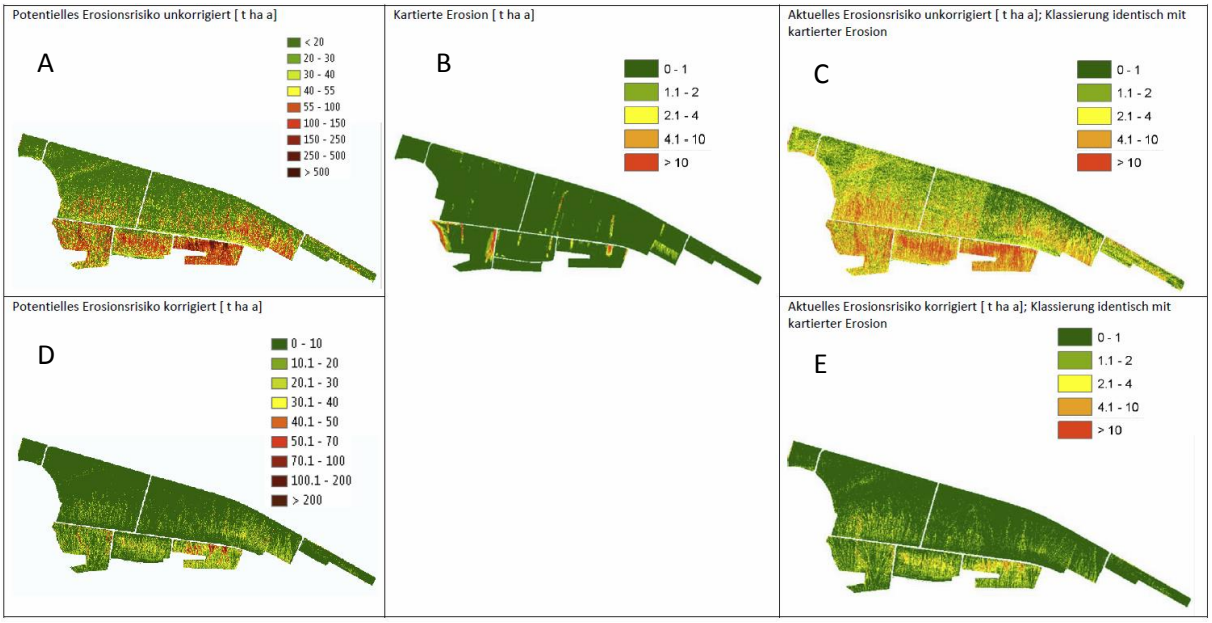


Abbildung 22: Vergleich von unkorrigierten und korrigierten Erosionsrisiko mit dem kartierten Erosionsrisiko für das Gebiet Schwanden. A: unkorrigiertes potentielles Erosionsrisiko mit alter Klassierung, B: mittlerer kartierter Bodenabtrag über 10 Jahre, C: unkorrigiertes aktuelles Erosionsrisiko mit parzellenscharfen C- und P-Faktoren, D: korrigiertes potentielles Erosionsrisiko (LS-Faktorgewichtung 1.1 zu 0.9 und Division durch Faktor 5) mit neuer Klassierung, E: aktuelles korrigiertes Erosionsrisiko.

Tabelle 20: Statistische Werte für potentielles und aktuelles Erosionsrisiko (unkorrigiert / korrigiert) und kartierter Erosion) aller fünf Gebiete (Frienisberg, Lobsigen, Seedorf, Suberg und Schwanden) aus Abb 18-22 in t / ha a.

	Pot. Erosionsrisiko unkorrigiert	**Kartierte Erosion**	**Aktuelles Erosionsrisiko unkorrigiert**
Minimum	0.90	0.00	0.01
Mittelwert	56.70	0.77	5.10
Maximum	7‘165	532	1‘174
Standardabweichung	93.2	4.3	10.9
	Pot. Erosionsrisiko korrigiert		**Aktuelles Erosionsrisiko korrigiert**
Minimum	0.18		0.002
Mittelwert	11.34		1.02
Maximum	1‘433		235
Standardabweichung	18.6		2.2

Aus den Abbildungen 18-22 und Tabelle 20 wird ersichtlich, dass das aktuelle Erosionsrisiko bei der unkorrigierten Modellversion massiv über den mittleren kartierten Bodenabträge liegt. Nach der Modellkorrektur ergibt sich dagegen eine relativ gute Übereinstimmung zwischen modellierten und kartiertem Bodenabtrag. Die meisten Areale mit hoher kartierter Erosion zeigen auch in der modellierten Version ein hohes Erosionsrisiko. Viele Flächen mit geringem kartierten Bodenabtrag zeigen nun auch im Modell ein geringes Erosionsrisiko. Auf einzelnen Parzellen oder Arealen kann es aber weiterhin zu Abweichungen kommen. Die Realität ist sehr komplex und kann mit dem relativ einfachen Erosionsmodell in einigen Fällen nur bedingt oder nicht richtig abgebildet werden.

Die Korrektur des Erosionsmodells bedingt auch, dass die Klassierung des potentiellen Erosionsrisikos (Klasseneinteilung und Farbgebung) ebenfalls neu gestaltet werden musste. Hier wurde ein möglichst pragmatisches Vorgehen gewählt und ein einfacher und zugleich transparenter Ansatz gewählt. Der mittlere C-Faktor der am häufigsten vorkommenden Ackerkultur in der Schweiz (Winterweizen) liegt bei rund 0,11. Der mittlere C-Faktor von typischen Kulturabfolgen der Schweiz liegt nach Prasuhn & Blaser (2018) in etwa bei 0,12. Berücksichtigt man noch den P-Faktor, ergibt sich ein CP-Wert von ungefähr 0,10. Das bedeutet, dass das aktuelle Erosionsrisiko im Mittel der Ackerflächen der Schweiz um einen Faktor 10 kleiner als das potentielle Erosionsrisiko ist. Legt man für das aktuelle Erosionsrisiko die Richtwerte der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) in Höhe von 2 bzw. 4 t/ha und Jahr zugrunde sowie den Wert von 2 t/ha für relevante Erosion eines Einzelereignisses gemäss Direktzahlungsverordnung (DZV), ergeben sich für das potentielle Erosionsrisiko entsprechend Schwellenwerte von 20 bzw. 40 t/ha und Jahr. Bei einem potentiellen Bodenabtrag von <20 t/ha und Jahr besteht also bei einer durchschnittlichen Bewirtschaftung ein geringes Erosionsrisiko (Farbe grün). Bei einem potentiellen Bodenabtrag von >40 t/ha und Jahr existiert entsprechend bei einer durchschnittlichen Bewirtschaftung ein hohes Erosionsrisiko (Farbe rot), da bei einer durchschnittlichen Bewirtschaftung der VBBo-Richtwert von 4 t/ha und Jahr überschritten würde. Dem Bereich zwischen 20 und 40 t/ha und Jahr wird ein mittleres Risiko (Farbe gelb) zugewiesen (Abbildung 23).

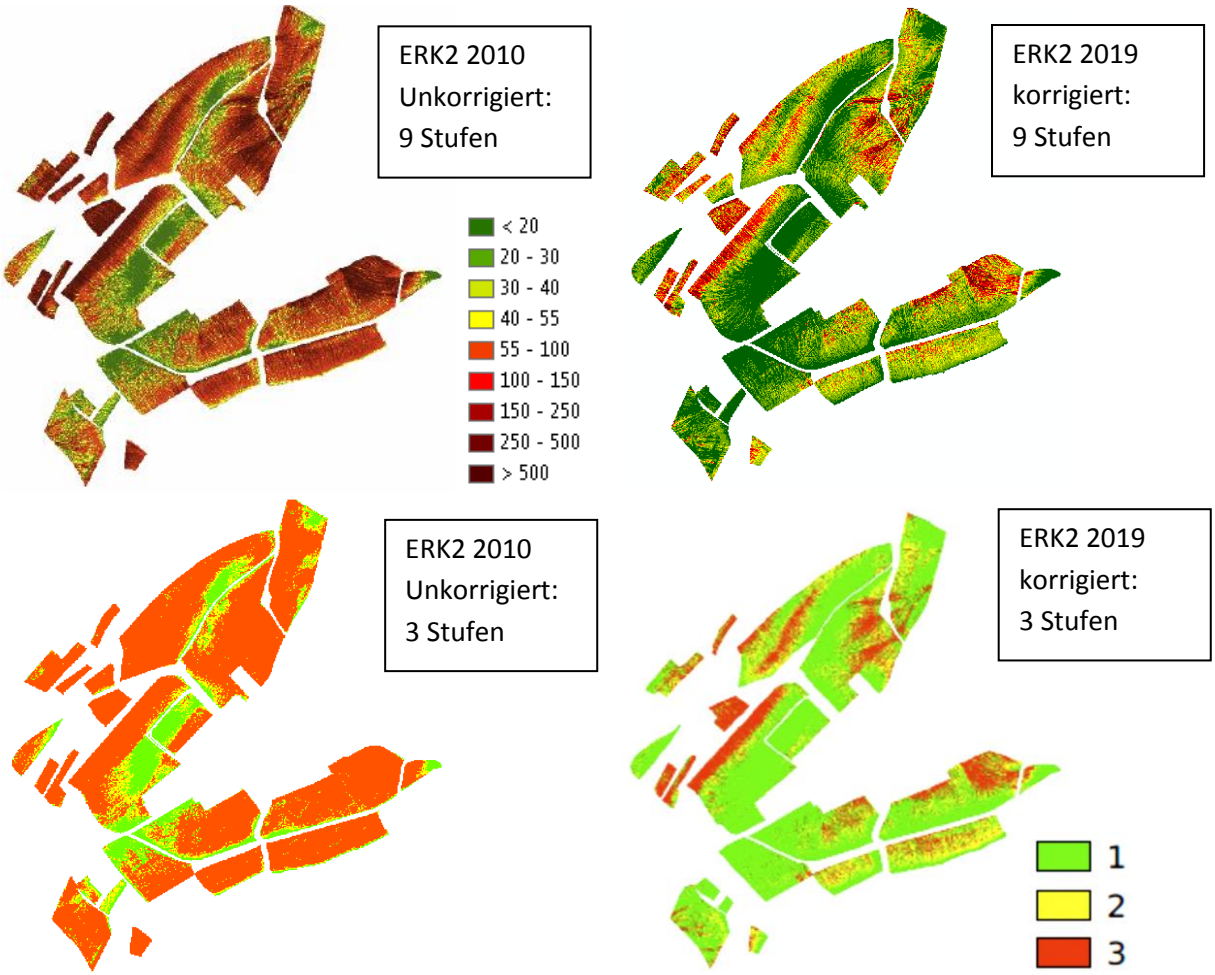


Abbildung 23: Links Erosionsklassen nach altem unkorrigiertem Ansatz (ERK2 2010); Rechts ERK2 2019 mit neuer korrigierter Klasseneinteilung (Oben 9 Klassen [t ha^{-1} a^{-1}]; Unten 3 Klassen mit 1 = geringes potentielles Erosionsrisiko, 2 = mässiges potentielles Erosionsrisiko, 3 = hohes potentielles Erosionsrisiko).

Für die praktische Anwendung (Beratung, Sensibilisierung) und den Vollzug gesetzlicher Grundlagen ergeben sich mit der neuen ERK2 2019 aber auch neue Herausforderungen bezüglich der Interpretation der Karten. Insgesamt erscheinen deutlich weniger Flächen in der Klasse «rot». Dies einerseits, weil steile Graslandflächen weggefallen sind, andererseits aber auch durch die Korrektur des berechneten potentiellen Erosionsrisikos und die neue Klassierung. Dies war zum einen gewollt, da ein häufig geäusserter Kritikpunkt der alten ERK2 der zu hohe Flächenanteil roter Flächen war und eine massive Überschätzung der Erosionswerte. Ein Feldblock, der in der alten ERK2 überwiegend rot gefärbt war und damit ein sehr hohes potentielles Erosionsrisiko angezeigt hat, erscheint in der neuen ERK2 2019 nur noch in einigen Bereichen rot eingefärbt (Abbildung 24). In diesen Bereichen besteht aber ein hohes Risiko für lineare Erosion mit sehr hohen Bodenabträgen (siehe Erosionskartierung), so dass in diesem Feldblock dringend angepasste Bewirtschaftungsmassnahmen notwendig sind. Die neue ERK2 2019 zeigt räumlich differenzierter und realitätsnaher die gefährdeten Bereiche eines Feldblocks an. In allen gelben und roten Bereichen sind Massnahmen, die über eine durchschnittliche Bewirtschaftung (C-Faktor = 0,10) hinausgehen, zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit notwendig. Da sich die meisten agronomischen Massnahmen nicht auf die besonders stark erosionsgefährdeten Bereiche (z.B. Mulde) beschränken lassen, sind meistens Massnahmen auf dem gesamten Feldblock bzw. der ganzen Parzellen durchzuführen, auf denen gelbe und/oder rote Bereiche auftreten. Hier ist also ein gewisses Umdenken notwendig.

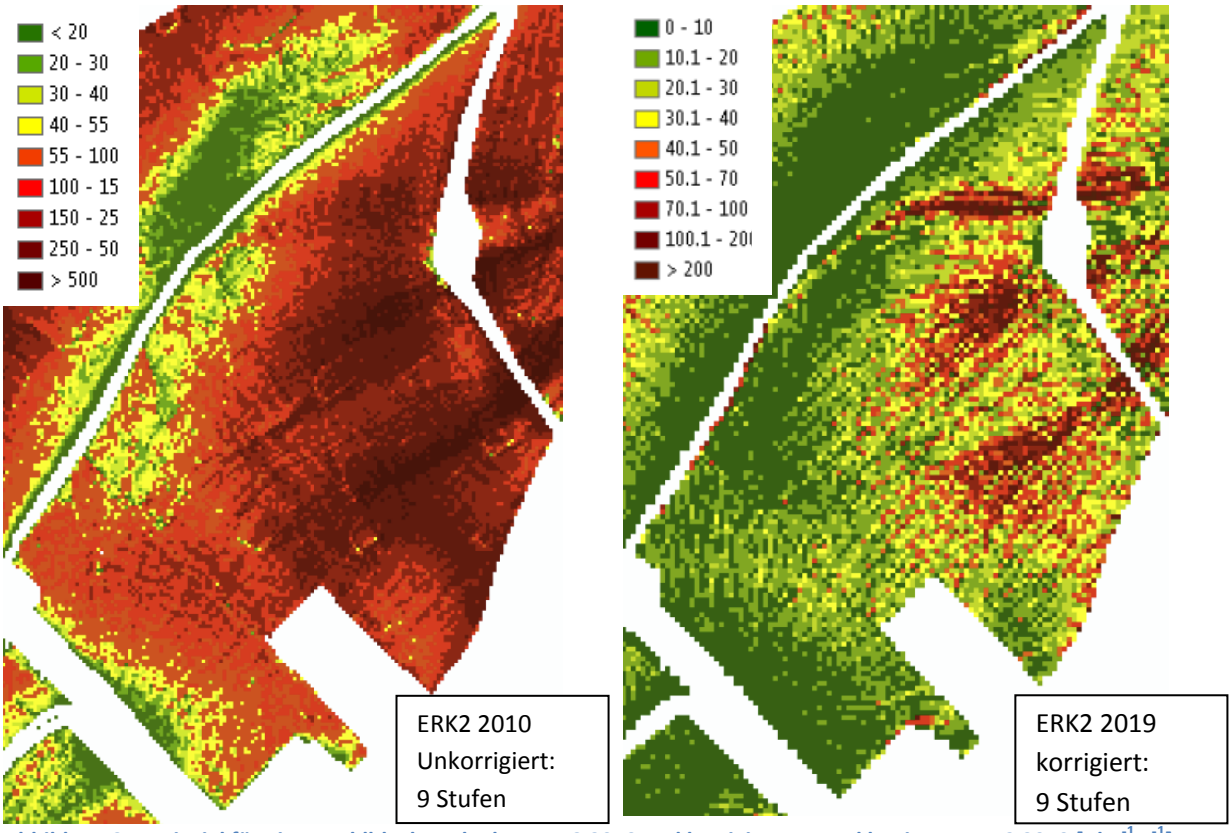


Abbildung 24: Beispiel für einen Feldblock nach alter ERK2 2010 und korrigierter, neu klassierter ERK2 2019 [t ha^{-1} a^{-1}].

5.2 Die neue, korrigierte Erosionsrisikokarte des Ackerlandes der Schweiz

Abbildung 25 zeigt die neue, korrigierte ERK2 2019 in der einfachen, dreistufigen Klassierung (Ampelsystem), Abbildung 26 die gleiche Karte in der 9-stufigen Klassierung. In beiden Karten sind die 7 Kantone, in denen keine vollständigen kantonalen Daten zur Ackerlandnutzung vorlagen und die mit der relativ ungenauen Methode 3 (Kapitel 3.5) ermittelt wurden, violett umrandet. Verschiedene Detailausschnitte der 9-stufigen Karte finden sich in Kapitel 5.3.

Der Flächenanteil des Ackerlandes welches in der grünen Klasse liegt, ist mit 79% relativ hoch. Die gelbe Klasse und rote Klasse nehmen mit jeweils 10% bzw. 11% eine kleinere, aber trotzdem relevante Fläche ein (Tabelle 21).

Tabelle 21: Flächenanteil der jeweiligen Erosionsklasse in Hektar und Prozent für die 19 Kantone mit präzisen Daten.

Erosionsrisikoklasse	Klassennummer	Klassengrösse in t ha^{-1} a^{-1}	Fläche in ha	Prozentual
Geringe Gefährdung	1	0-20	242‘963	79
Mässige Gefährdung	2	20-40	31‘156	10
Hohe Gefährdung	3	>40	32‘139	11

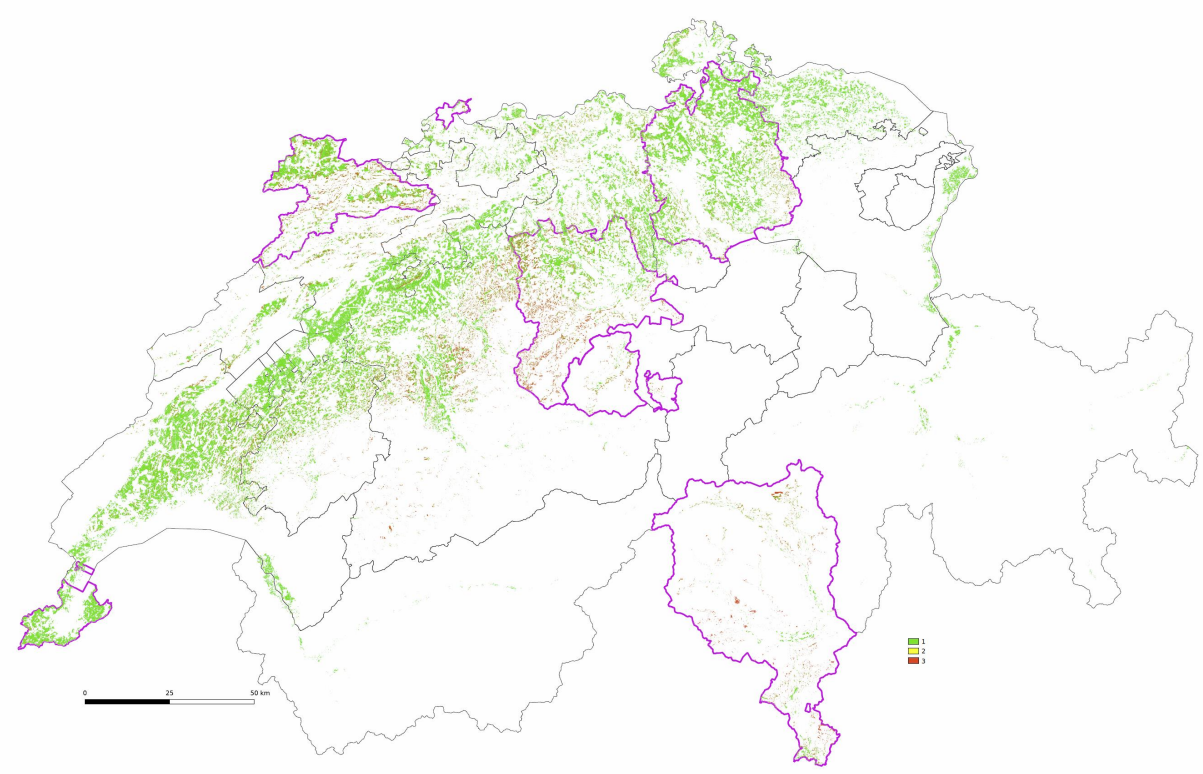


Abbildung 25: Neue Potentielle Erosionsrisikokarte ERK2 2019 des Schweizer Ackerlandes, korrigiert, mit 3-Klassenlegende für grün = geringes potentielles Erosionsrisiko, gelb = mässiges potentielles Erosionsrisiko und rot = hohes potentielles Erosionsrisiko (grössere Karte siehe Anhang).

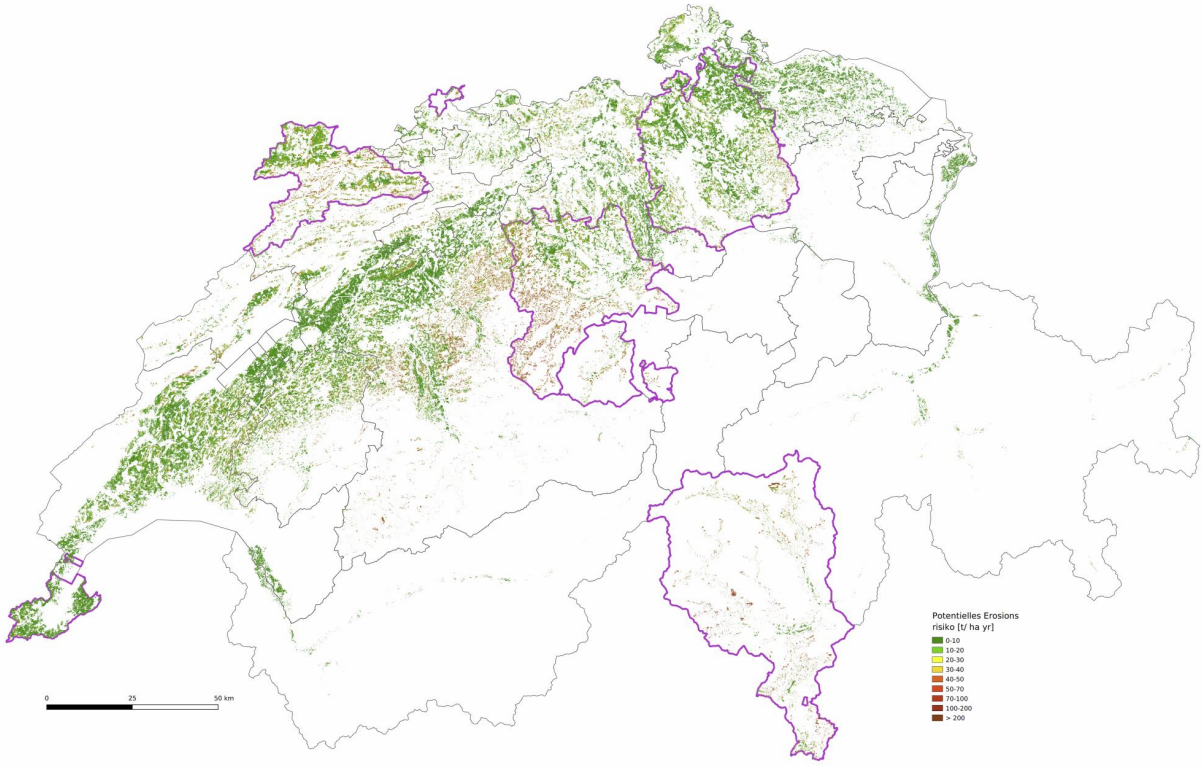


Abbildung 26: Neue Potentielle Erosionsrisikokarte ERK2 2019 des Schweizer Ackerlandes korrigiert mit 9 Klassenlegende (grössere Karte siehe Anhang).

Tabelle 22: Vergleich der Landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) und Ackerfläche inklusive potentiellem Erosionsrisiko (Summe und Durchschnitt der 19 Kantone) gemäss neuer ERK2 2019 mit Arealstatistik und Betriebsstrukturerhebung, Stand März 2019.

Kanton	LN ERK2 2019	LN[1]	LN[2]	Ackerland ERK2 2019	Ackerland		Verwendete Methode	Potentielles Erosionsrisiko der Ackerlandfläche	
					Daten[1]	Daten[2]		Summe [t]	Durchschnitt [in t $ha^{-1} a^{-1}$]
AG	59'500	61'858	60'817	33'656	37'850	36'338	1	481'552	14
AI	6'981	6'530	7'184	11	0	5	1	444	39
AR	12'297	11'778	11'865	7	7	47	1	305	44
BE	183'052	170'934	191'662	89'200	78'754	81'642	2	2'562'207	29
BL	21'333	20'073	21'621	8025	8'344	9'250	1	110'764	14
BS	443	445	428	-	245	185	3	-	-
FR	76'855	75'633	75'679	39'363	40'123	35'247	2	702'196	18
GE	11'624	11'161	11'139	-	7'738	7'431	3	-	-
GL	6'829	6'058	6'894	102	228	95	1	469	5
GR	59'621	40'673	55'866	3'682	3'715	4'015	1	27'777	8
JU	38'117	32'726	40'207	-	15'131	17'538	3	-	-
LU	71'744	71'685	76'488	-	25'730	27'701	3	-	-
NE	30'861	24'352	31'764	7'006	6'373	7'537	1	137'377	20
NW	5'667	5'280	6'002	30	41	31	1	161	5
OW	7'323	7'007	7'801	-	117	38	3	-	-
SG	67'721	67'930	71'555	7'163	8'808	8'019	1	27'782	4
SH	12'767	13'058	15'602	8'238	9'166	11'011	1	83'486	10
SO	33'211	30'226	31'528	17'875	16'090	14'757	2	300'715	17
SZ	20'932	21'597	24'381	407	848	551	1	3'930	10
TG	5'1038	51498	49'466	22'419	26'244	23'080	1	112'110	5
TI	17'789	11003	14'266	-	2'258	1'625	3	-	-
UR	6'499	5'237	6'747	7	48	10	1	19	3
VD	112'440	107'698	108'764	64'372	73'713	68'818	1	772'328	12
VS	43'209	31'234	37'723	2'245	4'454	3'432	1	5'872	3
ZG	9'796	10'255	10'631	2'451	2'817	2'567	1	27'602	11
ZH	70'011	71'875	73'645	-	38'226	37'429	3	-	-
Schweiz (gesamt)	**1'037'662**	**967'804**	**1'049'725**	**-**	**407'068**	**398'399**	-	-	-
Schweiz (18 Kantone)	**799'276**	**741'829**	**804'130**	**306'259**	**317'623**	**306'451**	**-**	**5'357'096**	**17**

LN inklusive Alpweiden und Alpwiesen: 1'481'659 ha gemäss Arealstatistik 2004-2009

[1] aus Arealstatistik 2016 Daten:2004-2009

[2] aus Betriebsstrukturerhebung 2015

- keine Daten vorhanden oder verfügbar

5.3 Methodische Probleme und Ungenauigkeiten bei der Erstellung der Ackerlandkarte

Fehler im TLM

Bei der Erstellung der Feldblockkarte wurde das TLM3D von Swisstopo 2015 verwendet. Dieses hat an einigen wenigen Stellen Fehler, die in neueren Versionen des TLM inzwischen behoben werden konnten, in der ERK2 2019 aber noch enthalten sind. Abbildung 27 zeigt einen Ausschnitt aus der Region Solothurn/Limpachtal. Eine grössere Waldfläche wurde hier als LN ausgeschieden. Da im Kanton Solothurn kein digitaler Datensatz zum Ackerland vorlag, wurde nach Methode 2 das Dauergrünland vom TLM-Datensatz extrahiert und die restliche Fläche als Ackerland bezeichnet. Entsprechend wurde auch ein Erosionsrisiko für diese Waldfläche berechnet, mit zum Teil sehr hohen Abtragswerten in Steillagen. Bei der Schlusskontrolle der neuen ERK2 2019 ist uns nur dieser Fall zwischen den Kantonen Bern und Solothurn (Blatt Lyss) aufgefallen (Abbildung 27).

Abbildung 27: Nicht erfasster Wald im TLM3D-Datensatz (Blatt Lyss) an der Grenze (violette Linie) südlich Bern, nördlich Solothurn.

Im Kanton Aargau gibt es einige wenige Bereiche, in denen die Feldblöcke nicht komplett und korrekt erfasst wurden. Dies ist wahrscheinlich auf die Genauigkeit des TLM3D‘s zurückzuführen, die von GIS-Systemen womöglich fehlerhaft berechnet wurden. Leider wurde dies bei der Plausibilisierung der Feldblockkarte nicht erkannt. Im Kanton Aargau ergeben sich somit Bereiche mit nicht komplett erfasster LN (Abbildung 28).

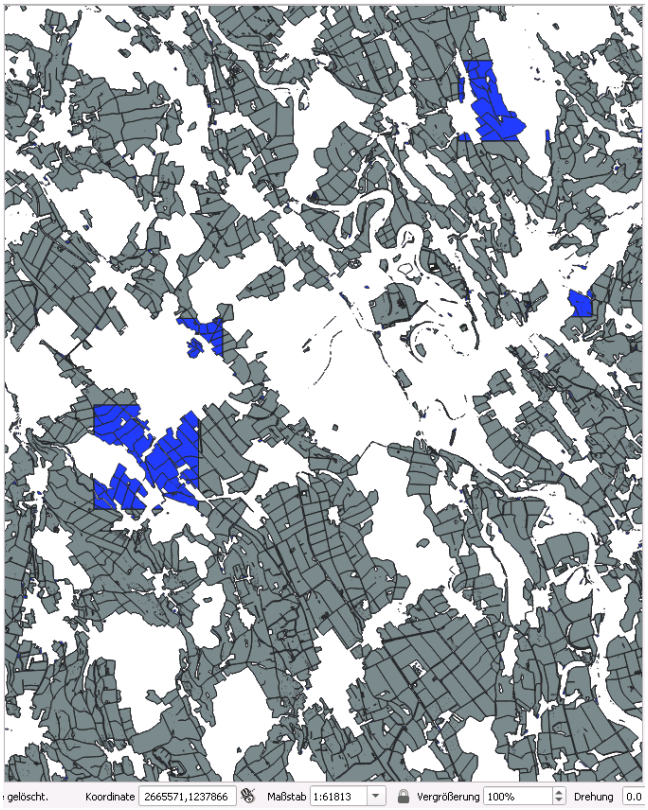


Abbildung 28: Nicht erfasste Feldblöcke der LN im Kanton AG in blau.

Unvollständiger kantonaler Datensatz beim Ackerland (Methode 1)

Methode 1 (siehe Kapitel 3.5) liefert die besten Resultate bei der Ausscheidung des Ackerlandes. Sofern die kantonalen Datensätze vollständig sind, wird die reale Ackerfläche abgebildet. Es entstehen keine Probleme bei Verschneidungen mit der LN der Feldblockkarte. Auf Luftbildern sind aber offensichtlich einige Flächen erkennbar, die mit grösster Wahrscheinlichkeit Ackerflächen sind, aber nicht als solche ausgeschieden wurden. Hierbei könnte es sich um Ackerflächen handeln, die nicht irgendwelchen Direktzahlungen unterstehen. Die kantonalen Stellen erfassen nur Flächen, die Direktzahlungen erhalten. Weiterhin können solche Flächen auch im Besitz ausserkantonaler Betriebe sein. Jeder Kanton erfasst nur die Flächen von den Betrieben, die im jeweiligen Kanton Direktzahlungen erhalten. Leider liegen exakte Daten zur Ackerfläche nur für 16 Kantone mit rund 159‘820 ha (= knapp 39 % der Ackerfläche der Schweiz) vor. Ein Beispiel für Methode 1 zeigt Abbildung 29. Auf dem Luftbild im Zentrum sind einige Flächen erkennbar, die nicht erfasst wurden. Dies könnten Ackerflächen sein, die einem anderen Kanton (z. B. FR) zugeordnet sind. Ausserkantonale Flächen wurden aufgrund der hohen Rechendauer nicht zusätzlich extrahiert. Es liegen aber mit dem verwendeten Datenstand nicht viele Ackerflächen in ausserkantonalen Bereichen.

Abbildung 29: Potentielles Erosionsrisiko für Ackerland ERK2 2019 (korrigiert) [t ha^{-1} a^{-1}] mit parzellenscharfen Daten (Methode 1) im Kanton VD (links). Rechts der gleiche Ausschnitt mit den zur Verfügung gestellten kantonalen Daten (grüne Flächen = Dauergrünland, braune Flächen = Ackerland); violette Linie Kantonsgrenze zu FR.

Die Daten des Kantons Wallis weisen noch einige Schwächen auf, was anhand Abbildung 30 zu erkennen ist. Es gibt eigenartige verschachtelte Polygone, welche teilweise von Ackerland umgebenes Grasland darstellen. Ebenfalls stimmen die Dimensionen nicht, was das hinterlegte Luftbild bestätigt. Das Problem wurde dem Kanton schon vom BLW mitgeteilt, es liegen zur Zeit aber keine besseren Daten vor.

a) b)

Abbildung 30: Kantonale Daten des Kantons VS a) grün= Grasland, violett= Ackerland und orange= Ackerland Kanton VD; b) kantonale Daten VS (rot) mit Swissimage hinterlegt.

Verschneidungsprobleme (Methode 2)

Methode 2 (siehe Kapitel 3.5) führt zu diversen Verschneidungsproblemen mit der LN der Feldblockkarte. Die aus dem TLM3D abgeleitete LN der Feldblockkarte ist häufig nicht deckungsgleich mit der LN aus den kantonalen Parzellen-Datensätzen. Dadurch entstehen diverse „Restflächen“, die in der ERK2 2019 als Ackerfläche abgebildet sind, aber andere Nutzungen beinhalten. Beispiele für solche Verschneidungsprobleme sind diverse kleine Flächen entlang von Strassen, Siedlungen, Wäldern etc. (Beispiel siehe Abbildung 31).

Alle Flächen, die in der Feldblockkarte als landwirtschaftliche Nutzungsfläche (LN), in den kantonalen Daten aber nicht als LN klassiert wurden, bleiben als Ackerflächen in der ERK2 2019 bei Methode 2 vorhanden. Beispiele hierfür sind Golfplätze, Kiesgruben, Schrebergartenareal oder nicht erfasstes Dauergrünland (Beispiele siehe Abbildung 32, Abbildung 33, Abbildung 34). Teilweise sind diese Daten im TLM3D aufgeführt, wurden aber aufgrund des langandauernden Extraktionsprozesses nicht von der LN entfernt.

Somit ist die abgebildete Ackerfläche in der ERK2 2019 in den Kantonen nach Methode 2 etwas zu gross und umfasst auch Flächen mit anderer Nutzung. Diese Flächen sind aber in der Regel einfach zu identifizieren. Sie sind relativ klein und haben für Ackerflächen untypische Formen. Durch Hinterlegung eines Luftbildes sind diese Flächen ebenfalls einfach zu identifizieren.

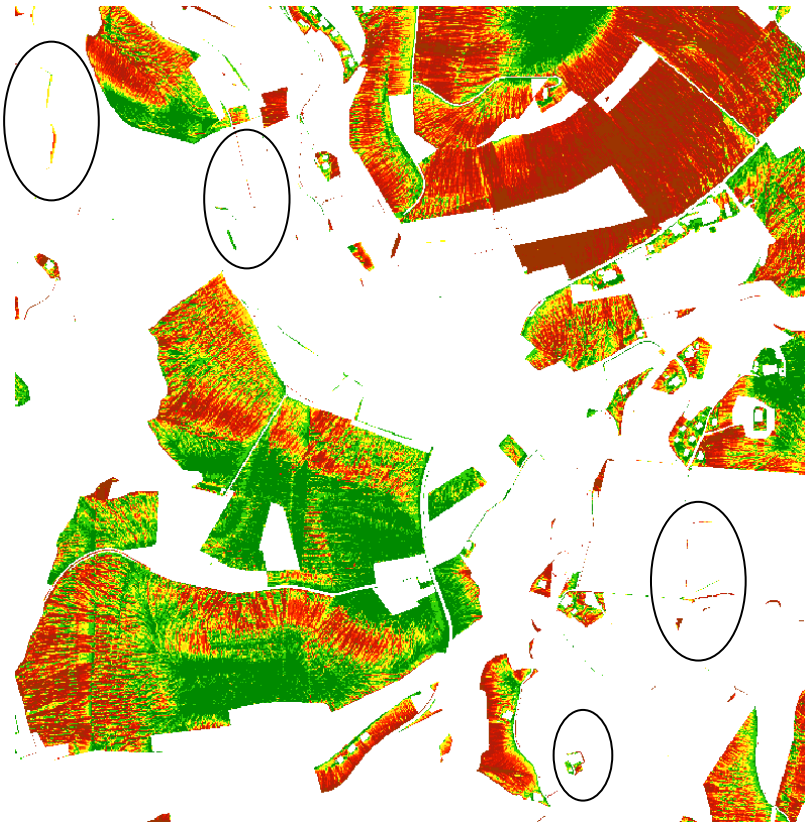


Abbildung 31: Potentielles Erosionsrisiko [t ha^{-1} a^{-1}] korrigiert mit parzellenscharfen Daten (Methode 2) jedoch mit Verschneidungsartefakten (hervorgehoben mit schwarzer Umrandung) im Kanton Bern.

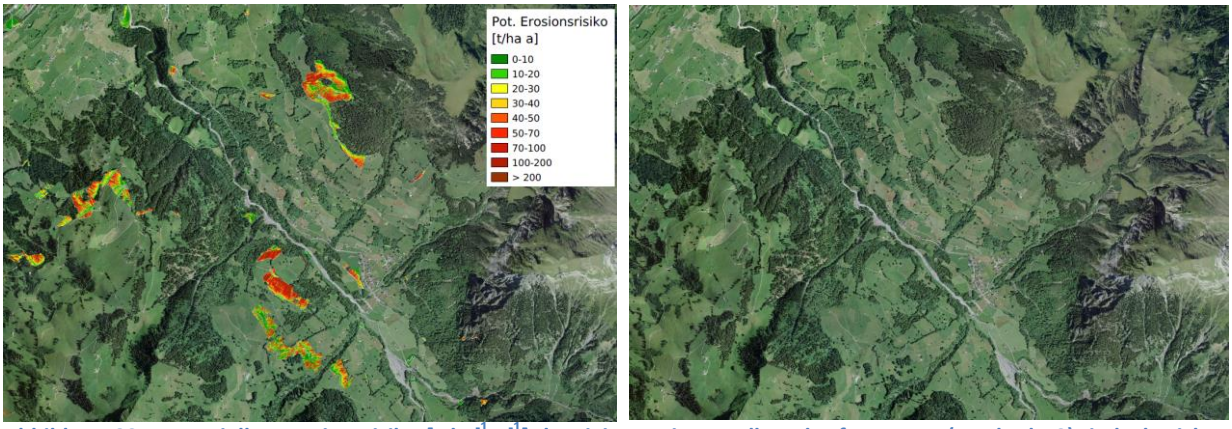


Abbildung 32: Potentielles Erosionsrisiko [t ha^{-1} a^{-1}], korrigiert, mit parzellenscharfen Daten (Methode 2), jedoch nicht komplett erfasstem Dauergrünland im Kanton Bern.

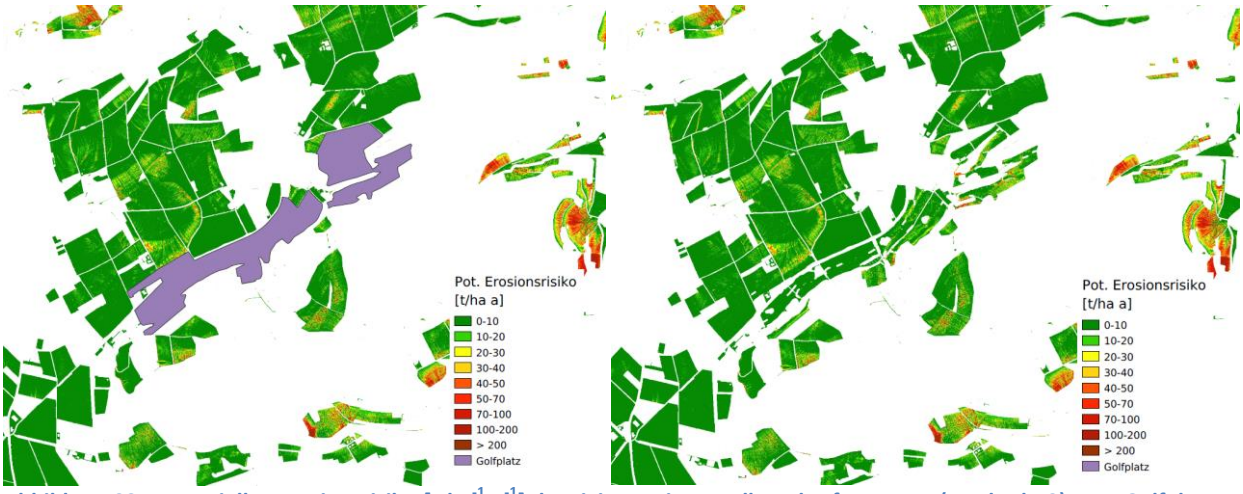


Abbildung 33: Potentielles Erosionsrisiko [t ha^{-1} a^{-1}], korrigiert, mit parzellenscharfen Daten (Methode 2). Der Golfplatz (violett) in Solothurn wurde in der Feldblockkarte als LN erfasst, bei den kantonalen Parzellendaten aber nicht. Entsprechend bleibt er als «Restfläche» und wird als Ackerfläche klassiert mit einem Erosionsrisiko abgebildet.

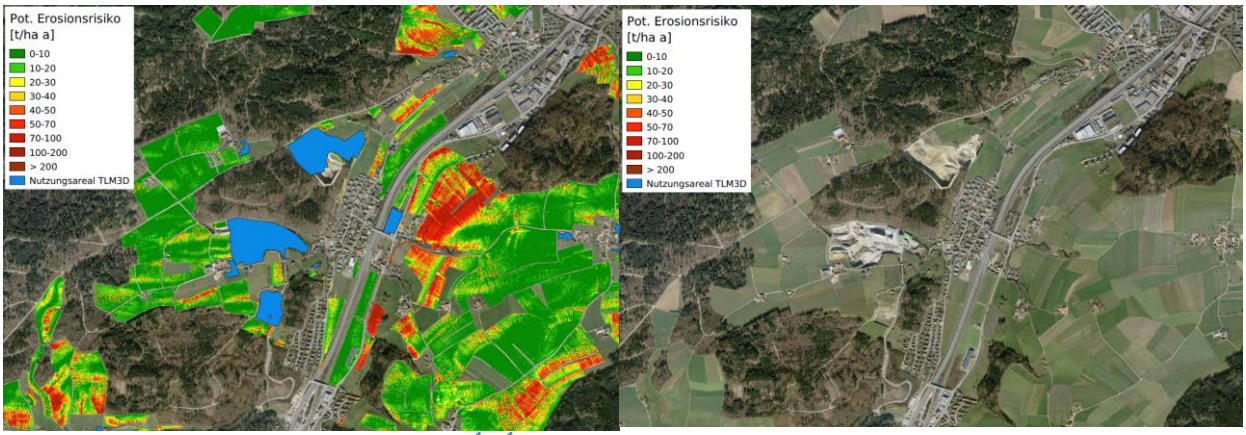


Abbildung 34: Potentielles Erosionsrisiko [t ha^{-1} a^{-1}], korrigiert, mit parzellenscharfen Daten (Methode 2). Die Kiesgrube (blau) im Kanton Bern wurde in der Feldblockkarte als LN erfasst, bei den kantonalen Parzellendaten aber nicht. Entsprechend bleibt sie als «Restfläche» und wird als Ackerfläche klassiert mit einem Erosionsrisiko abgebildet.

Keine kantonalen Parzellendaten vorhanden (Methode 3)

Die dritte Methode (siehe Kapitel 3.5) der Dauergrünlandentfernung führt in den sieben verbliebenen Kantonen aufgrund der verwendeten Daten (Auflösung 300m) zu einer deutlich weniger präzisen und lückenhaften Ackerlandkarte. Bis die parzellenscharfen kantonalen Daten vorliegen (voraussichtlich 2020), ist diese provisorische Lösung aber der einzig praktikable Weg, das Ackerland zu erzeugen. Wie sich die unterschiedlichen Methoden auswirken, erkennt man an einem Ausschnitt zwischen Bern und Luzern. Es ergeben sich mehr Artefakte und grössere Lücken auf der Luzerner Seite (vergl. Abbildung 35, Abbildung 36, rechts und links). Einerseits werden auch viele Dauergrünlandflächen mit zum Teil hohem potentiellem Erosionsrisiko abgebildet, andererseits wurde verschiedene Ackerflächen ausgeschnitten, für die nun kein potentielles Erosionsrisiko mehr abgebildet wird. Wegen der grösseren Ungenauigkeiten und Unsicherheiten der Berechnung der Ackerflächen in diesen sieben Kantonen erfolgt auch keine statistische Auswertung der Daten für diese Kantone (siehe Tabelle 22). Sobald kantonale Daten vorliegen, sollten in diesen Kantonen Aktualisierungen vorgenommen werden.

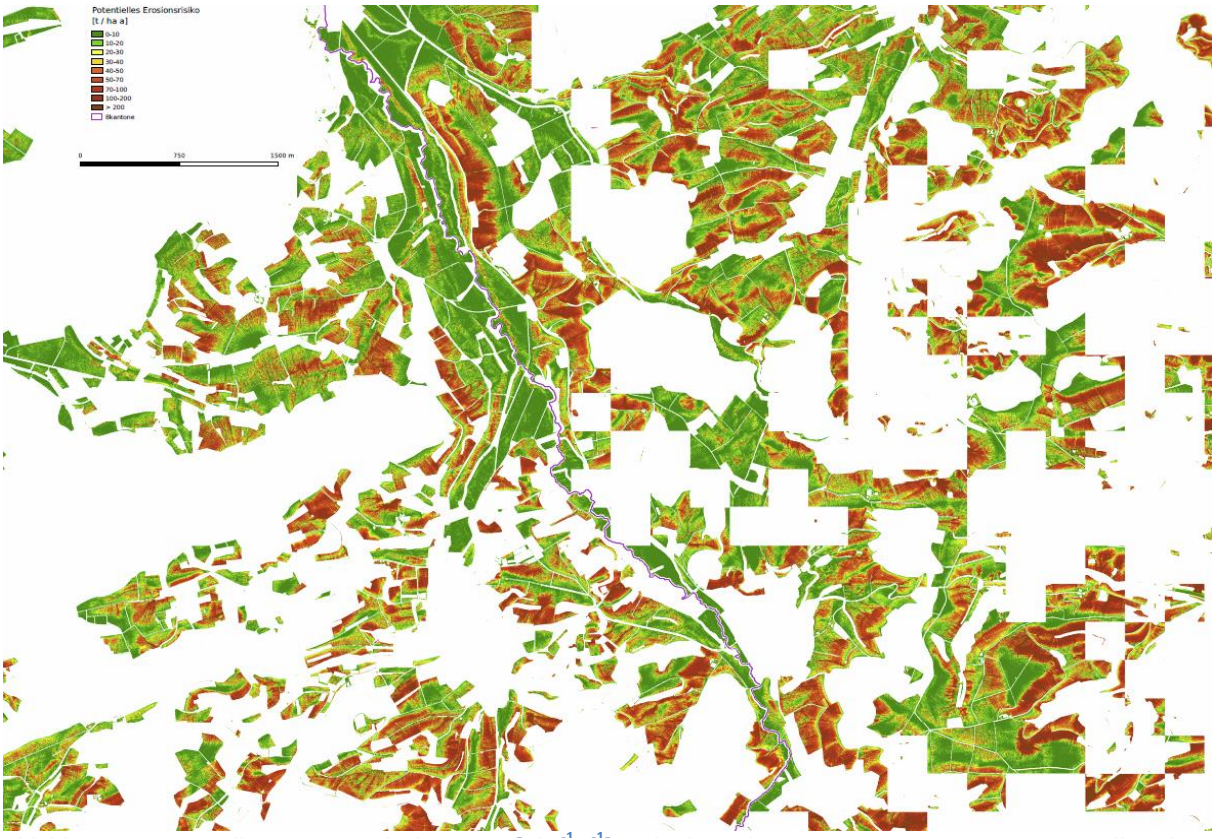


Abbildung 35: Potentielles Erosionsrisiko korrigiert [t ha^{-1} a^{-1}]; Links der violetten Kantonsgrenze Bern mit parzellenscharfen Daten (Methode 2) rechts davon Luzern nach Abzug des abgeschätzten Dauergrünlandes basierend auf Schmidt et al. (2019) (Methode 3).

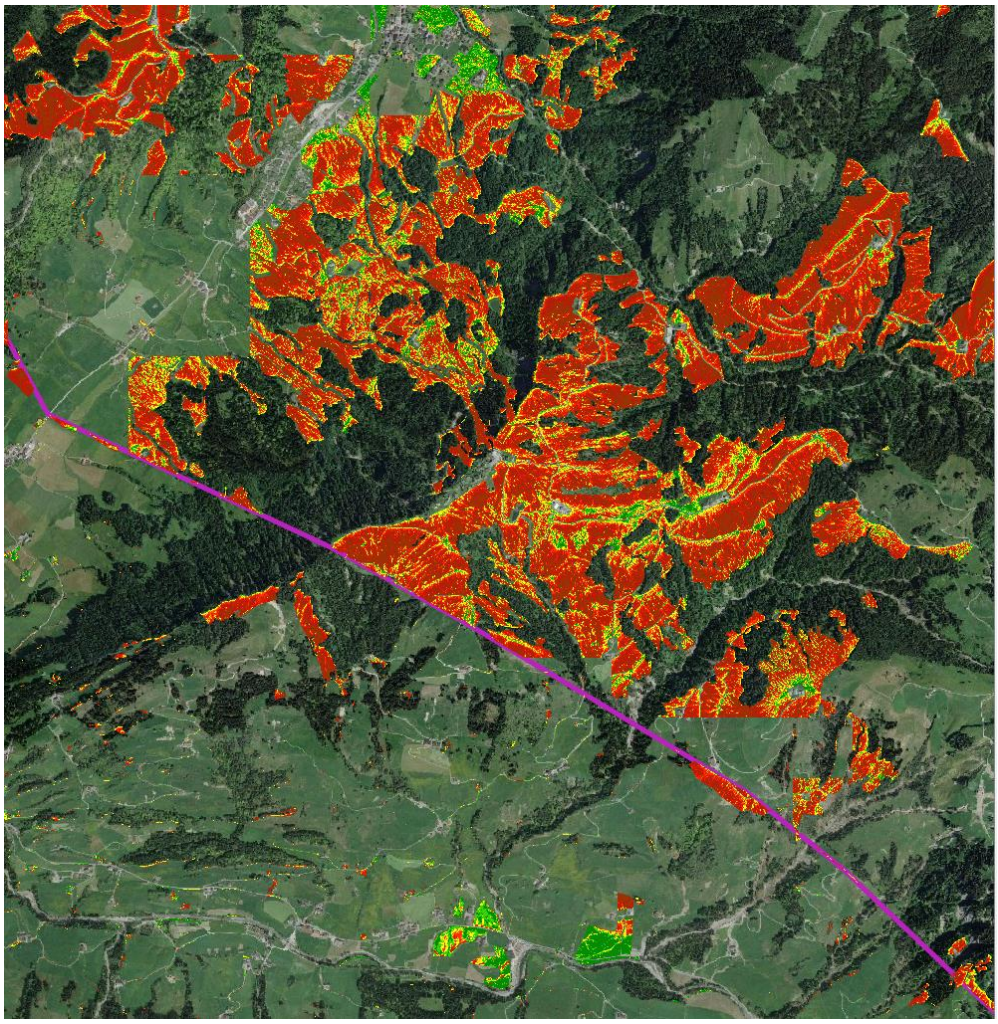


Abbildung 36: Potentielles Erosionsrisiko korrigiert [t ha^{-1} a^{-1}] mit parzellenscharfen Daten; Methode 2 mit nicht komplett erfasstem Dauergrünland südlich der violetten Kantonsgrenze; nördlich Methode 3 zwischen den Kantonen Bern und Luzern.

6. Web-Applikation zur Berechnung des aktuellen Erosionsrisikos

Es war im Projektrahmen nicht möglich, eine voll funktionierende Web-Applikation umzusetzen. Jedoch bietet der Prototyp erste Einsichten in den Aufwand und die Machbarkeit einer solchen Applikation. Der vorliegende Prototyp besteht aus zwei Teilen (Applikationen). Der eine Teil besteht aus einer Web-Oberfläche, von welcher Feldblockdaten heruntergeladen werden können und mittels Eingabe eines berechneten C-Faktors das aktuelle Erosionsrisiko berechnet werden kann (Version Alpha 0.2). Des Weiteren ist im Prototyp erst das Kartenblatt 1146 Lyss enthalten.

Mit dem zweiten Teil der Applikation kann man den C-Faktor berechnen. Details zu beispielhaften C-Faktoren und eine qualitative Überprüfung befinden sich in der Masterarbeit von Patrick Kupferschmied (Kupferschmied 2018). Eine Eingabeoberfläche ist bisher noch nicht entwickelt worden, ist aber aktuell in Planung und soll Mitte 2019 verfügbar sein.

Weitere Details zu den Applikationen können der Offline-Version entnommen werden. Momentan ist die Applikation von einer virtuellen Maschine ausführbar (VDI-file). Die Applikation zum Runterladen von Dateien und zur Berechnung des C-Faktors (als Python-Script) sind vorhanden. Weitere Details kann man beim Start der virtuellen Maschine entnehmen.

7. Schlussfolgerung und Ausblick

Die neue Erosionsrisikokarte ERK2 (2019) ist aktueller und genauer. „Kinderkrankheiten“ der ersten ERK2 (z.B. Probleme an Kachelgrenzen), wie sie Gisler et al. (2010) beschreiben, konnten behoben werden. Die ERK2 (2019) läuft auf aktueller GIS-Umgebung und kann daher anderen Nutzern zugänglich gemacht werden. Die vorgenommenen Korrekturen - basierend auf langjährigen Feldkartierungen in der Region Frienisberg - führen zu einer realistischeren Abbildung des potentiellen Erosionsrisikos. Die neue, korrigierte ERK2 (2019) erlaubt dadurch und mit der zukünftigen Web-Applikation, das aktuelle Erosionsrisiko zu berechnen. Die Erstellung der ERK2 (2019) ausschliesslich für das Ackerland konnte noch nicht komplett realisiert werden. Die Separierung von Acker- und Dauergrünland ist bisher noch nicht in allen Kantonen möglich, da die Datenverfügbarkeit erst Ende 2019 oder 2020 gesamtschweizerisch gewährleistet ist. Für 19 Kantone konnte die Ackerlandkarte parzellenscharf umgesetzt werden. Sobald für die restlichen 7 Kantone parzellenscharfe Daten vorliegen, sollte eine Aktualisierung der ERK2 2019 für diese Kantone durchgeführt werden.

Mit diesem Bericht wird das Projekt mit dem Titel: „Entwicklung eines C-Faktortools für die Massnahmenplanung als Ergänzung zur neuen Erosionsrisikokarte (ERK2)“, abgeschlossen. Eine umfassende Beschreibung des C-Faktortools findet sich in Kupferschmied (2018). Die Alphaversion der Web-Applikation zur Berechnung des aktuellen Erosionsrisikos ist momentan in Entwicklung, das Tool steht als virtuelle Maschine zur Verfügung (Kupferschmied 2018). Eine Eingabemaske zur Berechnung des C-Faktors wird derzeit entwickelt.

Referenzen

BAFU und BLW (2013): Bodenschutz in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Bundesamt für Umwelt und Bundesamt für Landwirtschaft, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1313: 59 S.

Bircher P., Liniger H., Prasuhn, V. (2019a) : Comparison of different multiple flow algorithms for RUSLE slope-lenght factor (L) and slope steepness factor (S) calculation in Switzerland. Geomorphology, (revision submitted)

Bircher P., Liniger H., Prasuhn, V. (2019b).: Calibration and validation of RUSLE-approach on 203 parcels in a Swiss midland region with a long term field mapping study from 1997 till 2007. (in preparation).

Desmet, P. J. J., and G. Govers (1996). “A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units” Journal of Soil and Water Conservation 51(5):427-433.

Foster, G.R., L.D. Meyer, and C.A. Onstad. (1977). A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. Trans. ASAE 20:683-687.

Friedli, S. (2006): Digitale Bodenerosionsgefährdungskarte der Schweiz im Hektarraster – Unter besonderer Berücksichtigung des Ackerlandes; Masterarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern

Gisler S, H.P. Liniger, and V. Prasuhn. (2010) Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Erosionsrisikokarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz im 2x2-Meter-Raster (ERK2). Bern: Centre for Development and Environment (CDE).

Gisler, S., Liniger H. and Prasuhn V (2011). “Erosionsrisikokarte im 2x2-Meter-Raster (ERK2).” Agrarforschung Schweiz 2, no. 4: 148–55.

Hammad, A. Abu, H. Lundekvam, and T. Børresen (2004) “Adaptation of RUSLE in the Eastern Part of the Mediterranean Region.” Environmental Management 34, no. 6: 829–41. https://doi.org/10.1007/s00267-003-0296-7.

Hänni N. (2017): Studie zur Nutzung der Schweizerischen Erosionsrisikokarte in der Praxis. Abteilung Integrative Geographie, Geographisches Institut Universität Bern. Bachelorarbeit

Joss. L. und Prasuhn, V. (2019): Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Erneuerung der Gewässeranschlusskarte (GAK2). Agroscope. Zürich.

Klik A. and A.S. Zartl. (2001) “Comparison of Soil Erosion Simulations Using WEPP and RUSLE with Field Measurements.” American Society of Agricultural and Biological Engineers. https://doi.org/10.13031/2013.3278.

Kupferschmied, P. (2018): Konzeptionierung und Operationalisierung einer aktuellen und schweizweit verwendbaren Berechnungsweise des USLE C-Faktors. Schaffung der inhaltlichen und technischen Grundlagen zur individuellen Integration des C-Faktors in die Erosionsrisikokarte der Schweiz. Geographisches Institut. Abteilung Integrative Geographie. Universität Bern. Masterarbeit.

McCool, D.K., G.R Foster, C.K. Mutchler, and L.D. Meyer. (1989). Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. Trans. ASAE 32:1571-1576.

McCool, D.K., L.C. Brown, G.R Foster, et al. (1987). Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. Trans. ASAE 30:1387-1396.

Meusburger, K., A. Steel, P. Panagos, L. Montanarella, and C. Alewell (2012) “Spatial and Temporal Variability of Rainfall Erosivity Factor for Switzerland.” Hydrology and Earth System Sciences 16, no. 1: 167–77. doi:10.5194/hess-16-167-2012.

Mitas, L., and Mitasova, H. (1998) Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. Water Resources Research 34(3), 505-516

MITASOVA H, HOFIERKA J., ZLOCHA M., IVERSON L.R. (1996) Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. International Journal of GIS v. 10, no. 5, p.629-641

MOSIMANN, TH. & RÜTTIMANN, M. (1999). Bodenerosion selber abschätzen - Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater; Ackerbaugebiete des zentralen Mittellandes. Hrsg.: Finanzdepartement Aargau; Abteilung Landwirtschaft, Abteilung Umwelt und Landwirtschaft des Kantons Bern, Militär-, Polizei- und Umweltdepartement des Kantons Luzern; Amt für Umweltschutz, Volkswirtschaftsdepartement des Kantons Luzern; Landwirtschaftsamt, Amt für Umweltschutz und Amt für Landwirtschaft des Kantons Solothurn.

MOSIMANN, TH. & RÜTTIMANN, M. (2002). Erosion CH V2.02 : Bodenerosion selber abschätzen – Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater. Terragon Ecoexperts AG. Bubendorf

Nogler, S. (2012): Erosivität der Niederschläge im schweizerischen Mittelland; Masterarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern

Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. (2012) "European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements"; Land Use Policy, 29 (2), pp. 329-338. doi:10.1016/j.landusepol.2011.07.003

Panagos, Panos, Pasquale Borrelli, and Katrin Meusburger. (2015) "A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water." Geosciences 5, no. 2: 117–26. https://doi.org/10.3390/geosciences5020117. [a]

Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., Alewell, .C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*. **54**: 438-447. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.08.012 [b]

Panagos, P., Borrelli, P., Robinson, D.A. (2015) Common Agricultural Policy: Tackling soil loss across Europe. Nature 526, 195, doi:10.1038/526195d [c]

Prasuhn V. (2010) Zeitliche Variabilität von Bodenerosion - Analyse von 10 Jahren Erosionsschadenskartierungen im Schweizer Mittelland. Die Bodenkultur. 61, (2), 47-57.

Prasuhn, V. (2011) "Soil Erosion in the Swiss Midlands: Results of a 10-Year Field Survey." Geomorphology 126, no. 1–2: 32–41. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.023.

Prasuhn V (2012). On-farm effects of tillage and crops on soil erosion measured over 10 years in Switzerland. Soil & Tillage Research. 120, 137-146.

Prasuhn, V., Blaser, S. (2018). Der Agrarumweltindikator «Erosionsrisiko». Bulletin BGS 39, 11-18.

Prasuhn, V., H.P. Liniger, S. Gisler, K. Herweg, A. Candinas, and J.-P. Clément. (2013) "A High-Resolution Soil Erosion Risk Map of Switzerland as Strategic Policy Support System." Land Use Policy 32: 281–91. doi:10.1016/j.landusepol.2012.11.006.

Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K. and Yoder D.C. (1997): Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Draft August (USA) (US Department of Agriculture). (= Agriculture Handbook. 703).

Rymszewicz, A., E. Mockler, J. O'Sullivan, M. Bruen, J. Turner, E. Conroy, M. Kelly-Quinn, J. Harrington, and D. Lawler. (2015) "Assessing the Applicability of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) to Irish Catchments." Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences 367: 99–105. https://doi.org/10.5194/piahs-367-99-2015.

Schäuble, H. (2005) "Erosionsprognosen Mit GIS Und EDV-Ein Vergleich Verschiedener Bewertungskonzepte Am Beispiel Einer Gäulandschaft". http://w210.ub.uni-tuebingen.de/volltexte/2005/1904/.

Schelbert F. (2016). Entwicklung einer GIS-basierten Methode zur Digitalisierung von Erosionsschadenkartierungen im Gebiet Frienisberg (BE). Geographisches Institut, Centre for Development and Environment (CDE). Universität Bern. Masterarbeit.

Schmidt, J. (1991): A mathematical Model to Simulate Rainfall Erosion. Catena Supplement 19, pp. 101-109.

Schmidt, J, M.v Werner, and A Michael. (1999) “Application of the EROSION 3D Model to the CATSOP Watershed, The Netherlands.” CATENA 37, no. 3–4: 449–56. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00032-6.

Schmidt, S., Alewell, C., Panagos, P., and Meusburger, K. (2016): Regionalization of monthly rainfall erosivity patterns in Switzerland, Hydrol. Earth Syst. Sci., 20, 4359-4373, https://doi.org/10.5194/hess-20-4359-2016.

Schmidt, S., Tresch, S., Meusburger, K.: Modification of the RUSLE Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for steep alpine slopes. MethodsX, in prep.

Schmidt, S., Alewell, C., and Meusburger, K. (2018): Mapping spatio-temporal dynamics of the cover and management factor (C-factor) fpr gasslands in Switzerland, Remote Sensing of Environment 211, 89-104.

Seibert, J., and B. L. McGlynn. (2007) “A New Triangular Multiple Flow Direction Algorithm for Computing Upslope Areas from Gridded Digital Elevation Models.” Water Resources Research 43, no. 4: n/a-n/a. doi:10.1029/2006WR005128.

Smith, D. D. and W. H. Wischmeier, W. H. (1957). Factors affecting sheet and rill erosion. American Geophysical Union Transactions 38:889-896.

Wischmeier W. H. & SMITH D. D. (1978): Predicting Rainfall Erosion Losses – a Guide to Conservation Planning. U.S. Dep. of Agriculture, Handbook No. 537. Washington.

Zevenbergen, L. W., and C. R. Thorne. (1987) “Quantitative Analysis of Land Surface Topography.” Earth Surface Processes and Landforms 12, no. 1: 47–56. doi:10.1002/esp.3290120107.

Datengrundlagen:

Amtliche Vermessung Bern Metadaten und Produkteinformation (2014):
AVR: Reduzierte Daten der amtlichen Vermessung, basierend auf DM.01-AV-BE:
URL: http://files.be.ch/bve/agi/geoportal/geo/lpi/AVR_2011_03_LANG_DE.PDF

BLW (2016): Landwirtschaftliche Zonengrenzen: Minimale Geodatenmodelle Landwirtschaftliche Bewirtschaftung
URL: https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/politik/datenmanagement/geografisches-informationssystem-gis.html

European Soil Data Centre (ESDAC), esdac.jrc.ec.europa.eu, European Commission, Joint Research Centre

LANDKULT (2016): Landwirtschaftliche Kulturen des Kantons Bern © Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern, Abteilung Direktzahlungen

Swisstopo (2015): SwissALTI3D
URL: http://www.swisstopo.admin.ch

Swisstopo (2015): SwissTLM3D
URL: http://www.swisstopo.admin.ch

Anhang

Auf den nachfolgenden Seiten befinden sich die sechs wichtigsten Karten zur besseren visuellen Darstellung in grösserer Form.

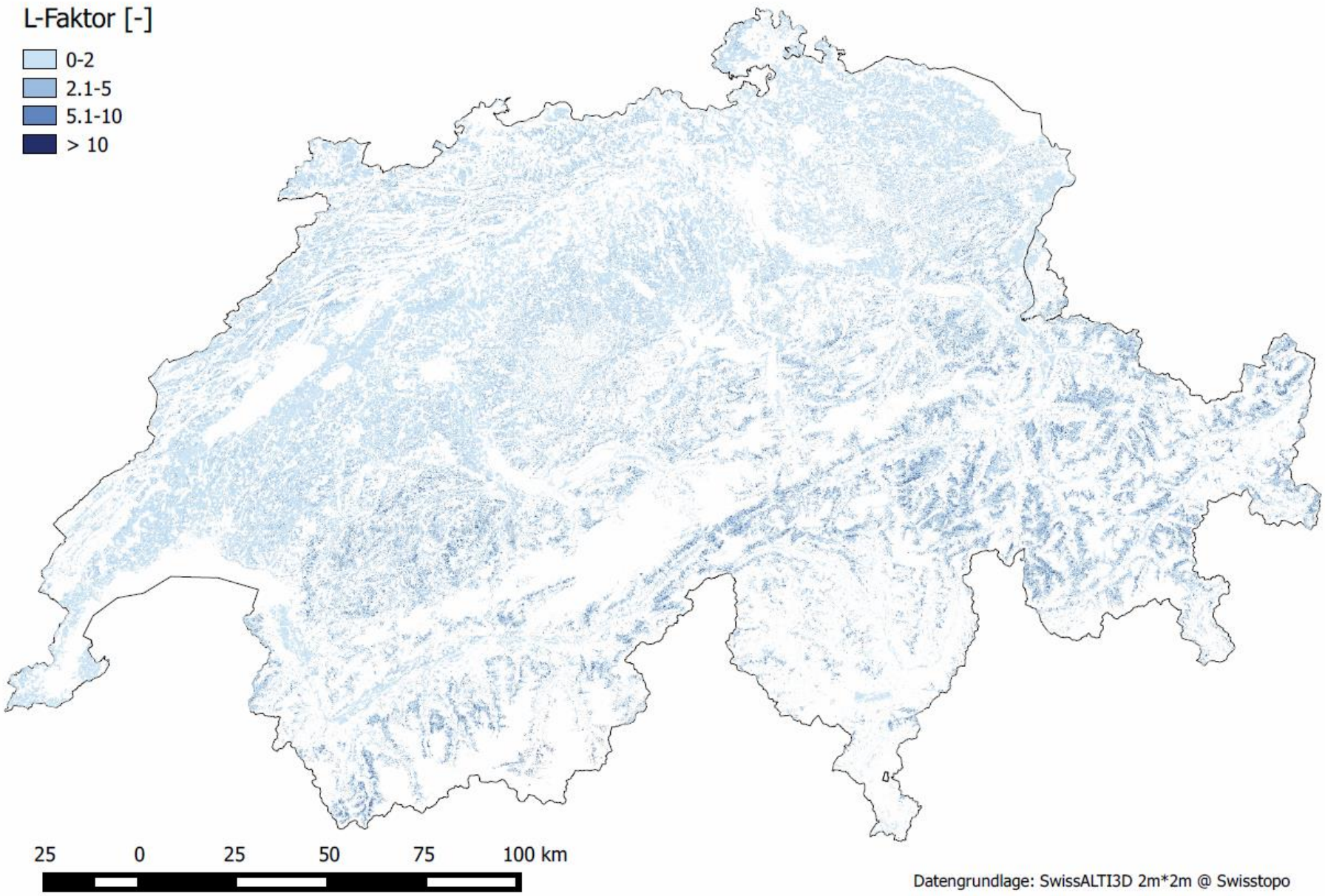


Abbildung : Fliessweg L-Faktor-Karte [-] der LN der Schweiz und dem Fürstentum Liechtenstein, berechnet mit MTFD 1.1 und 0.5 m gefülltem DEM (inklusive Dauergrünlandflächen mit Sömmerungsgebiet)

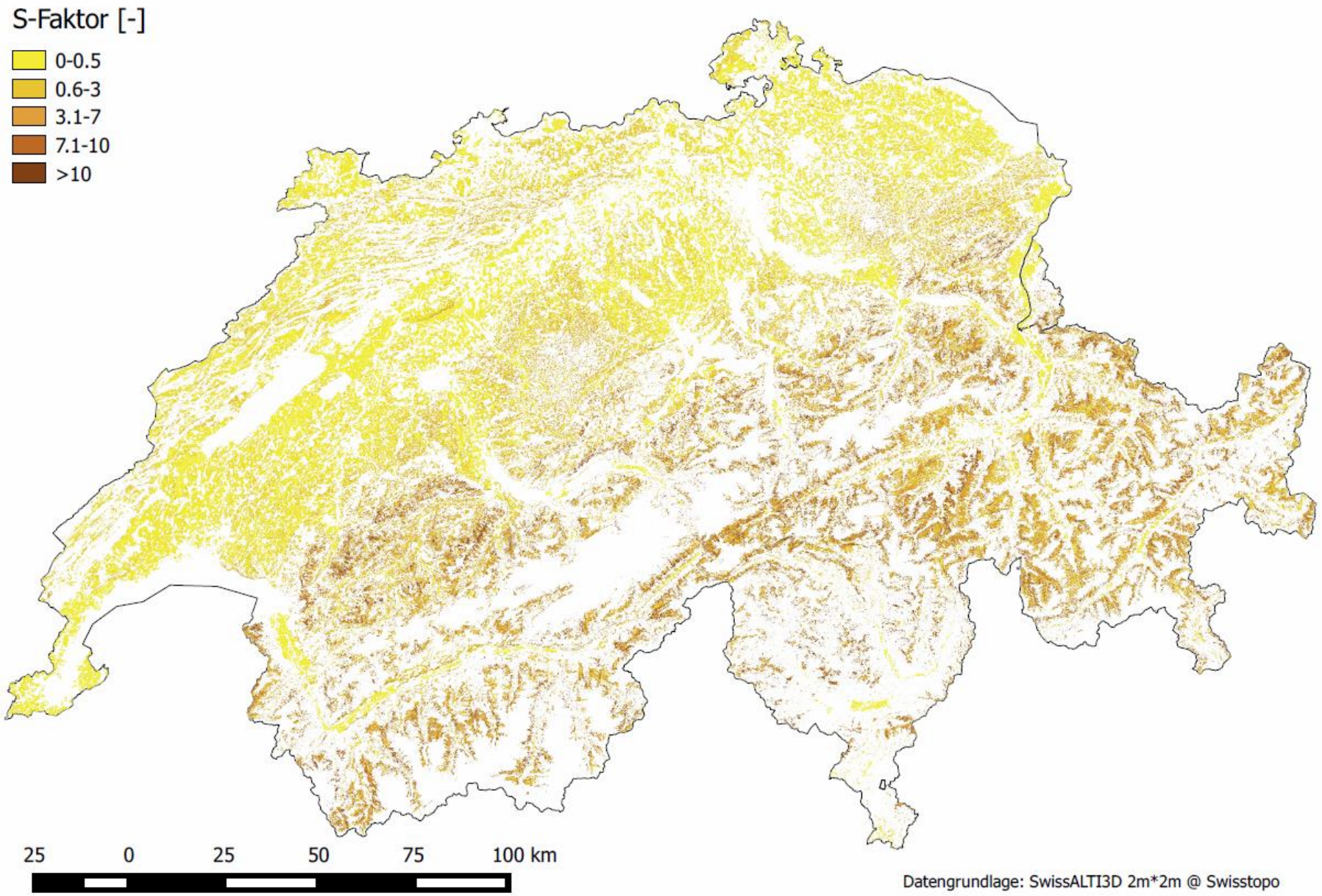


Abbildung Hangneigung S-Faktor-Karte [-] der LN der Schweiz und dem Fürstentum Liechtenstein, inklusive Dauergrünlandflächen mit Sömmerungsgebiet.

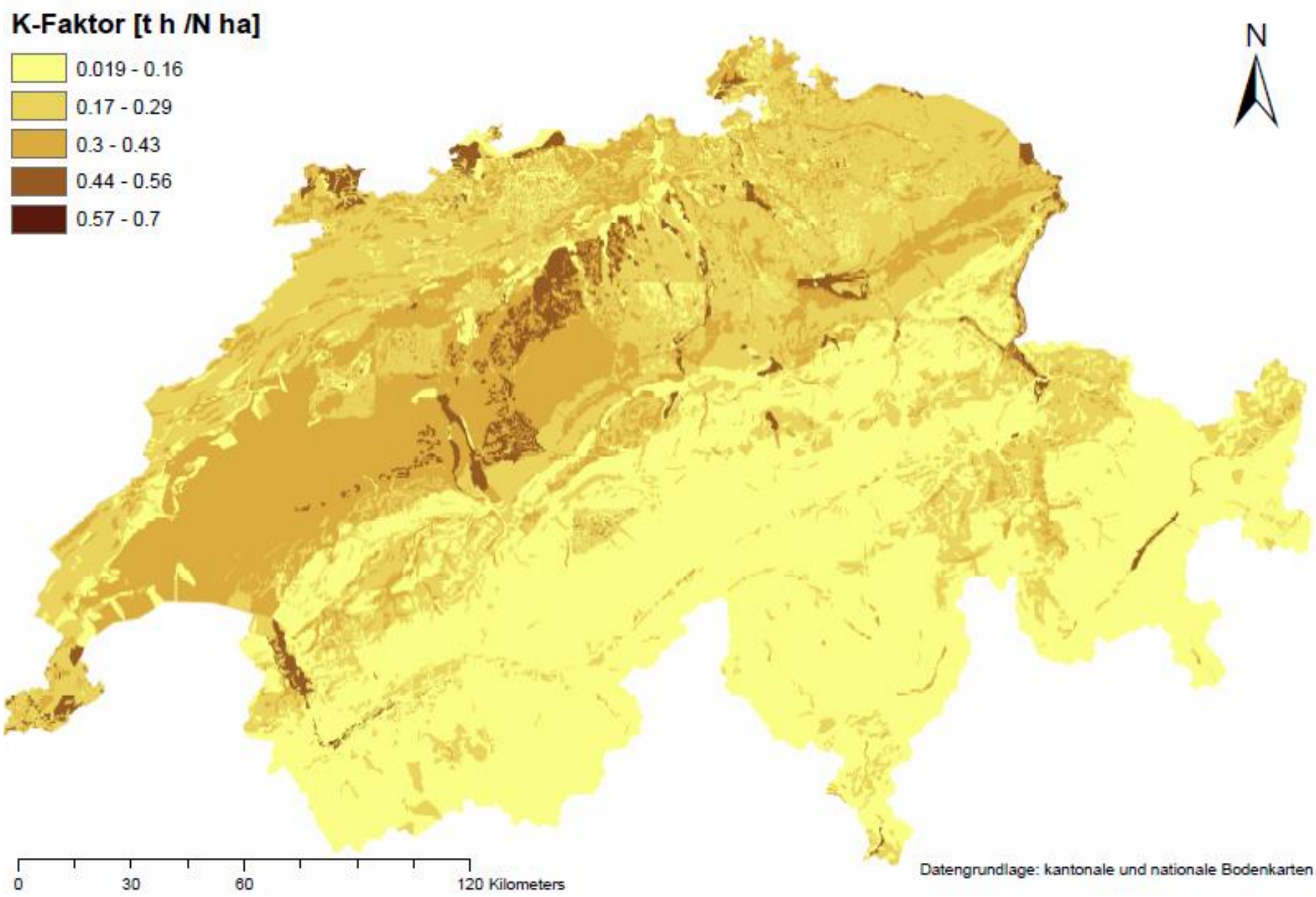


Abbildung Erodibilität K-Faktor-Karte [t h N^{-1} ha^{-1}] der gesamten Schweiz.

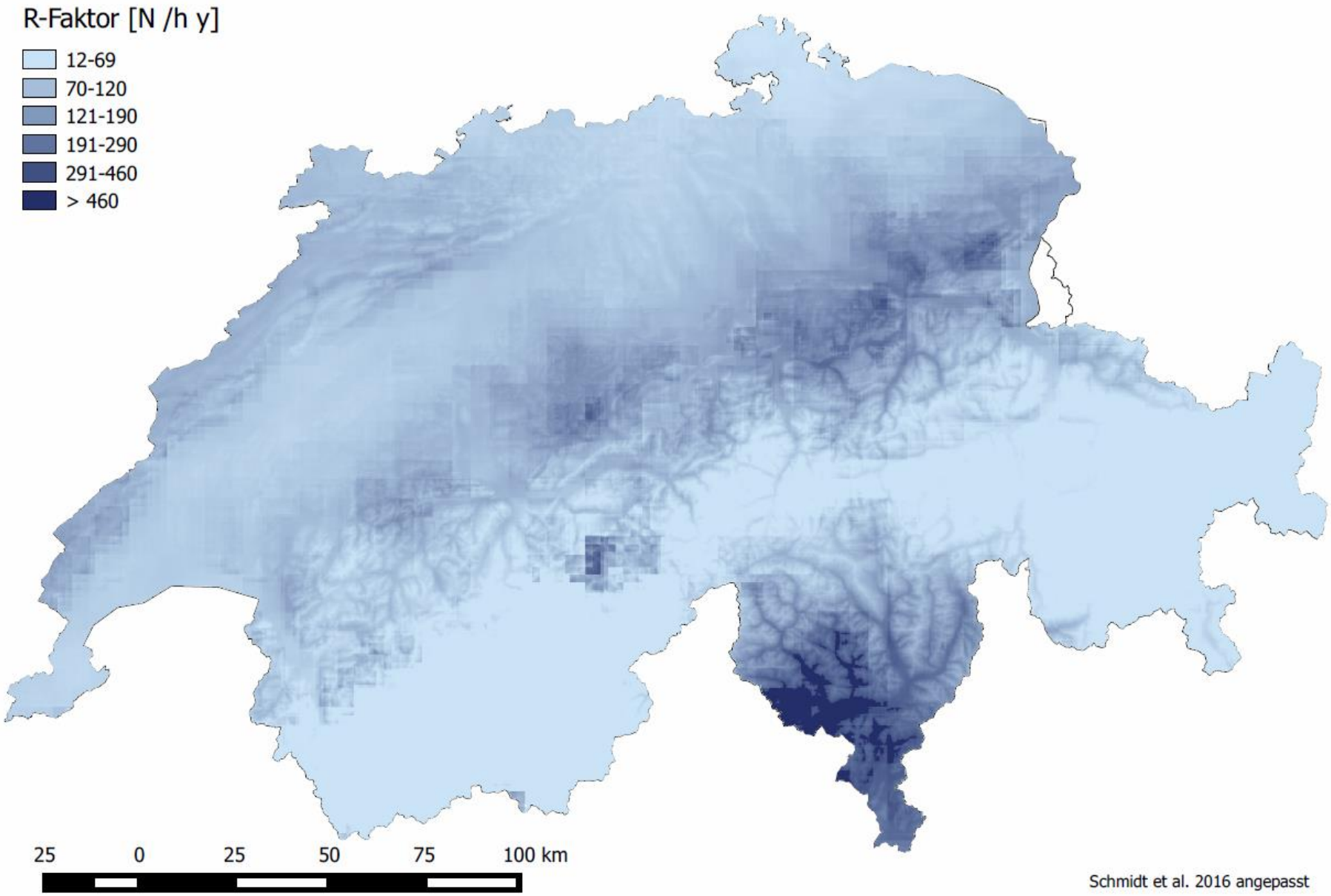


Abbildung Erosivität R-Faktor-Karte der gesamten Schweiz [N h^{-1} a^{-1}] (Schmidt et al. 2016)

Abbildung Karte des potentiellen Erosionsrisikos (unkorrigiert) der LN der Schweiz [t ha^{-1} a^{-1}] der neuen ERK2 (2019), inklusive Dauergrünlandflächen mit Sömmerungsgebiet; gleiche Klassen wie bei ERK2 2010.

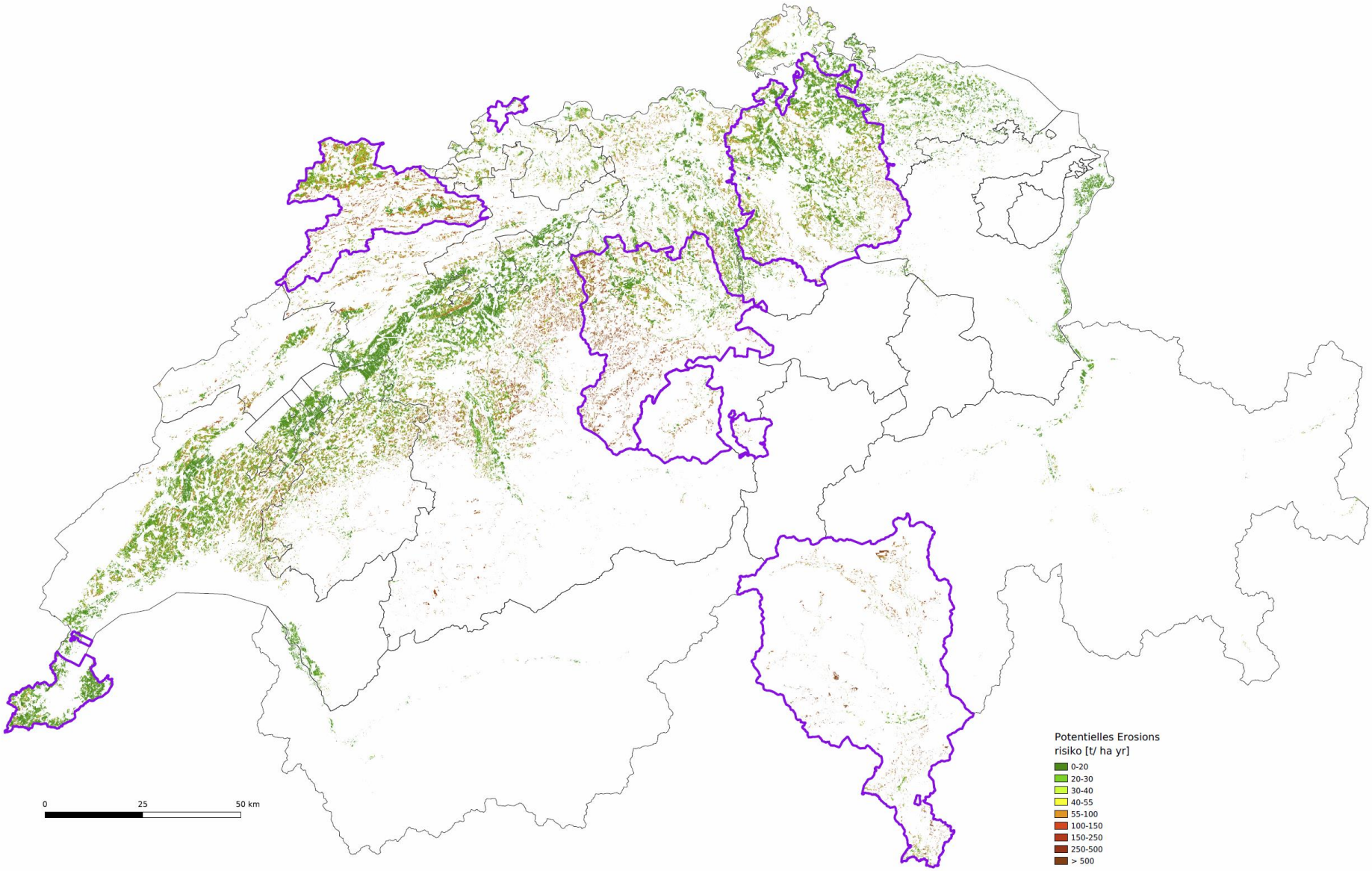


Abbildung Potentielles Erosionsrisiko (unkorrigiert) für das Ackerland der Schweiz [t ha^{-1} a^{-1}] und verwendete kantonale Daten der Schweiz; violett umrandet; restliche 7 Kantone ohne parzellenscharfe Ackerlanddaten, stattdessen mit Satellitenbildern abgeschätzt.

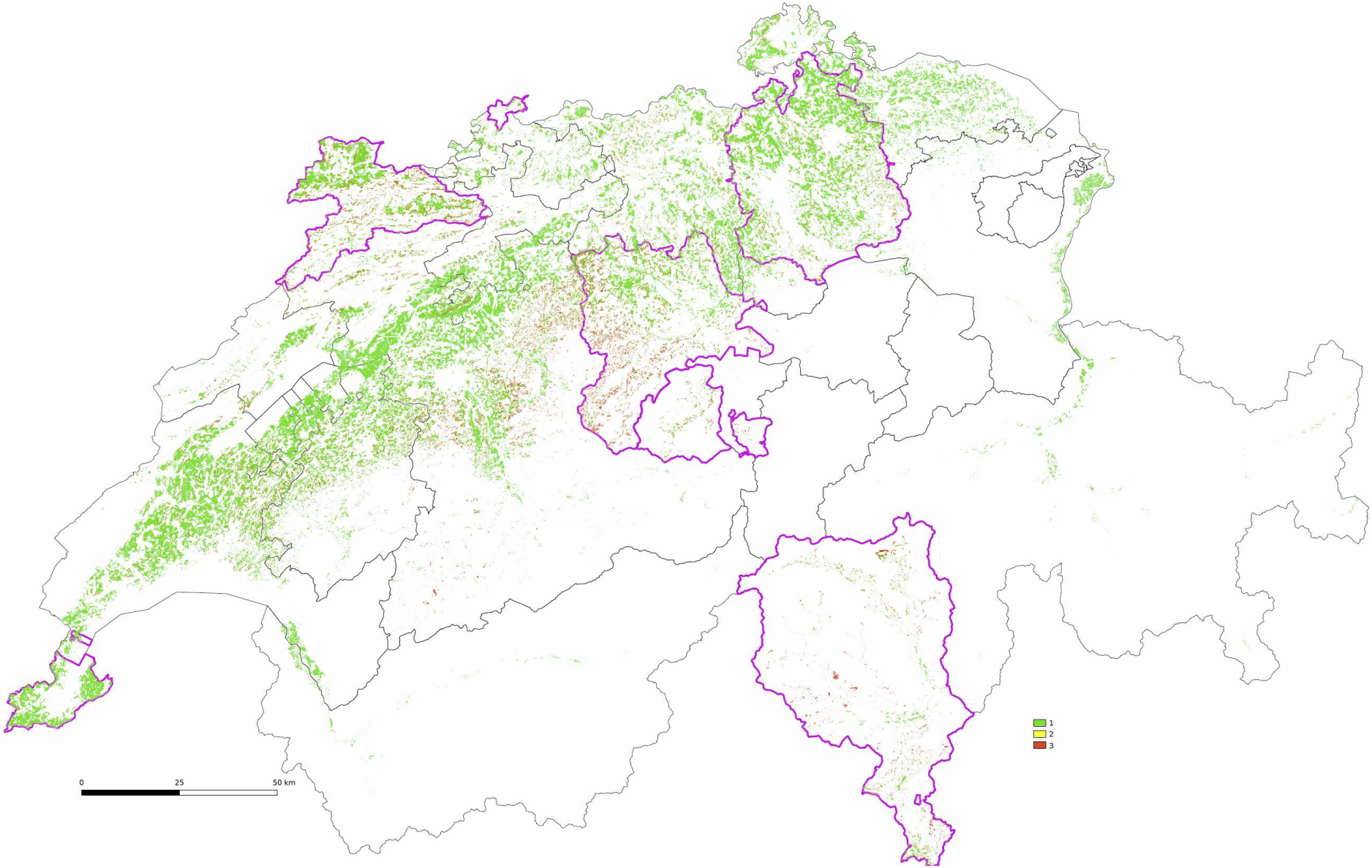


Abbildung Neue Potentielle Erosionsrisikokarte ERK2 2019 des Schweizer Ackerlandes, korrigiert, mit 3-Klassenlegende für grün = geringes potentielles Erosionsrisiko, gelb = mässiges potentielles Erosionsrisiko und rot = hohes potentielles Erosionsrisiko.

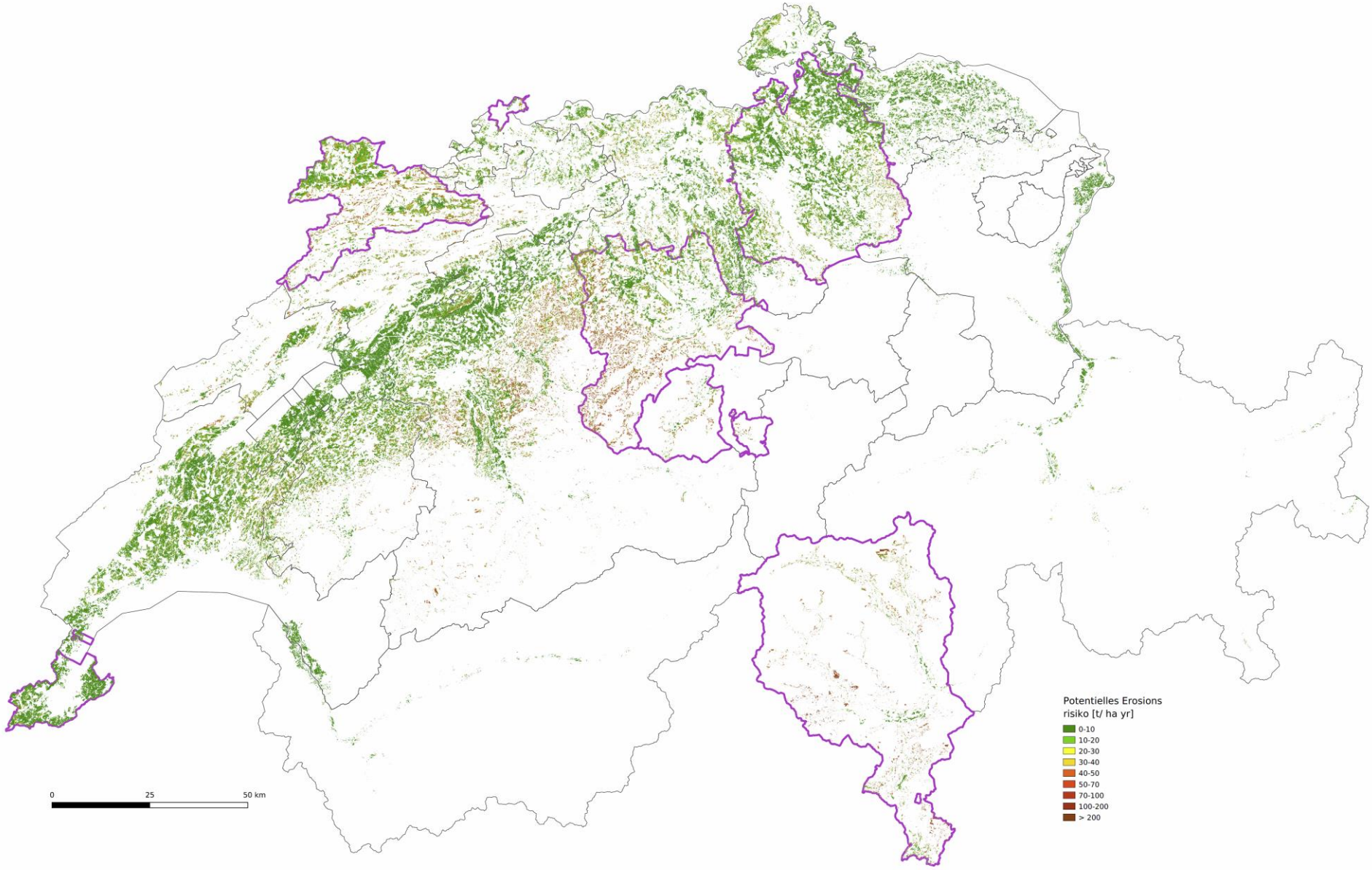


Abbildung Neue Potentielle Erosionsrisikokarte ERK2 2019 des Schweizer Ackerlandes korrigiert mit 9 Klassenlegende.