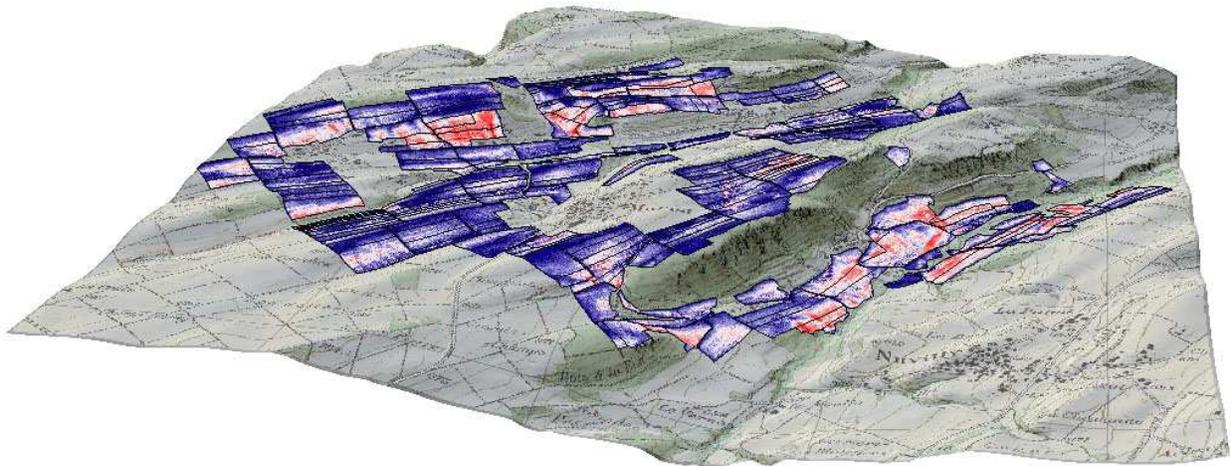


Analyse der Bodenerosion mit der AVErosion- Extension für ArcView

Diplomarbeit

der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Bern



vorgelegt von
Michael Chisholm

2008

Leiter der Arbeit:
Prof. Dr. Hans Hurni
Dr. Volker Prasuhn

Geographisches Institut der Universität Bern
Centre for Development and Environment (CDE)

Titelblatt: Bodenerosionsgefährdung im Untersuchungsgebiet Estavayer, dreidimensionale Darstellung; mit schattiertem Relief, 2-fach überhöht (Basis DTM-AV, swisstopo) und Landeskarte (Basis Swiss-Map25, swisstopo) hinterlegt.

Betreuung: Dr. Volker Prasuhn (Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART))
Thomas Ledermann (Geographisches Institut, Centre for Development and Environment (CDE))
Dr. Hanspeter Liniger (Geographisches Institut, Centre for Development and Environment (CDE))
Prof. Dr. Hans Hurni ((Geographisches Institut, Centre for Development and Environment (CDE))

Copyright: © 2008 by CDE Uni Bern / Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

Layout durch Michael Chisholm

Druck durch Michael Chisholm am CDE Bern, Januar 2008



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschafts-
departement EVD
Forschungsanstalt
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART



Abstract

The aim of this thesis is to describe the application and evaluation of the AVErosion extension for ArcView 3.x. AVErosion is a GIS-Tool for assessing soil erosion that is still largely unused in Switzerland. The tool was developed at the University of Tübingen in Germany based on erosion prediction analyses by SCHÄUBLE (1999, 2005). AVErosion is available for downloading from the Internet free of charge (<http://www.terracs.de>).

AVErosion is based upon the Universal Soil Loss Equation (USLE) by WISCHMEIER & SMITH (1978). As an empirical model, USLE quantifies soil erosion based on the product of the erosion-relevant factors of precipitation (R), soil type (K), crop system (C), topography (L & S) and soil erosion management practices (P). AVErosion offers two versions of the model: the traditional USLE formula as well as the modified USLE (MUSLE87) by HENSEL & BORK (1988). The modification concerns the calculation of topographic factors. Whereas USLE only predicts soil erosion on a single slope, MUSLE87 is designed to make predictions for catchments. Both models require the same input data, which are the factors R, K, and C, a digital elevation model (DEM) for the determination of the factors L, S and P, as well as a layer defining the area or plots to be calculated. The output is a map indicating the long-time average risk of soil loss in tonnes per hectare and year [$t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]. For each calculation AVErosion produces two outputs in the form of raster grids: one map with the average soil loss in grid resolution and another map showing the average risk of soil erosion for each agricultural plot. In this thesis the tool was applied to three research areas in Switzerland: Estavayer in the Canton of Fribourg, and Oberaargau and Frienisberg in the Canton of Berne.

The DEM is required in order to calculate the topography-relevant factors L, S and P. Three DEMs were available in three different resolutions: the DHM100 (BFS) used by FRIEDLI (2006) with a resolution of 100x100m, the DHM25 (swisstopo) with a resolution of 25x25m and finally the DTM-AV (swisstopo) with an ultra-high resolution of 2x2m. Aside from the difference in quality, the DEM used also dictates the resolution of the final result. The R, K, and C factors used in this thesis have been taken from FRIEDLI (2006), who created a soil erosion map for Switzerland in a hectare resolution. Despite the fact that the factors from FRIEDLI (2006) are only available in a resolution of 100x100 metres, it makes sense to use them in all calculations made in this thesis since the erosion predictions made here can be directly compared to the previous calculation by FRIEDLI (2006). Moreover, by retaining these factors, we can evaluate the influence of the DEM on the soil erosion model.

Implementing USLE/MUSLE87 in different resolutions shows the major influence that topographic factors have on the result of the calculations. For the lower resolutions of 100x100m and 25x25m, both USLE and MUSLE87 predict a similar level of soil erosion. Conversely, the disparities at the 2x2m level are very clear. At the highest resolution, MUSLE87 predicts approximately twice the amount of soil erosion as USLE.

USLE predicts greater soil erosion on the 25m scale than on the 2m scale. However, the higher the resolution, the higher the rate of soil erosion predicted by MUSLE87, with around twice the amount of soil erosion predicted on the 2m-scale than on the 100m-scale.

Modelled using the DTM-AV, MUSLE87 depicts areas of high soil erosion risk with great accuracy when compared with photographs taken on the spot. This, however, applies only to the relative risk. At the time of publication there was insufficient field survey data available to verify the absolute erosion rates predicted by AVErosion.

Compared to USLE calculations by FRIEDLI (2006), AVErosion predicts more severe soil erosion. For the Estavayer research area AVErosion predicts an average soil loss of $3.6 \text{ t*ha}^{-1}\text{a}^{-1}$, compared to FRIEDLI's (2006) predicted $2 \text{ t*ha}^{-1}\text{a}^{-1}$. This is largely due to the calculation of slope length. Whereas FRIEDLI (2006) used a standard slope length of 100 meters, AVErosion obtains slope lengths from the DEM. This results in extremely long slopes, especially at low resolutions such as the DHM100 (BFS). Predictions of average soil loss per plot exist for the Frienisberg area, where PRASUHN & GRÜNIG (2001) have long been conducting active research. A comparison of their results with a high-resolution DTM-AV plot calculation using MUSLE87 shows a better concurrence of calculation results. The median for soil loss predicted by PRASUHN & GRÜNIG (2001) amounted to $2.45 \text{ t*ha}^{-1}\text{a}^{-1}$, while AVErosion modelling calculated a median of $2.96 \text{ t*ha}^{-1}\text{a}^{-1}$.

The conclusion is that AVErosion is a well-structured and practical tool for efficiently predicting long-term soil loss rates. The different resolutions of DEM show the major impact that topography has on erosion. Moreover, the high-resolution DTM-AV has demonstrated its potential for application in future geographical studies. The erosion maps drawn up as part of this thesis can help to identify and analyse plots at risk from soil erosion.

As mentioned, the absolute risk of soil erosion was not determined in this thesis. So far not taken into consideration is the actual land use factor C. In a next step the land use factors could be taken into consideration. Mapping projects determining C factors (among others) are in progress and their results and implementation into USLE/MUSLE87-Modelling will help allow comparing modelled results with the erosion mapping.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Anwendung und Beurteilung der AVErosion-Extension für ArcView 3.x. AVErosion ist bisher in der Schweiz noch weitgehend unbekannt. Dementsprechend gibt es hierzulande keine bekannten Modellierungen, die mit dieser Extension durchgeführt worden sind. Das Tool ist in Deutschland an der Universität Tübingen als Folge von Erosionsprognosenanalysen von SCHÄUBLE (1999, 2005) entwickelt worden. Es ist gratis verfügbar und herunterladbar aus dem Internet (<http://www.terracs.de>).

AVErosion basiert auf dem Modell der Universal Soil Loss Equation (USLE) von WISCHMEIER & SMITH (1978). Die USLE ist ein empirisches Modell und quantifiziert die langjährigen Bodenabtragsmengen aus dem Produkt von Niederschlag (R-Faktor), Bodentyp (K-Faktor), Relief (L- & S-Faktoren), Bodenbearbeitung und -Bedeckung (C-Faktor) und Bodenerosionsschutzmassnahmen. AVErosion bietet zwei Varianten der USLE an: einerseits die Standardformel der USLE, welche für Erosionsprognosen an einem gestreckten, ununterbrochenen Hang entwickelt worden ist, andererseits das modifizierte Modell MUSLE87 von BORK & HENSEL (1988). Die Modifikation zur USLE besteht darin, dass die Mängel der USLE, keine Akkumulation und keine Bodenerosion für Einzugsgebiete zu berechnen, im MUSLE87-Modell behoben werden.

Empirische Modelle haben den Vorteil, dass sich die Anzahl an berücksichtigten Einflussfaktoren und somit die Menge an Inputdaten in Grenzen halten. Die Extension AVErosion verlangt als Eingangsdaten Rasterdaten der R-, K- und C-Faktoren, ein digitales Höhenmodell (DHM) zur Berechnung der L-, S-, und P-Faktoren, und ein Parzellennetz für die Beschränkung der Modellierung auf einzelne Schläge. Der Output entspricht einem langjährigen mittleren Bodenabtrag in Tonnen pro Hektare und Jahr [$t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]. Das Resultat wird jeweils in zwei Rastern ausgegeben. Eine zellscharfe Modellierung in Rasterauflösung und eine schlagbezogene Modellierung, welche für jede Parzelle repräsentativ den Mittelwert der Erosionsgefährdung anzeigt. AVErosion wurde in dieser Arbeit auf drei Untersuchungsgebiete angewandt: Estavayer (FR), Oberaargau (BE) und Frienisberg (BE).

Für die Berechnung der reliefrelevanten Faktoren standen DHMs in drei verschiedenen Auflösungen zur Verfügung: das DHM100 (BFS), welches auf einem Hektarraster basiert, das DHM25 (swisstopo) mit einem 25x25m-Raster und das DTM-AV (swisstopo) mit einer extrem hohen Auflösung von 2x2 Metern. Die Auflösung des DHM bestimmt auch die Auflösung der Resultate. Die R-, K- und C-Faktoren sind hier nicht selber erhoben worden, sondern stammen von FRIEDLI (2006). Obwohl die Faktoren von FRIEDLI (2006) alle nur im Hektarraster verfügbar sind, macht ihre Verwendung durchaus Sinn. Erstens konnte mit dem Einsatz bereits erhobener Daten in AVErosion ein direkter Vergleich zu vorherigen Modellierungen gezogen werden. Zweitens konnte durch Beibehaltung der Faktoren von FRIEDLI (2006) der Einfluss der Auflösung des DHM auf eine Erosionsmodellierung erörtert werden.

Die Berechnung in drei Auflösungen hat gezeigt, wie stark sich die Relieffaktoren je nach DHM verändern und so Einfluss auf das Resultat haben. Für die Auflösungen des DHM100 und des DHM25 liefern beide Modelle ähnliche Resultate. Auffällig ist die Disparität der Modellierungen in hoher Auflösung, wo die MUSLE87-Modellierung deutlich höhere Abtragsraten prognostiziert als die USLE-Modellierung. Im Schnitt berechnet die MUSLE87 in der DTM-AV-Auflösung ein um den Faktor 1,7 höheren Abtrag als die USLE-Modellierung. Im Gegensatz zur USLE, welche die höchsten Abtragsraten in der DHM25-Auflösung berechnet, steigt die mittlere Erosionsgefährdung unter Verwendung der MUSLE87-Modellierung mit höher werdender Auflösung des DHM. Im Vergleich zu einer Modellierung mit dem DHM100 liefert die Berechnung mit dem DTM-AV im Schnitt zu einer doppelt so hohen Erosionsgefährdung im untersuchten Gebiet.

Aus dem Vergleich der Modellierungen mit Feldbeobachtungen und Fotografien geht hervor, dass die zellenscharfe MUSLE87-Modellierung eine gute Übereinstimmung mit den natürlichen Verhältnissen aufweist. Dies lässt sich aber nur für die relative Erosionsgefährdung sagen. Das heisst, die Modellierung scheidet gefährdete Bereiche gut aus. Eine Verifikation der absoluten Abtragshöhen lässt sich in dieser Arbeit nicht bewerkstelligen. Dazu müssten langjährige Feldkartierungen vorhanden sein. Solche Feldkartierungen sind im Gange, und ihre Resultate, vor allem bezüglich des Bodenbearbeitungsfaktors (C-Faktor) und der eingesetzten Erosionsschutzmassnahmen (P-Faktor), können zu einer genaueren Bodenerosionsmodellierung beitragen.

Ein Vergleich der mittleren Abtragswerte aus AVErosion mit den Berechnungen von FRIEDLI (2006) im Hektarraster zeigt eine höhere Erosionsgefährdung von AVErosion an. Für das Untersuchungsgebiet Estavayer berechnet AVErosion eine mittlere Bodenerosionsgefährdung von $3.6 \text{ t*ha}^{-1}\text{*a}^{-1}$. Im Gegensatz dazu quantifizieren die Berechnungen von FRIEDLI (2006) einen Abtrag von $2 \text{ t*ha}^{-1}\text{*a}^{-1}$. Die Handhabung der erosiven Hanglänge von AVErosion ist ein Grund für die erhöhte Abtragsgefährdung. FRIEDLI (2006) hat eine Standardhanglänge von 100m eingesetzt, während AVErosion die Hanglänge aus dem DHM berechnet. Gerade in tieferen Auflösungen führt dies zu sehr grossen erosiven Hanglängen, welche das Resultat entsprechend beeinflussen. Parzellenscharf modellierte Daten gibt es für den Raum Frienisberg von PRASUHN & GRÜNIG (2001). Die Ergebnisse aus der schlagbezogenen MUSLE87-Modellierung in 2m-Auflösung weichen nur geringfügig davon ab. Während der Median der modellierten Erosionsgefährdung bei PRASUHN & GRÜNIG (2001) $2.45 \text{ t*ha}^{-1}\text{*a}^{-1}$ beträgt, liegt er in dieser Modellierung bei $2.96 \text{ t*ha}^{-1}\text{*a}^{-1}$.

Als Fazit kann gezogen werden, dass AVErosion ein praktisches Tool ist, um die Erosionsgefährdung auf einfache und effiziente Weise zu berechnen. Mit den verschiedenen eingesetzten DHM wurde der grosse Einfluss des Reliefs auf die Erosion verdeutlicht; dabei hat das DTM-AV sein Potential für zukünftige geographische Studien angedeutet. Die hier erstellten Bodenerosionsgefährdungskarten können helfen, gefährdete Parzellen in den Ackerbaugebieten zu erkennen und genauer zu untersuchen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
Zusammenfassung	iii
Inhaltsverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	viii
Vorwort	ix
1. Einleitung	1
1.1 <i>Problemstellung</i>	2
1.2 <i>Motivation</i>	3
1.3 <i>Relevanz der Arbeit</i>	4
1.4 <i>Zielsetzungen</i>	5
1.4.1 <i>Kennen lernen und Anwendung der AVErosion-Extension für ArcView</i>	5
1.4.2 <i>Anwendung von AVErosion im Rahmen von COST Schweiz</i>	6
1.4.3 <i>Evaluation</i>	7
1.4.4 <i>Unterziele</i>	8
1.5 <i>Aufbau der Arbeit</i>	8
2. Grundlagen und Methodik	11
2.1 <i>Erosionsbegriffe</i>	11
2.2 <i>Modellierung der Bodenerosion</i>	12
2.3 <i>Modellbeschreibung USLE</i>	14
2.3.1 <i>Single-Flow-Algorithmen mit USLE</i>	16
2.3.2 <i>Multiple-Flow Algorithmen mit MUSLE87</i>	18
2.4 <i>Datenstruktur</i>	22
2.5 <i>Technische Umsetzung</i>	23
3. Modellberechnung	25
3.1 <i>Grundlagenlayer zur Erstellung der Karten</i>	25
3.1.1 <i>Schläge</i>	26

3.1.2	Relief.....	26
3.2	<i>Ausschneiden und Anpassen von Rasterdateien</i>	30
3.3	<i>Untersuchung und Korrektur des verwendeten digitalen Höhenmodells</i> ...	31
3.4	<i>Faktorengenerierung</i>	32
3.4.1	R-Faktor [$N \cdot h^{-1}$].....	33
3.4.2	K-Faktor [$kg \cdot h \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$].....	35
3.4.3	C-Faktor [dimensionslos].....	37
3.4.4	L-Faktor [dimensionslos].....	39
3.4.5	S-Faktor [dimensionslos].....	40
3.4.6	P-Faktor [dimensionslos].....	41
3.5	<i>Berechnung der Bodenerosionsgefährdung</i>	43
4.	Gebietsbeschreibung	45
4.1	<i>Estavayer-le-Lac</i>	46
4.2	<i>Oberaargau</i>	48
4.3	<i>Frienisberg</i>	50
4.4	<i>Gebietsvergleich</i>	52
5.	Visualisierung und Besprechung der Resultate	53
5.1	<i>Bodenerosionsgefährdung rasterzellenscharf</i>	53
5.1.1	Karte rasterzellenscharfe Bodenerosionsgefährdung mit DHM100 (Hektarraster).....	54
5.1.2	Karte rasterzellenscharfe Bodenerosionsgefährdung mit DHM25 (25m-Raster).....	57
5.1.3	Karte rasterzellenscharfe Bodenerosionsgefährdung mit DTM-AV (2m-Raster).....	60
5.2	<i>Schlagbezogene Bodenerosionsgefährdung</i>	63
5.2.1	Karte schlagbezogene Bodenerosionsgefährdung mit DHM25 (25m-Raster).....	63
5.2.2	Karte schlagbezogene Bodenerosionsgefährdung mit DTM-AV (2m-Raster).....	66
5.3	<i>Zusätzlicher Output</i>	68
6.	Bewertung der Resultate und des Modells	69
6.1	<i>Vergleiche zwischen Modellierungen unterschiedlicher Auflösung</i>	69
6.2	<i>Auswirkungen des digitalen Höhenmodells auf Einzelparzellen und kleine Reliefmerkmale</i>	73

6.2.1	Estavayer – Parzelle 310.....	74
6.2.2	Estavayer – Parzelle 80.....	76
6.2.3	Teilgebiet Oberaargau Nordost.....	78
6.3	<i>Verifikation mit Feldfotos</i>	80
6.4	<i>Resultatsbewertung anhand von Modellberechnungen</i>	87
6.4.1	Vergleich mit Modellberechnungen von FRIEDLI (2006).....	87
6.4.2	Vergleich mit Modellierungen von PRASUHN & GRÜNIG (2001).....	87
6.5	<i>Ackerland (Basiskarte Parzellennetz)</i>	87
6.6	<i>Sensitivitätsanalyse</i>	87
7.	Synthese	87
7.1	<i>Methoden</i>	87
7.2	<i>Resultate</i>	87
7.3	<i>Anwendungsempfehlung</i>	87
7.4	<i>Ausblick</i>	87
	Literaturverzeichnis	87
	Anhang	87

Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung
ART	Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon
AV	Amtliche Vermessung
BFS	Bundesamt für Statistik
CDE	Centre for Development and Environment, University of Berne
COST	Coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique
DHM	Digitales Höhenmodell
DTM-AV	Digitales Terrainmodell der Amtlichen Vermessung
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EUREKA	European Research Coordination Agency
GIS	Geographisches Informationssystem
HADES	Hydrologischer Atlas der Schweiz
MUSLE87	Modified Universal Soil Loss Equation 1987
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USLE	Universal Soil Loss Equation

Vorwort

Im Vorfeld dieser Diplomarbeit habe ich mit einigen persönlichen Schwierigkeiten bezüglich meines Studiums gekämpft. Ich habe im Verlauf des Geographiestudiums an der Universität Bern viel Interessantes gelernt. Jedoch habe ich mich nach Abschluss der Vorlesungszeit in einer Situation befunden, in der ich keine eindeutigen Vorstellungen davon hatte, was ich gerne machen würde. Aufgrund von Diskussionen und aus persönlichem Interesse stand für mich die Arbeit mit geographischen Informationssystemen (GIS) im Vordergrund, da ich schon immer begeisterter Leser und Sammler von Karten war. Beim CDE hat sich mir die Chance auf eine methodische Arbeit im GIS-Bereich geboten. Als unerfahrener, aber lernwilliger GIS-Anwender hat mich die Arbeit auf der einen Seite sehr gefreut, auf der anderen Seite musste ich anfänglich sicher auch Unsicherheiten überwinden. Die Diplomarbeit hat mir praxisrelevante Arbeitsmethoden und auch die Wichtigkeit einer guten Zusammenarbeit näher gebracht. Es war ein fortlaufender Lernprozess, der mich um einige Erfahrungen reicher gemacht hat. Die Arbeit mit GIS war im Rahmen dieser Arbeit nicht voll umfassend, doch wurde für mich ersichtlich, welche Möglichkeiten GIS bieten. Das motiviert mich sehr, mich zukünftig weiter in diesem Feld zu beschäftigen.

Ich möchte an dieser Stelle allen Leuten danken, die mir in dieser Zeit geholfen haben. Dies betrifft im Besonderen meine Betreuer Volker Prasuhn von der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), der mir mit seinem Fachwissen und Enthusiasmus neue Impulse gegeben, und Thomas Ledermann vom CDE, der sich im Rahmen seiner Dissertation immer wieder Zeit für mich genommen hat. Beide haben mich stets motiviert und mich mit ihrem Enthusiasmus vorangebracht. Auch den weiteren betreuenden Personen am CDE wie Hanspeter Liniger, Karl Herweg und Hans Hurni möchte ich meinen besonderen Dank aussprechen.

Nebst den genannten Personen gibt es noch unendlich viele andere, denen ich einen Dank schulde, unter anderen:

GIS-Abteilung (CDE Bern) für den GIS-Support, vor allem Kurt Gerber, Nicole Weber für die Unterstützung und das Korrekturlesen, Verschiedene Mitarbeiter der Agroscope ART Reckenholz-Tänikon für die Mithilfe und Bereitstellung von Daten, Die Bewohner der Freiestrasse 23 in Bern für ein schönes Wohnjahr und die gute Nachbarschaft, das Bibliothekspersonal am GIUB, die Beratungsstelle der Berner Hochschulen für die Hilfe betreffend meiner Studiensituation, Heidi Hofmann und das NewRide Team für die tolle Arbeit neben dem Studium, ...

Zuletzt möchte ich mich ganz besonders bei meinen Eltern bedanken: *Thank you for your love and kindness and for sticking with me, through good times and bad.*

1. Einleitung

Böden sind Naturkörper unterschiedlichen Alters, die je nach Art des Ausgangsgesteins und Reliefs unter einem bestimmten Klima durch bodenbildende Prozesse entstanden sind. Der Boden dient Pflanzen als Wurzelraum und versorgt sie mit Wasser, Sauerstoff und Nährstoffen. Ähnliches gilt für Bodentiere und Mikroorganismen. Dadurch wird der Boden zur Grundlage der Produktion von Nahrungsmitteln. Die landwirtschaftliche Nutzung von Böden kann zu deren Belastung führen. So fördert insbesondere ackerbauliche Nutzung mit Perioden ohne Bodenbedeckung die Erosion durch Wasser oder Wind (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Aufgrund der Funktionen als Lebensraum von Organismen, als Wurzelraum für Kultur- und Wildpflanzen, als Puffer gegenüber Schadstoffen und als Regulator des Landschaftswasserhaushaltes gehören Böden zu den kostbarsten und damit schützenswertesten Gütern der Menschheit (EUROPARAT 1972). Nichtsdestotrotz haben Gründe wie Wirtschaftlichkeit oder Landwirtschaftspolitik im Verlauf der Zeit Druck auf den Boden ausgeübt (Übernutzung, Ausdehnung der Nutzfläche).

Moderne Technologien in der Landbewirtschaftung haben zu höheren und sichereren Erträgen geführt, sie haben in hängigen Gebieten aber auch die Erosion durch Wasser verstärkt. Neben der natürlichen Bodenerosion sind ungeeignete Anbaumethoden, suboptimale Anbaukulturen und das häufige Befahren mit schweren Maschinen die Hauptgründe für verstärkte Bodenerosionsgefährdung (SCHWERTMANN et al. 1990, HUDSON 1995).

Die Beurteilung und Kartierung von erosionsgefährdeten Gebieten ist die Grundlage zur Ausscheidung und Massnahmenregulierung von betroffenen Gebieten. Für grossflächige Studien muss die Kartierung mittels eines vereinfachten Verfahrens erfolgen. Feldstudien sind zeitintensiv und kostspielig. Eine Möglichkeit besteht in der digitalen Modellierung von erosionsgefährdeten Gebieten mittels empirischer Erosionsmodelle. Es existiert eine Fülle von verschiedenen Modellen (HEBEL 2003). Einige sind in ihrem Aufbau oder Datenanforderungen sehr aufwändig. Um die Benutzerfreundlichkeit und Bearbeitungsgeschwindigkeit zu steigern, existieren viele Bemühungen, ein möglichst effizientes Bodenerosionsmodell zu entwickeln. Neben dem Modell selbst spielen auch die Grundlagendaten eine wichtige Rolle. Für eine digitale Modellierung auf räumlicher Ebene müssen entsprechende Datensätze vorliegen

oder gar erst kreiert werden. Geographische Datensätze werden immer zahlreicher und hochwertiger. Dies erlaubt es, immer hochwertigere Modellierungen zu erstellen.

1.1 Problemstellung

Um eine aussagekräftige Erosionsgefährdungskarte im Feld auf der Basis von Schadenskartierungen zu erstellen, sind langjährige Messungen nötig (MOSIMANN et al. 1991, PRASUHN & GRÜNIG 2001). Dieser grosse zeitliche Aufwand ist ein Grund dafür, warum immer öfter auch Erosionsschätzungen mittels EDV gesucht werden. Die fortlaufend immer leistungsfähiger werdende Technik und immer zahlreicher verfügbaren Datensätze erlauben dies. In der Schweiz sind schon verschiedentlich Erosionsmodellierungen mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen (GIS) durchgeführt worden (vgl. DRÄYER 1996, PRASUHN & GRÜNIG 2001, FRIEDLI 2006 u. a.).

Zur Abschätzung von Bodenabtrag gibt es verschiedene Modelle. Das am häufigsten verwendete Modell ist die Universal Soil Loss Equation, kurz USLE (WISCHMEIER & SMITH 1978). Die USLE setzt verschiedene prozessrelevante Faktoren in einer einfachen Formel in Beziehung.

Die USLE entspricht der ABAG¹ (Allgemeine Bodenabtragungsgleichung) (SCHWERTMANN et al. 1990)

Ein wichtiger Faktor bei GIS-basierten Modellierungen ist die Qualität der zur Verfügung stehenden Daten. Oft gehen durch eine ungenügende Auflösung der Daten kleinflächig auftretende Erscheinungen wie etwa durch Oberflächenabfluss entstandene Rillen verloren.

Bodenerosion ist sehr ungleichmässig verbreitet. Sie variiert von Schlag zu Schlag viel mehr als im Vergleich verschiedener Regionen (MOSIMANN et al. 1991).

Grossflächige Erosionsberechnungen geben ein übersichtliches Bild der Erosionsgefährdung über ein Gebiet. Beispielsweise hat FRIEDLI (2006) mit dem USLE-Modell

¹ SCHWERTMANN et al. (1990) haben die USLE auf mitteleuropäische (genauer bayrische) Verhältnisse übertragen und entsprechende Anpassungen gemacht. Die Abkürzungen USLE und ABAG werden in dieser Arbeit synonym verwendet.

flächendeckend für die Schweiz eine Erosionsgefährdungskarte im Hektarraster erstellt. Diese Karte gibt ein nationales Bild der Erosionsgefährdung wieder. Jedoch ist die Auflösung im Hektarraster für kleinräumige Erscheinungen ungenügend. Die in dieser Arbeit eingesetzte Extension AVErosion ist ein Zusatzprogramm für die GIS-Software ArcView 3.x und dient der Analyse der Bodenerosion nach den Modellen USLE und MUSLE87 (SCHÄUBLE 2005). Die Extension ist frei verfügbar und kann vom Internet heruntergeladen werden (http://www.terracs.de/ArcView_3_x/AVErosion/averosion.html). AVErosion erlaubt nebst Gebietsberechnungen auch schlagbezogene (parzellenscharf berechnete) Erosionsmodellierungen. Zusammen mit höher aufgelösten Datensätzen kann somit der erwähnten Aussage von MOSLMANN et al. (1991) Rechnung getragen werden.

1.2 Motivation

Das Arbeiten mit EDV, insbesondere mit GIS, hatte für mich von Anfang an Priorität. Nach meinem definitiven Entschluss, mich auf GIS zu konzentrieren, habe ich mich auf die Suche nach konkreten Arbeitsthemen gemacht. Da mich die Diplomarbeit ein gutes Jahr beschäftigen würde, war es mir wichtig, mich gut über die möglichen Themen zu informieren und mir bei der Entscheidung Zeit zu lassen. Ich möchte mich an dieser Stelle bei den Diplomarbeitbetreuern für ihre offene Art und Weise der Beratungen bedanken. Die Diskussionen mit ihnen haben mir dabei geholfen, diese thematisch und methodisch interessante Arbeit zu finden.

Als interessierter und erfahrener Softwareanwender standen für mich methodische Arbeiten in diesem Bereich im Vordergrund. Die Möglichkeit, mich mit einem GIS auseinander zu setzen, erschien mir als geeignetster Weg, um mein Diplom zu erlangen. Dies einerseits, weil mich seit Anbeginn des Studiums die Arbeit mit GIS reizt und interessiert hat. Andererseits, weil sich in Gesprächen mit Bekannten und ehemaligen Geographiestudenten die wichtige Bedeutung von GIS-Kenntnissen für das spätere Berufsleben immer wieder herauskristallisiert hat. Vor diesem Hintergrund betrachte ich die Arbeit als sehr praxisnah, was mich besonders freut. Zudem kann ich einen Beitrag zum besseren Verständnis von Bodenerosion in der Schweiz leisten und eine Grundlage für weitere Arbeiten bilden.

1.3 Relevanz der Arbeit

Mit der AVErosion-Extension für ArcView kann man langjährige Bodenerosionsmodellierungen durchführen. Die Arbeit mit der Extension (anstelle von „Extension“ wird oft auch der Begriff „Tool“ verwendet) ist in der Schweiz noch nicht getestet worden. Insofern soll diese Arbeit eine Beurteilung der Fähigkeiten von AVErosion und den darin enthaltenen Modellen sein. Nebst diesem rein methodischen Aspekt der Arbeit können die Resultate einen Beitrag zum besseren Verständnis von Bodenerosion im Schweizer Mittelland leisten.

In einem grösseren Rahmen ist die Diplomarbeit in das COST Programm eingebunden. In der Schweiz ist COST (Europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wissenschaftlichen und technischen Forschung) neben EUREKA und den EU-Rahmenprogrammen eine der drei Säulen der Forschungszusammenarbeit mit Europa. Innerhalb von COST existieren verschiedene Forschungsprojekte, genannt COST-Aktionen, in vielen unterschiedlichen Forschungsrichtungen. Diese Arbeit ist ein Teil der COST-Aktion 634 „*On- and Off-Site Environmental Impacts of Runoff and Erosion*“ (<http://www.soilerosion.net/cost634/>). Das Hauptaugenmerk der COST-Aktion 634 richtet sich auf die Entwicklung eines integralen Verständnisses von On- und Off-Site Einflüssen² der Bodenerosion in Einzugsgebietsdimension. Die Koordination und Synthetisierung der Europäischen Bodenerosionsforschung ist eines der wichtigsten Zielsetzungen der COST-Aktion 634 (COST 2006). Auch in der Schweiz beteiligen sich mehrere Organisationen und andere Akteure wie zum Beispiel Landwirte an der COST-Aktion 634. Unter den Akteuren befinden sich auch das CDE der Universität Bern und die Agroscope Reckenholz-Tänikon ART. Dies widerspiegelt sich in dieser Arbeit auch in der Betreuung, da ich zu einem wesentlichen Teil von Volker Prasuhn von der ART betreut worden bin und er auch die Leitung der Arbeit übernommen hat.

Seit dem Sommer 2005 laufen innerhalb der COST-Aktion 634 zwei Dissertationen am CDE. Dies sind die Arbeiten von F. Schneider und T. Ledermann zum Thema: „*On- and Off-Site Effectiveness of Soil and Water Conservation in Switzerland – Steps towards the Integration of Farmers, Experts and Scientific Knowledge*“. Die

² Mit „On-Site“ sind Erosionsschäden am Ursprungsort des Erosionsereignisses gemeint. „Off-Site“-Effekte der Bodenerosion sind die Auswirkungen des Bodenabtrags auf nachfolgende Ökosysteme (z. B. Eutrophierung von Gewässersystemen, Flutschäden an Infrastruktur usw.).

Untersuchungsgebiete ihrer Arbeiten liegen im Raum Oberaargau (BE), Frienisberg (BE) und Estavayer-le-Lac (FR). Diese Arbeit soll als Unterstützung dieser Dissertationen dienen und bedient sich daher auch derselben Untersuchungsgebiete.

1.4 Zielsetzungen

Die ArcView 3.x Extension AVErosion und die dazugehörigen Erosionsmodelle sind die Grundlagen dieser Arbeit. Die AVErosion-Extension für ArcView ist in der Schweiz noch nicht getestet worden. Diese Arbeit soll dazu dienen, die Möglichkeiten der Extension zu testen und auf Schweizer Verhältnisse anzuwenden. Daher liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf methodischen Zielsetzungen. Die Modellberechnung erfolgt über das GIS ArcView 3.x von ESRI, da AVErosion bisher nur für diese Version verfügbar ist. Alle weiteren Schritte zur Auswertung und Darstellung der Karten erfolgen im neueren und umfangreicheren ArcGIS Desktop 9.2 von ESRI.

1.4.1 Kennen lernen und Anwendung der AVErosion-Extension für ArcView

Das in der Schweiz noch nicht angewandte AVErosion mit den Modellen USLE und MUSLE87 soll in einer ersten Phase auf ein paar wenige, kleine Plots angewendet werden, um das Programm besser kennen zu lernen. Die verwendeten Daten sind dabei R-, K- und C-Faktorenraaster aus der nationalen USLE-Modellierung von FRIEDLI (2006), aktuelle lokale Parzellenpläne sowie digitale Höhenmodelle (DHM).

Es geht in dieser Phase darum, die Aufwendigkeit einer Bodenerosionsmodellierung mit AVErosion abzuschätzen. Dabei geht es um folgende Fragen:

- Ist der Einsatz von AVErosion praktikabel / effizient?
- Ist AVErosion geeignet, um den Bodenabtrag für Schweizer Verhältnisse – genauer gesagt für Verhältnisse im Schweizer Mittelland – abzuschätzen?

Mit der gewonnenen Kenntnis kann nachfolgend geklärt werden, wie viele der Testgebiete für die Arbeit in Frage kommen.

1.4.2 Anwendung von AVErosion im Rahmen von COST Schweiz

Die Extension AVErosion kommt in den COST Schweiz Testgebieten Frienisberg, Oberaargau und Estavayer-le-Lac zum Einsatz. Neben den in der Bodenerosionsgefährdungskarte von FRIEDLI (2006) verwendeten Faktorenrastern in Hektarauflösung existieren für die Testgebiete aktuelle Parzellenpläne und DHMs in drei Auflösungen. Aus zeit- und arbeitsintensiven Gründen und unter der Annahme des grossen Einflusses des Reliefs bei Erosionsberechnungen mit USLE werden im Vergleich zu FRIEDLI (2006) einzig die Relieffaktoren verändert. Dies geschieht über das jeweils eingesetzte DHM.

Das Ziel in dieser Phase ist die Erstellung von digitalen Übersichtskarten zur Bodenerosionsgefährdung in den Untersuchungsgebieten:

- **Digitale Übersichtskarten in Rasterzellenauflösung:** Erstellen von digitalen Übersichtskarten in verschiedenen Auflösungen zur Bodenerosionsgefährdung in den Untersuchungsgebieten im Schweizer Mittelland. Die Übersichtskarten in Rasterzellenauflösung sollen in drei verschiedenen Auflösungen hergestellt werden:
 - Bodenerosionsgefährdungskarten unter Verwendung des digitalen Höhenmodells DHM100 (BFS) im Hektarraster, analog zu der Arbeit von FRIEDLI (2006)
 - Bodenerosionsgefährdungskarten unter Verwendung des digitalen Höhenmodells DHM25 (swisstopo) im 25m-Raster.
 - Bodenerosionsgefährdungskarten unter Verwendung des hoch auflösenden Digitalen Terrainmodells der Amtlichen Vermessung DTM-AV (swisstopo) mit einem 2m-Raster

Nebst den rasterzellenscharf aufgelösten Karten kann AVErosion auch schlagbezogene (=parzellenscharfe) Modellierungen durchführen. Ein Ziel ist es, die Bodenerosion auf einer schlagbezogenen Auflösung abzuschätzen:

- **Schlagbezogene digitale Übersichtskarten:** Erstellen von digitalen Übersichtskarten in verschiedenen Auflösungen zur Bodenerosionsgefährdung in

den Untersuchungsgebieten im Schweizer Mittelland, aufgelöst nach Einzelparzellen. Die Übersichtskarten sollen in zwei verschiedenen Auflösungen hergestellt werden:

- Schlagbezogene Bodenerosionsgefährdungskarten unter Verwendung des digitalen Höhenmodells im 25m-Raster (DHM25, swisstopo).
- Schlagbezogene Bodenerosionsgefährdungskarten unter Verwendung des hoch auflösenden Digitalen Terrainmodells der Amtlichen Vermessung (DTM-AV, swisstopo) mit einem 2m-Raster

1.4.3 Evaluation

Die AVErosion-Modellierungen mit zwei verschiedenen Modellen und in drei Auflösungen bieten verschiedene Vergleichsmöglichkeiten. Dabei werden folgende Fragestellungen behandelt:

- Was leisten die zwei Modelle USLE und MUSLE87 und unterscheiden sich die Resultate voneinander?
- Welchen Einfluss hat die Auflösung des DHM auf das Resultat der Modellierungen mit USLE und MUSLE87?

Im Weiteren können im Rahmen einer Feldbegehung die Modellierungen auch durch eine visuelle Überprüfung im Feld kontrolliert werden

Mit der nationalen Bodenerosionsgefährdungskarte von FRIEDLI (2006) und Untersuchungen von PRASUHN & GRÜNIG (2001) im Raum Frienisberg stehen Resultate zur Verfügung, mit denen die AVErosion-Modellierungen verglichen werden können. Dabei geht es um folgende Fragen:

- Wie schneiden die Resultate aus AVErosion im Vergleich zu den Bodenerosionsberechnungen von FRIEDLI (2006) ab?
- Wie schneiden die Resultate aus AVErosion im Vergleich zu den Bodenerosionsmodellierungen von PRASUHN & GRÜNIG (2001) im Raum Frienisberg ab?

Um direkte Vergleiche zu FRIEDLI (2006) ziehen zu können, werden die gleichen Grundlagendaten, die gleiche Auflösung und das gleiche Modell benutzt. Einzig die Reliefaktoren werden anders erhoben.

Die Modellierung von PRASHUN & GRÜNIG (2001) ist ebenfalls mit der USLE durchgeführt worden. In diesem Fall sind aber sämtliche Faktoren unabhängig voneinander erhoben worden. Zudem werden hier höher aufgelöste schlagbezogene Modellierungen verglichen.

1.4.4 Unterziele

Nebst der Evaluation der Extension soll hier gleichzeitig ein Beitrag zur im grösseren Rahmen stattfindenden COST-Aktion 634 (Schweiz) geleistet werden. In diesen Gebieten werden im Rahmen von COST im CDE sowohl in quantitativer (Bodenkartierungen) als auch qualitativer (Befragungen zu Bewirtschaftung) Hinsicht bereits Untersuchungen durchgeführt. Die laufenden Arbeiten sind meist Felderhebungen. Aufgrund dieser Untersuchungen besteht bereits eine detaillierte Datenlage, was für eine Validierung von hoher Bedeutung ist.

- Mit den Karten soll es möglich werden, Problemgebiete, insbesondere bei hoher Auflösung, auszuscheiden.
- Bei positiver Evaluation von AVErosion mit respektablen Ergebnissen, soll die Extension auch für weitere Arbeiten als brauchbare Grundlage dienen (z. B. für Szenarienberechnungen).

1.5 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit besteht aus 7 Teilen.

Das Kapitel 1 dient zur Einführung in das Themenfeld der vorliegenden Arbeit und skizziert die Zielsetzungen.

Während Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen zu Bodenerosionsmodellen und zur Thematik Bodenerosion beinhaltet, beschreibt Kapitel 3 die methodische Umsetzung, dabei wird auch ein kleiner Einblick in die Berechnungen von AVErosion gegeben. Die einzelnen Berechnungen werden beschrieben und über die unmittelbar folgenden Karten visualisiert. Daraufhin folgt in Kapitel 4 eine kurze Beschreibung der Untersuchungsgebiete mit jeweiliger Übersichtskarte zur geographischen Einordnung.

Kapitel 5 widmet sich der Resultatsbetrachtung. Im Speziellen wird die berechnete Bodenerosionsgefährdung diskutiert. Die Resultate werden jeweils in Kartenform dargestellt.

In Kapitel 6 werden die Resultate bezüglich Genauigkeit betrachtet. Dabei wird auf die wesentlichen Nutzungsmöglichkeiten und Verwendungslimiten ausdrücklich hingewiesen.

Kapitel 7 fasst die Arbeit in den entscheidenden Punkten zusammen. Mit dem Blick in die Zukunft werden Verwendungsmöglichkeiten aufgezeigt.

2. Grundlagen und Methodik

Bodenerosion findet grundsätzlich immer und überall statt (HUDSON 1995). Die Form und das Ausmass der Bodenerosion unterscheiden sich aber je nachdem von Fall zu Fall grundlegend. Deshalb werden in diesem Kapitel vorweg die grundlegenden Bodenerosionsbegriffe und –formen erläutert, um danach erst zur Modellierung zu kommen.

2.1 Erosionsbegriffe

Bodenerosion hat mehr als nur einen Auslöser. Es gilt daher, die Bodenerosion zu kategorisieren und die Ursachen zu definieren, welche diesen Prozess auszulösen vermögen. In der Literatur wird allgemein Unterschieden zwischen naturbedingter Erosion („natural/geological erosion“) und einer beschleunigten, anthropogen verursachten Erosion („accelerated/anthropic/human induced erosion“). (vgl. TOY et al. 2002). Der Einfluss des Menschen wirkt sich insbesondere in ackerbaulich genutzten Gebieten aus. Dies ist einerseits auf die Art der Bodenbearbeitung zurückzuführen, andererseits auch auf die angebaute Kultur.

In einer zweiten Einteilung wird zwischen Bodenerosion durch Wasser und Bodenerosion durch Wind unterschieden. Wasserbedingte Bodenerosion ist die am weitesten verbreitete Bodenerosionsform (vgl. TOY et al. 2002). Sie wird beeinflusst durch die Menge und Intensität des Niederschlags. Bodenerosion durch Wind hängt von zwei Bedingungen ab. Einerseits muss der mittlere jährliche Niederschlag unter 250-300 mm/a liegen, andererseits braucht es Winde, die stark genug sind, um Bodenpartikel wegtragen zu können (HUDSON 1995). In Schweizer Verhältnissen ist Winderosion kaum relevant (SCHAUB 1989). So wird in dieser Arbeit fortan immer von wasserbedingter Bodenerosion ausgegangen.

Die Bodenerosion durch Wasser durchläuft drei Phasen. In einer ersten Phase werden durch Aufschlagen von Regentropfen Bodenpartikel aus dem Bodenaggregat gelöst. Wenn der Boden seine Wasseraufnahmekapazität erreicht hat, werden die gelösten Bodenpartikel in einer zweiten Phase durch auf dem Boden entstehenden Oberflächenabfluss wegtransportiert. Durch die entstehende Fließkraft können noch mehr Bodenpartikel aus dem Bodengefüge gelöst und wegtransportiert werden

(SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Die dritte Phase folgt, wenn der Abfluss nicht mehr genug Energie trägt und die getragenen Bodenpartikel abgelagert werden. Die während des ganzen Prozesses entstehenden Erosionsformen nehmen dabei, je nach Intensität und Oberfläche, unterschiedliche Gestalten an (HUDSON 1995).

PRASUHN & GRÜNIG (2001) teilen die Erosionsformen einer von zwei Kategorien zu. So wird grundsätzlich zwischen flächenhafter und linearer Erosion differenziert. Ausschlaggebend ist dabei die Breite und Tiefe der Erosionsspuren im Feld. Flächenhafte Erosionsspuren sind Formen, die eine Ausprägung nicht tiefer oder Breiter als 2cm im Feld hinterlassen (Abbildung 2.1). Alle gröber einschneidenden Spuren (>2cm) gehören zu den Formen der linearen Erosion (siehe Abbildung 2.2).



Abbildung 2.1 (oben): Flächenhafte Erosion in Winterweizen. Region Frienisberg, 29.10.1998.
(Quelle: PRASUHN & GRÜNIG, 2001)



Abbildung 2.2 (rechts): Rillenerosion in gepflügtem Feld. Region Frienisberg, 28.10.1998.
(Quelle: PRASUHN & GRÜNIG, 2001)

2.2 Modellierung der Bodenerosion

Grundsätzlich stellt sich die Frage nach der Notwendigkeit für Bodenerosionsprognosen in Mitteleuropa. Zwar haben landwirtschaftliche Nutzung und Ackerbau zu einer anthropogen verursachten Vegetationsarmut geführt und damit den natürlichen Bodenverlust um Größenordnungen erhöht, doch im Vergleich zu anderen Klimazonen bleibt er immer noch relativ gering (SCHÄUBLE 1999). Auch weit verbreitete Erosionsspuren in der Mitteleuropäischen Agrarlandschaft wie zum Beispiel Rillen oder Flächenspülungen ändern an dieser Feststellung nichts.

Die sichtbaren Spuren der Erosion geben uns aber einen Hinweis, dass Erosion auch vor vermeintlich stabilen Böden nicht halt macht. Bodenerosion ist auch hierzulande ein ernst zu nehmendes Problem. Die Gründe belaufen sich hierbei nicht nur auf die Menge des abgetragenen Bodens. Der Abtrag von Oberboden auf landwirtschaftlich genutzten Böden kann längerfristig zu Ertragseinbussen bis hin zum vollständigen Verlust des Oberbodens und damit der Fruchtbarkeit führen. Schon der Verlust der obersten 20 cm führt zu einer nachhaltigen und irreversiblen Schädigung der Bodenfunktionen (AUERSWALD 1991). Zudem fördert die Erosion den Stofftransport, was zu einer unerwünschten Belastung der Gewässer durch Stoffeinträge wie Phosphor und Nitrat führen kann. Auch mit Folgeschäden an der Infrastruktur kann gerechnet werden. Die erwähnten möglichen Auswirkungen gelten nur für Böden mit geringem oder gar keinem Bewuchs. Eine geschlossene Pflanzendecke schützt den Boden fast vollständig vor oberflächlicher Abspülung und Ausblasung (SCHÄUBLE 1999).

Anders präsentiert sich die Situation in Ackerbaugebieten. Mit dem Ackerbau greift der Mensch stark in natürliche Systeme ein. Insgesamt gesehen muss festgestellt werden, dass beim Ackerbau auch im erosionstechnisch besten Fall der zu bearbeitende Boden nicht ohne Phasen ohne Bodenbedeckung auskommt. Dadurch resultiert ein gesamthaft geringerer Schutz der Bodenoberfläche im Vergleich zu Wiesen- und Waldflächen. Diese Tatsache ist für die hier vorgelegte Arbeit sehr wichtig, denn es werden ausschliesslich Ackerbaugebiete berechnet. Es ist also in jedem Fall mit Erosion zu rechnen.

Es existiert heute eine grosse Vielfalt an Erosionsmodellen. Wie aus dem Arbeitstitel zu interpretieren, geht es in dieser Arbeit darum, das Tool AVErosion mit den zwei vorgegebenen Modellen USLE und MUSLE87 zum Einsatz zu bringen und zu evaluieren. Ich verzichte deshalb auf Beschreibungen und Aufzählungen anderer, heute gängiger Erosionsmodelle und konzentriere mich auf den Beschrieb von AVErosion und seinen Modellen. Eine gute Übersicht über verschiedene Erosionsmodelle findet sich in HEBEL (2003).

Im Feld der Bodenerosionsmodellierung werden verschiedene Arten der Bodenerosion behandelt. Die in dieser Arbeit verwendete USLE und ihre Modifikationen berechnet die langjährige, mittlere Bodenerosion unter Annahme der im Modell eingetragenen Bedingungen. In manchen Fällen ist es schwierig, alle Faktoren der Gleichung den realen Umständen anzupassen. Dafür müssen im besten Fall Felderhe-

bungen durchgeführt werden. Unter diesem Gesichtspunkt ist eine Bodenerosionsmodellierung mit USLE als eine Abschätzung der Bodenerosionsgefahr zu verstehen. In keinem Fall dürfen die Werte und ihre räumliche Verteilung als absolut betrachtet werden. Vielmehr soll die USLE ein Hilfsinstrument sein, mit dem auf verhältnismässig einfache Weise die Bodenerosionsgefährdung abgeschätzt werden kann.

Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen wird jeweils nur der Bodenabtrag (hier Bodenerosionsgefährdung) berechnet. Der Transport und die nachfolgende Ablagerung des Bodenmaterials werden nicht erfasst. Bezieht man den Stofftransport mit in die Berechnung ein, wird nicht die Bodenerosionsgefährdung modelliert, sondern die Stoffbilanz. Bei einer Modellierung der Stoffbilanz kann erörtert werden, wo sich erodiertes Bodenmaterial abbaut (Profilverkürzung) und wo sich das Material nach dem Erosionsereignis ansammelt (Akkumulation).

2.3 Modellbeschreibung USLE

Die ArcView Extension AVErosion hat als Modell die Universal Soil Loss Equation (USLE) zur Grundlage. Bei der USLE handelt es sich um das bekannteste und am weitesten verbreitete empirisch-statistische Modell zur Abschätzung des langjährigen, mittleren Bodenabtrags. Entwickelt wurde es in der Mitte des 20. Jahrhunderts durch WISCHMEIER & SMITH (1978). Basiert auf Abtragsmessungen auf ausgesuchten Parzellen zwischen 1930 und 1950 wurden sechs Parameter bestimmt, welche den Bodenabtrag möglichst gut beschreiben. Diese Parameter gehen als die einzelnen Faktoren in die Gleichung der USLE ein. Die wichtigsten erosionsrelevanten Faktoren sind nach USLE folgende:

- Charakteristik des Regengeschehens
- Eigenschaften des Bodens
- Länge des Hanges
- Neigung des Hanges
- Bedeckung und Bearbeitung des Bodens
- Art der Erosionsschutzmassnahmen

Als Formel ausgedrückt werden alle Einflussfaktoren miteinander multipliziert:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

- Mit: A = langjähriger mittlerer Bodenabtrag in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$
- R = klimatischer Faktor, der die erosive Energie des Niederschlags angibt
- K = Bodenerodierbarkeitsfaktor
- L = 1. topographischer Faktor, Hanglänge / Grösse des Einzugsgebietes
- S = 2. topographischer Faktor, Hangneigung
- C = Bodenbedeckungs- und Bearbeitungsfaktor, erosionsrelevanter Einfluss der Vegetation
- P = Erosionsschutzfaktor, erosionsrelevanter Einfluss der Erosionsschutzmassnahmen

Die USLE wurde ursprünglich für die Beurteilung des durchschnittlichen Bodenabtrags an einem ununterbrochenen Hang entwickelt. Von jedem Faktor wird der Durchschnittsanteil ermittelt, den dieser am gesamten Hang besitzt. Danach werden die Faktorenwerte miteinander multipliziert. SCHÄUBLE (1999) beschreibt folgende Einschränkungen bei einer einfachen USLE Anwendung:

- *Durch die Beschränkung auf Durchschnittswerte können keine hoch auflösenden und genauen Erosionsprognosen erstellt werden.*
- *Der Bodenabtrag wird unter der Annahme eines gestreckten Hangs prognostiziert. Die genaue Hangmorphologie mit konvexen und konkaven Abschnitten und ihr Einfluss auf den Bodenabtrag wird übergangen.*
- *Es wird nur der Bodenabtrag berechnet, der Saldo aus Bodenzufuhr und -abfuhr bleibt unberücksichtigt. Damit sind keine Aussagen zu Profilverkürzungen oder Akkumulationstendenzen möglich.*
- *Es werden nur ein zweidimensionaler Hang und kein dreidimensionales Einzugsgebiet betrachtet.*

Trotz oben genannter Kritikpunkte stellt die USLE in verschiedenen Modifikationen wegen ihrer einfachen Handhabbarkeit ein wertvolles Modell zur Abschätzung der Bodenerosion dar. Darüber hinaus ermöglicht dieser Ansatz eine räumliche Differenzierung von Gefährdung und Vorsorgebedarf grosser Gebiete nach einem einheitlichen Ansatz.

Das Tool AVErosion kann nebst der einfachen USLE auch den Bodenabtrag mit der erweiterten MUSLE87-Formel (Modified Universal Soil Loss Equation 1987) berech-

nen. Die von HENSEL & BORK (1988) entwickelte MUSLE87 ist eine Einzugsgebietsversion der USLE. Die Modifikation zur USLE besteht darin, dass die Mängel der USLE, keine Akkumulation und keine Bodenerosion für Einzugsgebiete zu berechnen, im MUSLE87-Modell behoben werden (HENSEL 1991, BORK & SCHRÖDER 1996, SCHÄUBLE 1999). Die räumliche Bezugsgrösse ist dabei die Rastergrösse des angewandten digitalen Höhenmodells (DHM). Der Hanglängenfaktor L wird durch die Einzugsgebietsgröße jeder Rasterfläche ersetzt (HENSEL 1991). SCHÄUBLE (2005) beschreibt den Unterschied folgendermassen:

Im Gegensatz zur USLE-Erosionsgleichung werden bei MUSLE87 die LS-Werte nicht über Hanglänge und Single-Flow-Algorithmen berechnet, sondern über die Grösse des Einzugsgebietes, das mit Multiple-Flow-Algorithmen berechnet wird (SCHÄUBLE 1999).

Sowohl die USLE als auch die MUSLE87 in AVErosion verwenden die von SCHWERTMANN et al. (1987) für mitteleuropäische Verhältnisse angepasste Form der USLE.

Die folgenden Erläuterungen von SCHÄUBLE (1999) dienen zum Verständnis der grundlegenden Unterschiede zwischen den AVErosion-Berechnungsformeln USLE und MUSLE87. Sie betreffen allein die Bestimmung des Hanglängenfaktors L.

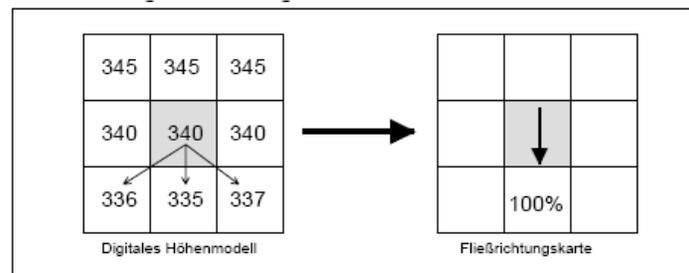
2.3.1 Single-Flow-Algorithmen mit USLE

Lange Zeit war keines der auf dem Markt vertriebenen GIS-Programme in der Lage, den Oberflächenabfluss korrekt zu analysieren. Schuld daran waren Berechnungsalgorithmen, die aufgrund konzeptioneller Beschränkungen keine genauen Ergebnisse erlaubten.

Die Beschränkungen zeigen sich in der Art und Weise der Oberflächenabflussberechnung innerhalb eines GIS. Dies geschieht in der Regel in zwei Schritten. Zunächst wird aus einem digitalen Höhenmodell die Abflussrichtung in jedem Pixel errechnet und daraus ein Fließrichtungsraster erstellt. Auf dessen Basis lassen sich die entsprechenden hydrologischen Daten bestimmen, z. B. die Abflussmenge, Wasserscheiden, Fließlängen usw.

Die folgende Abbildung 2.3 zeigt das Prinzip der Single-Flow Fließrichtungsberechnung:

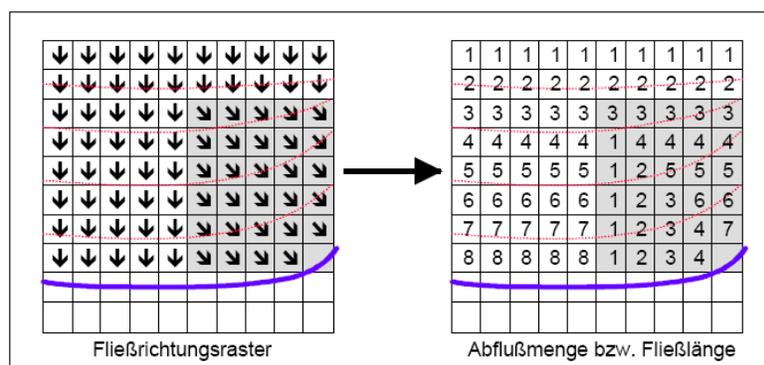
Abbildung 2.3: Fließrichtungsberechnung bei kommerzieller GIS Software.
(Quelle: SCHÄUBLE 1999)



Wie auf der Abbildung zu sehen ist, werden die Höhenwerte der 8 umliegenden Rasterzellen mit der Zentralzelle und untereinander verglichen. Die am niedrigsten liegende Nachbarzelle bestimmt dabei die Fließrichtung in der Zentralzelle. Daraus wird ersichtlich, dass diese Methode das wirkliche Fließverhalten sehr stark abstrahiert. Natürlicherweise müsste sich das aus dem Zentralpixel abfließende Wasser auf alle drei unteren Pixel verteilen. Zu allen drei tiefer liegenden Pixel besteht ein Gefälle und damit sind auch die Bedingungen für einen Wasserfluss gegeben. Bei der Single-Flow Methode fließt jedoch der gesamte Wasseranteil in eine, die am tiefsten liegende, Nachbarzelle weiter.

Die Problematik zeigt sich weiter in Abbildung 2.4 auf der nächsten Seite. Links ist der Ausschnitt einer hypothetischen Fließrichtungskarte zu sehen. Die gestrichelten Isohypsenlinien zeigen die Geländeform an, ein südexponiertes Gefälle, begrenzt durch eine Abflusslinie (dicke Linie) im südlichen Teil des Diagramms. Die eingezeichneten Pfeile entsprechen den Fließrichtungen in den jeweiligen Rasterzellen. Sie sind das Ergebnis einer Fließrichtungsanalyse aus einem digitalen Höhenmodell.

Abbildung 2.4: Prinzip einer Fließlängen- bzw. Akkumulationsberechnung aus einem Fließrichtungsraster (Quelle: SCHÄUBLE 1999).



Aus dieser Fließrichtungskarte lässt sich durch einfaches Verfolgen der Pfeile von oben nach unten bzw. einer Aufsummierung der durchflossenen Rasterzellen die Fließlänge bzw. Abflussmenge ermitteln, wie der rechte Teil des Schaubildes zeigt. In der Abbildung 2.4 ist gut zu erkennen, dass hydrologische Analysen auf der Basis von Single-Flow Algorithmen nicht nur die Wirklichkeit stark vergrößern, sondern darüber hinaus prinzipielle methodische Fehler produzieren. Dies ist beinahe immer der Fall, wenn sich die Fließrichtung zwischen zwei benachbarten Pixeln ändert.

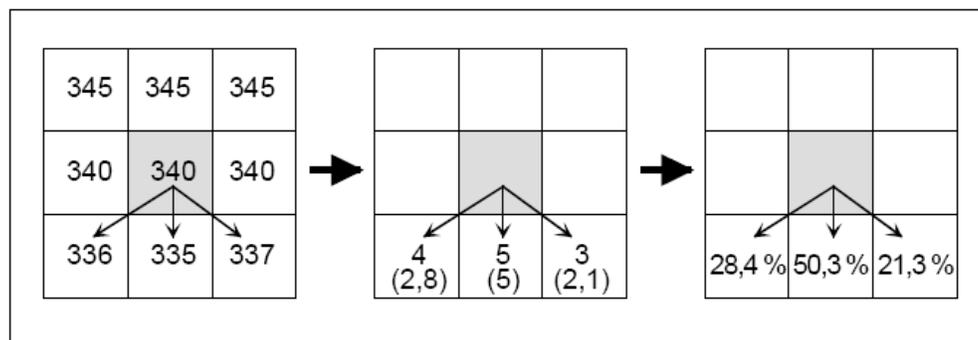
Beim Übergang von der südlichen zur grau unterlegten südöstlichen Richtung zeigt die Karte bei fünf Pixeln einen Abflusswert von 1 an, ein viel zu tiefer Wert angesichts der Geländeform und der Lage der entsprechenden Pixel am Mittelhang.

Das oben genannte Beispiel ist stellvertretend für die Problematik von Single-Flow Berechnungen. Denn bei Fließrichtungsänderungen erhalten die Grenzpixel oft keinen Zufluss von anderen Rasterzellen. Durch die Beschränkung auf nur eine Fließrichtung in nur einem Nachbarpixel werden bei Single-Flow Berechnungen zwangsläufig künstliche Wasserscheiden geschaffen, und weil sich solche Fehler nach unten fortsetzen, wird das ganze Resultat stark abstrahiert.

2.3.2 Multiple-Flow Algorithmen mit MUSLE87

Während bei Single-Flow Berechnungen ein Abfluss nur in eine Richtung stattfinden kann, lässt das Multiple-Flow Rechenverfahren mehrere Fließrichtungen zu und berücksichtigt damit das Verhalten abfließenden Wassers weit genauer. Die Grundprinzipien einer Abflussanalyse nach der Multiple-Flow Methode werden in folgender Abbildung 2.5 graphisch dargestellt und nachfolgend erläutert.

Abbildung 2.5: Funktionsweise von Fließberechnungen nach der Multiple-Flow Methodik (Quelle: SCHÄUBLE 1999).



Im linken Raster ist ein Ausschnitt aus einem Höhenmodell mit jeweiligen Höhenangaben zu sehen. die schwarzen Fließpfeile zeigen die Richtungen des Wasserflusses an. Im mittleren Raster werden in den untersten Zellen jeweils die Höhendifferenz zur Zentralzelle in m (= nicht eingeklammerte Ziffern) mit entsprechenden relativen Neigungswerten (= Zahlen in Klammern) angegeben. Das rechte Raster zeigt den relativen Wasserfluss in die tiefer liegenden Nachbarzellen in % des Gesamtflusses an.

Während bei Single-Flow Berechnungen nur ein Wasserfluss in Richtung des grössten Gefälles möglich ist, werden bei Multiple-Flow Analysen alle Richtungen berücksichtigt, in denen ein Gefälle vom Zentral- zum jeweiligen Nachbarpixel besteht. Der Anteil an Oberflächenwasser, den jedes tiefer liegende Nachbarpixel von der Zentralzelle erhält, ist dabei direkt proportional zum lokalen Gefälle zwischen beiden. Das mittlere und rechte Diagramm von Abbildung 2.5 zeigen die Art und Weise, wie dieser Anteil bestimmt wird. Nach Analyse der Höhendifferenz zum Zentralpixel (Zahlen ohne Klammern) wird in einem zweiten Schritt die jeweilige Neigung zum tiefer liegenden Pixel errechnet. Im Folgenden die Formeln zur Errechnung der Neigungswerte (in Abbildung 2.5 sind das die Zahlen in Klammern):

$$\theta = \Delta h \quad (\text{bei rechteckiger Fliessrichtung})$$

$$\theta = \Delta h \cdot \sqrt{2} \quad (\text{bei diagonaler Fliessrichtung})$$

Mit: θ = Neigungswert vom höher zum tiefer gelegenen Pixel

Δh = Absolute Höhendifferenz zwischen benachbarten Pixel

Aus den einzelnen Neigungswerten werden in einem dritten Schritt die relativen Wasserflüsse in jede Nachbarzelle bestimmt, indem das Gefälle zur Nachbarzelle durch die Gesamtneigung aller tiefer liegenden Nachbarzellen geteilt wird:

$$\Gamma_i = \frac{\theta_i}{\sum_{i=m}^n \theta_i}$$

Mit: Γ_i = relativer Fließanteil des Rasterpunktes i

Damit erhält jede tiefer liegende Zelle vom gesamten Wasserfluss genau den Anteil, der ihr aufgrund ihrer Lage zusteht.

Wie wichtig die Multiple-Flow gestützte Rechenfunktionen für die Gewinnung von genauen hydrologischen Daten sind, zeigt sich vor allem bei höheren räumlichen Auflösungen. Beispielhaft zeigt Abbildung 2.6 auf der folgenden Seite die Unterschiede bei der Berechnung des L-Faktors mit einem hoch auflösenden DHM. Dort wurde auf demselben Gebiet zweimal der L-Faktor berechnet, einmal mit der USLE (Single-Flow) Option, einmal mit MUSLE87 (Multiple-Flow).

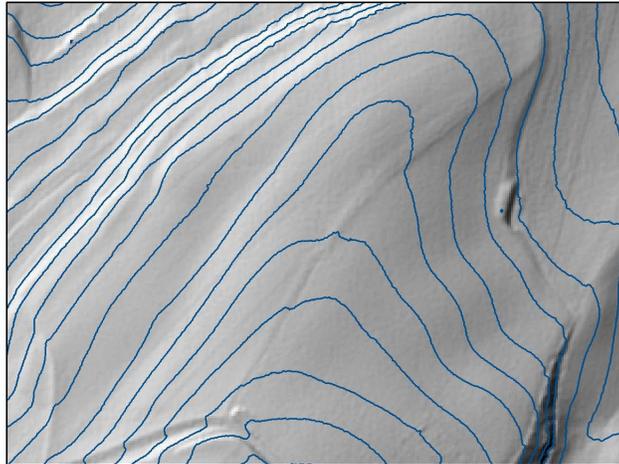
Abbildung 2.6: Ergebnisse nach verschiedenen Fließberechnungsmethoden mit einem hoch auflösenden DHM. (Quelle: Eigene Darstellung).

Karte 1:

Untersuchungsgebiet

Hillshade aus DTM-AV (Auflösung 2m) mit überlagernden Höhenlinien. Das dargestellte Gebiet ist ein Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet Frienisberg BE.

Grundlage: DTM-AV (swisstopo)

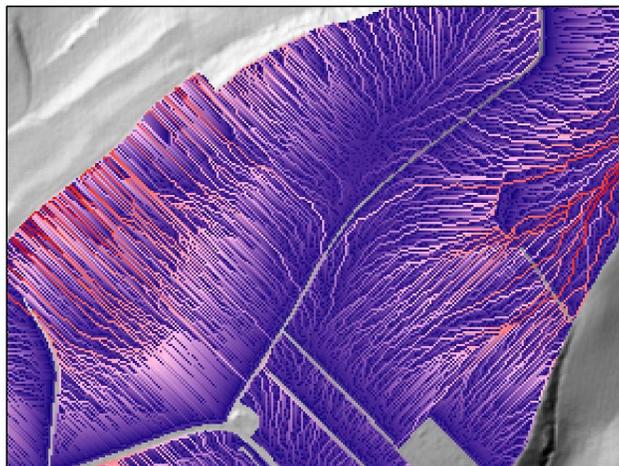
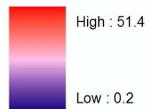


Karte 2:

L-Faktor; berechnet nach USLE mit Single Flow Analyseverfahren

Grundlage: DTM-AV (swisstopo), L-Faktor (Berechnet aus AVErosion)

L-Faktor
[dimensionslos]

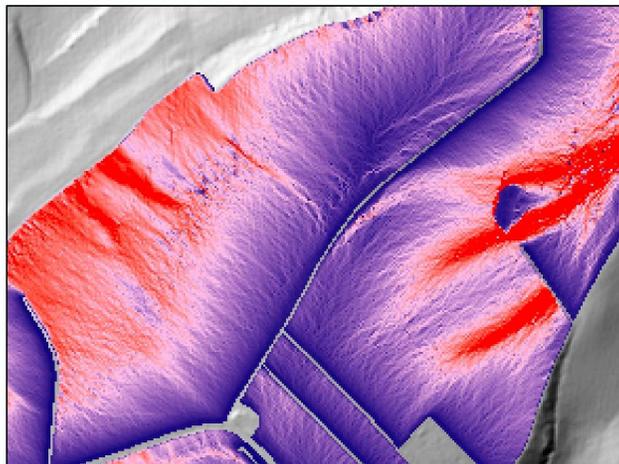


Karte 3:

L-Faktor; berechnet nach MUSLE87 mit Multiple Flow Analyseverfahren

Gleiche Werteskala wie in Karte 2

Grundlage: DTM-AV (swisstopo), L-Faktor (Berechnet aus AVErosion)



100 50 0 100 Meter



2.4 Datenstruktur

Entsprechend der Grundlage der USLE müssen für die sechs Parameter entsprechende Daten bereitgestellt werden. Um die Umsetzung des Modells möglichst einfach zu halten und um einen methodischen Vergleich bewerkstelligen zu können, wurden die Grundlagendaten grösstenteils aus FRIEDLI (2006) übernommen. Dies wird auch in Tabelle 2.1 ersichtlich.

Tabelle 2.1: Zusammenfassung der verwendeten Daten für die Erosionsgefährdungsmodellierung mit AVErosion. Die grau hinterlegten Datensätze wurden bereits von FRIEDLI (2006) verarbeitet und werden unverändert übernommen (Quelle: eigene Zusammenstellung).

USLE-Faktor	Datensatz	Typ	Auflösung	Quelle
R	Niederschlagskarten - Mittlere jährliche korr. Niederschläge - Extreme Punktrege	Digital	Punktdaten (Kilometer)	Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES), FRIEDLI (2006)
K	Bodeneignungskarte	Digital	Polygone (1:200'000)	BFS GEOSTAT (2000), FRIEDLI (2006)
C	Landnutzung	Digital	Punktdaten (100 m)	BFS GEOSTAT (1992/97), FRIEDLI (2006)
C	Landwirtschaftliche Kulturen	Digital	Betrieb / Gemeinde	BFS GEOSTAT (2003), FRIEDLI (2006)
L/S/P	Topographie	Digital	Rasterdaten (100 m) Rasterdaten (25 m) Rasterdaten (2 m)	DHM100 (BFS GEOSTAT) DHM25 (swisstopo) DTM-AV (swisstopo)
L/S/P	Parzellenpläne	Digital	Polygone	Amtliche Vermessung (AV) Bern, AV Fribourg

2.5 Technische Umsetzung

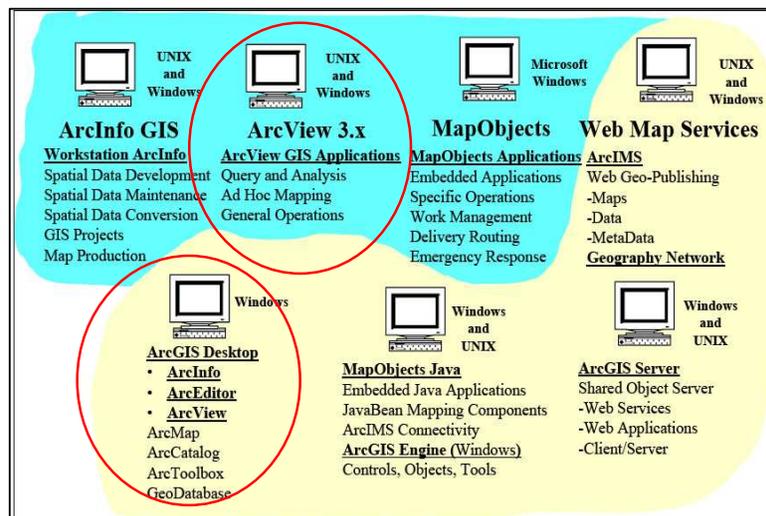
Der Schwerpunkt dieser Diplomarbeit liegt in der Arbeit mit GIS. Das Grundprinzip von GIS ist die Speicherung und Verwaltung von räumlichen Daten.

Im folgenden Abschnitt werden einzelne Aspekte und Anwendungen von GIS erwähnt. Diese beziehen sich vor allem auf die hier geschriebene Arbeit. Vorweg muss erwähnt werden, dass es nebst den folgenden Anwendungen natürlich noch sehr viele andere gibt. Das in dieser Arbeit verwendete GIS ist ArcView / ArcGIS von ESRI. Die Produkte von ESRI gehören zu den am meisten verwendeten GIS und gehören im Allgemeinen zum Industriestandard.

Grundsätzlich besteht das GIS von ESRI aus verschiedenen Anwendungen. Innerhalb dieser Anwendungen stehen unterschiedliche so genannte Tools und Extensions zur Verfügung, mit denen sich je nach Aufgabenstellung und Problemlösestrategie bestimmte Analysen und Berechnungen durchführen lassen. Die Extensions können auch von ESRI-externen Quellen stammen. ESRI gewährt nach eingehender Prüfung von ESRI-externen Extensions deren Zulassung und Einbettung ins ESRI GIS, falls diese sich bewähren. Dies ist auch im Falle vom Tool AVErosion der Fall.

Genauer ausgedrückt ist AVErosion eine Extension für die Software ArcView 3.x von ESRI. ArcView 3.x ist bereits eine ältere GIS-Version. Aus technischen und methodischen Gründen wurde ArcView 3.x hier ausschliesslich für die Anwendung von AVErosion verwendet. Die Vor- und Nachbearbeitung der Daten erfolgte dann in der Suite ArcGIS Desktop 9.2.

Abbildung 2.7: Übersicht über GIS-Suite von ESRI. Eingekreist die in dieser Arbeit verwendete GIS-Lösungen (Quelle: PETERS 2005).



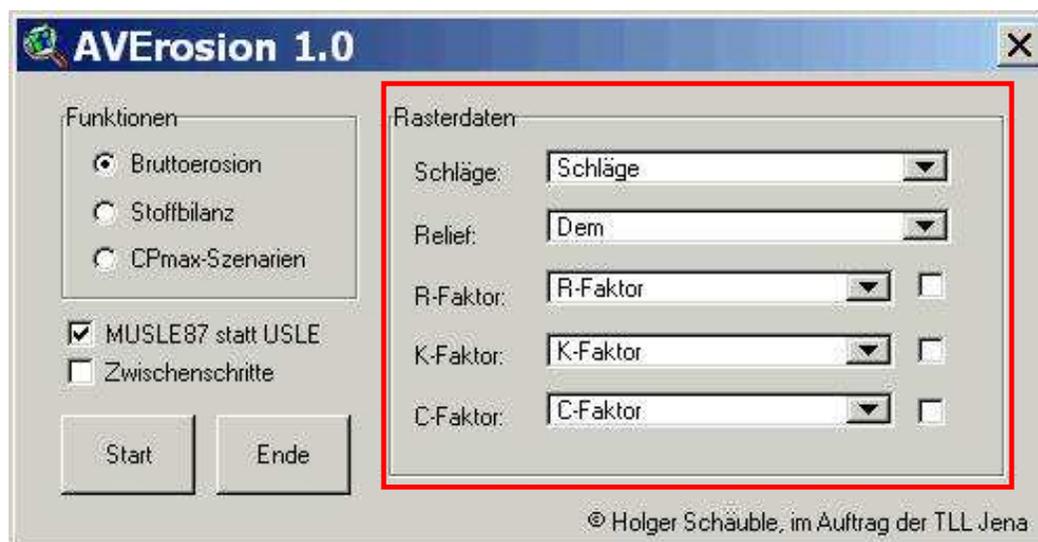
3. Modellberechnung

Mit der Beschreibung der Einzelmodelle USLE und MUSLE87 habe ich bezüglich Faktorenerhebung bereits etwas vorgegriffen. Wie bei allen empirischen Modellen müssen die erforderlichen Daten entweder selbst erhoben werden oder von einer anderen Quelle bezogen werden. Die Herkunft und Erhebungsweise der USLE/MUSLE87-Faktoren werden in diesem Kapitel beschrieben. Des Weiteren wird auch auf die Extension AVErosion eingegangen, um die gemachten Arbeitsschritte verstehen zu können.

3.1 Grundlagenlayer zur Erstellung der Karten

Unabhängig vom gewählten Modell (USLE/MUSLE87) verlangt AVErosion für die Berechnung des Bodenabtrags bestimmte Eingangsdaten. Die Funktionsweise von AVErosion wird hier nur kurz skizziert. Ausführlichere Angaben finden sich im Manual von AVErosion (SCHÄUBLE 2005, Download unter <http://www.terracs.de/averosion.pdf>). AVErosion arbeitet ausschliesslich mit Rasterdaten. Das heisst, zu erst müssen sämtliche von AVErosion verlangten Daten in Rasterdaten umgewandelt werden. Dies betrifft im Besonderen die Parzellenpläne, die in der Regel in Polygonform geliefert werden. Im Folgenden ist das Analysefenster von AVErosion aufgezeigt, welches der Faktoreneingabe zur Erosionsberechnung entspricht.

Abbildung 3.1: Analysefenster von AVErosion mit Funktionen zur Berechnung von Erosion, Stoffbilanz und CP_{max} -Werten. Der rechte Teil (rot eingerahmt) zeigt die verlangten Datensätze zur Durchführung der Berechnung (Quelle: SCHÄUBLE 2005).



Aus Abbildung 3.1 ist gut ersichtlich, welche Eingangsdaten AVErosion zur Abtragsberechnung benötigt. Von diesen ausgehend folgen nun die Beschreibung und Herkunft der einzelnen Rasterdaten.

3.1.1 Schläge

Mit Schlägen sind hier die Parzellendaten gemeint. Um möglichst realistische Erosionsberechnungen auf Ackerflächen durchzuführen, ist es wichtig, möglichst genaue und aktuelle Parzellenpläne zu erwerben. Ich konnte in meinem Fall von der aktiven COST-Betätigung in den Forschungsgebieten profitieren. Für alle drei Untersuchungsgebiete standen aktuelle Parzellenpläne zur Verfügung.

AVErosion kann die Bruttoerosion auch ohne die Eingabe von Parzellendaten berechnen. Allerdings sollen in dieser Arbeit insbesondere landwirtschaftliche Flächen, möglichst Ackerflächen, berechnet werden. Es ist daher nötig, auch den Parzellen-Layer mit in AVErosion einfließen zu lassen. Die Parzellenpläne kommen in der Regel als Polygondaten geliefert. Das Polygon-Shapefile muss zuerst in ArcGIS Desktop in ein Rasterfile umgewandelt werden, damit es in AVErosion zum Einsatz kommen kann. Dies geschieht mit Hilfe der ArcToolbox Funktion „Polygon to Raster“. Als Rastergröße wird 1 (=1 Meter) gewählt. Angesichts der kleinsten Auflösung der zur Verfügung stehenden DHMs (2 m im DTM-AV) ist es sinnvoll, mindestens die Auflösung des höchstauflösenden Höhenmodells zu wählen.

Die Funktion „Polygon to Raster“ lässt verschiedene Zuordnungsmöglichkeiten der Rasterzellen zu. Ich habe hier die Standardmethode gewählt. Diese ordnet die einzelne Rasterzelle der Parzelle zu, wo sich das Zentrum der Rasterzelle befindet (in „Polygon to Raster“ -> Cell assignment type -> CELL_CENTER). Als Resultat ergibt sich derselbe Parzellenplan, aber als Raster. In dieser Form ist der Parzellenplan bereit für die Implementierung in AVErosion.

3.1.2 Relief

Das Gebietsrelief bildet in dieser Arbeit den wichtigsten und einflussreichsten Bestandteil in der Implementierung von AVErosion. Die Eingabeform des Reliefs in AVErosion ist ein DHM in Rasterformat. Daraus ergeben sich dann die USLE/MUSLE87-Relieffaktoren L und S und der Erosionsschutzfaktor P. Alle anderen Eingabefaktoren stammen von FRIEDLI (2006). Diese kommen unverändert in

der Gleichung zum Einsatz. Nebst der Funktion des DHM, die Grundlage zur Berechnung des Relieffaktors LS sowie des P-Faktors zu sein, nimmt das DHM gleichzeitig auch eine weitere bestimmende Funktion wahr: Die Auflösung der am Ende entstandenen Erosionsgefährdungskarte wird durch die Auflösung des eingesetzten DHM bestimmt (100 m, 25 m, 2 m, je nach DHM). Für diese Arbeit standen digitale Höhenmodelle in drei verschiedenen Auflösungen zur Verfügung:

DHM100

Das DHM100 ist verfügbar beim Bundesamt für Statistik (BFS) als Teil der Dienstleistung GEOSTAT. GEOSTAT stellt verschiedene Schweizerische Geodaten zu Arbeitszwecken zur Verfügung. Unter anderem auch ein Höhenmodell mit 100 m Auflösung (Hektarraster). Das DHM100 ist eine Abwandlung des RIMINI-Höhenmodells (swisstopo). RIMINI entstand durch manuelle Karteninterpretation und ein dadurch erstelltes digitales Raster- und Dreiecksrelief. Die Maschenweite beläuft sich bei RIMINI auf 250 m. Für die Übernahme des Geländemodells in GEOSTAT wurden die Daten des RIMINI-Modells auf die SW-Eckpunkte eines 100 m-Rasters interpoliert. Für die Interpolation wurde eine bikubische Flächenfunktion verwendet. Hierfür wurden für die Berechnung jedes Höhenpunktes dessen 16 nächstgelegenen 250 m-Rasterpunkte miteinbezogen und somit eine Übereinstimmung vorgenommen. Der mittlere Fehler im DHM100 liegt für das Mittelland bei ca. ± 8 m (BFS 2006).

DHM25

Das DHM25 (swisstopo) wurde aus der Landeskarte 1:25'000 abgeleitet und entspricht im Wesentlichen deren Genauigkeit. Das Grundprinzip der Produktion des DHM25 ist die Digitalisierung der Höhenkurven der Landeskarte. Es gibt die Form der rohen Erdoberfläche ohne Bewuchs und Bebauung wieder. Das in dieser Arbeit verwendete Matrixmodell besitzt entsprechend der Bezeichnung eine Maschenweite von 25 m, was einem über die Landeskarte 1:25'000 gelegten Millimeternetz entspricht. Die Genauigkeit beziehungsweise Qualität des DHM25 entspricht derjenigen der Landeskarte 1:25'000. Der mittlere Fehler liegt für das Mittelland bei $\pm 1,5$ m.

Das DHM25 war in den letzten Jahren der Standard für Schweizerische Höhenmodelle. Gegenüber dem ursprünglichen RIMINI-Höhenmodell bietet das DHM25 eine um das zehnfache höhere Genauigkeit bei einer nach wie vor überschaubaren Datenmenge (swisstopo 2005).

DTM-AV

Seit Kurzem bietet swisstopo ein neues, hochpräzises, naturbasiertes digitales Höhenmodell für Höhenbereiche bis 2000 m ü. M. an. Anders als bei den zuvor beschriebenen Höhenmodellen wird das digitale Terrainmodell der Amtlichen Vermessung (DTM-AV) anhand von Laserscans aus Überflügen mit Flugzeugen erstellt. Das DTM-AV (swisstopo) bildet wie das DHM25 (swisstopo) die rohe Erdoberfläche ohne Bebauung und Vegetation wieder. Die Höhengenaugigkeit der Lasermessungen liegt bei ± 30 cm. Auf das ganze Modell betrachtet liegt der mittlere Höhenfehler bei ± 50 cm (swisstopo 2005).

Die swisstopo bietet das DTM-AV unter anderem als Rastermodell mit 2 m Auflösung an. Eine so hohe Genauigkeit bedingt natürlich auch eine umso grössere Datenmenge. Nebst dem erheblich höheren Rechenaufwand ist das Preisniveau zum Bezug und zur Benutzung des DTM-AV im Vergleich zu anderen Höhenmodellen um einiges höher. Mir hat sich die Möglichkeit geboten, das DTM-AV an der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) zu benutzen. So können nebst der Evaluation des Modells auch extrem hoch aufgelöste Erosionsgefährdungskarten erstellt werden. Ich möchte mich an dieser Stelle noch einmal besonders bei den Verantwortlichen an der ART für diese Möglichkeit bedanken.

Abbildung 3.2 (nächste Seite): Gegenüberstellung der verschiedenen, verfügbaren DHM. Abgebildet ist das Hillshade des Untersuchungsgebietes Estavayer, abgeleitet aus dem jeweiligen DHM. Während grobe Geländeformen auch im Hektarraster noch sichtbar sind, nimmt die Genauigkeit und Detailliertheit für kleinere Geländeformen mit höher werdender Auflösung zu. So können im DTM-AV sogar einzelne Kuppen und Mulden identifiziert werden. (Quelle: eigene Darstellung).

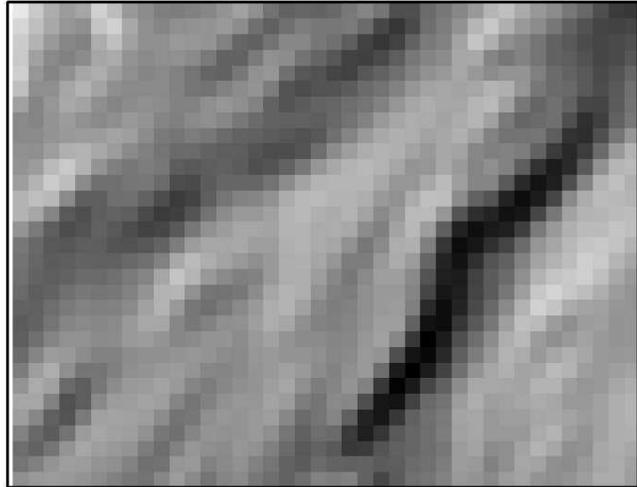
Der Rechenaufwand für die Faktorengenerierung nimmt mit zunehmender Auflösung natürlich zu. So sind beispielsweise für die Karte 1 (DHM100) in der Abbildung 1'600 Pixel zu Berechnen, in Karte 2 (DHM25) steigt diese Zahl bereits auf knapp 26'000, für die Berechnung mit der Karte 3 (DTM-AV) müssen 4'000'000 Pixel verarbeitet werden. Der Rechenaufwand steigert sich vom DHM100 bis hin zum DTM-AV um das 2'500-Fache. Die Untersuchungsgebiete in dieser Arbeit sind eher klein. Für grössere Gebiete, wie zum Beispiel die gesamte Schweiz bei Beispiel FRIEDLI (2006), ist dieser starke Anstieg nicht zu unterschätzen

Karte 1: DHM100

Hillshade vom Untersuchungsgebiet Estavayer, abgeleitet aus DHM100

Grundlage: DHM100 (BFS GEOSTAT)

1:45'000

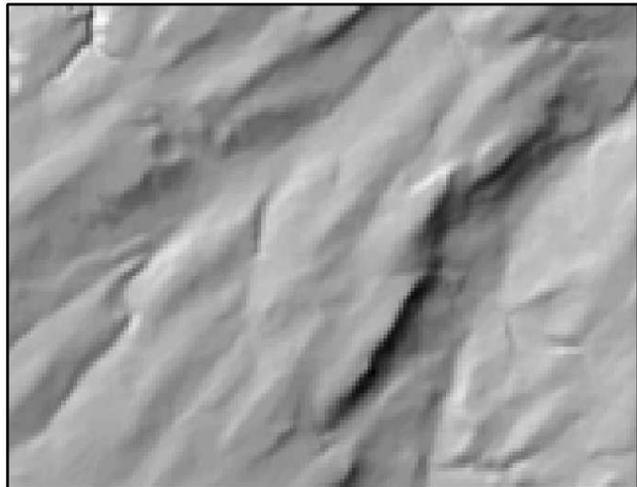


Karte 2: DHM25

Hillshade vom Untersuchungsgebiet Estavayer, abgeleitet aus DHM25

Grundlage: DHM25 (swisstopo)

1:45'000

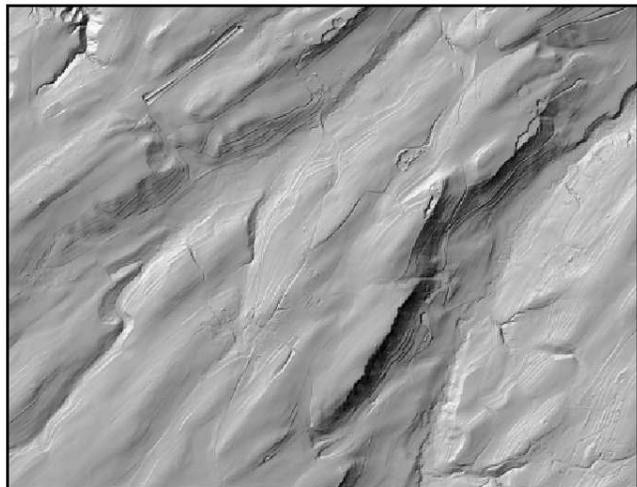


Karte 3: DTM-AV

Hillshade vom Untersuchungsgebiet Estavayer, abgeleitet aus DTM-AV

Grundlage: DTM-AV (swisstopo)

1:45'000



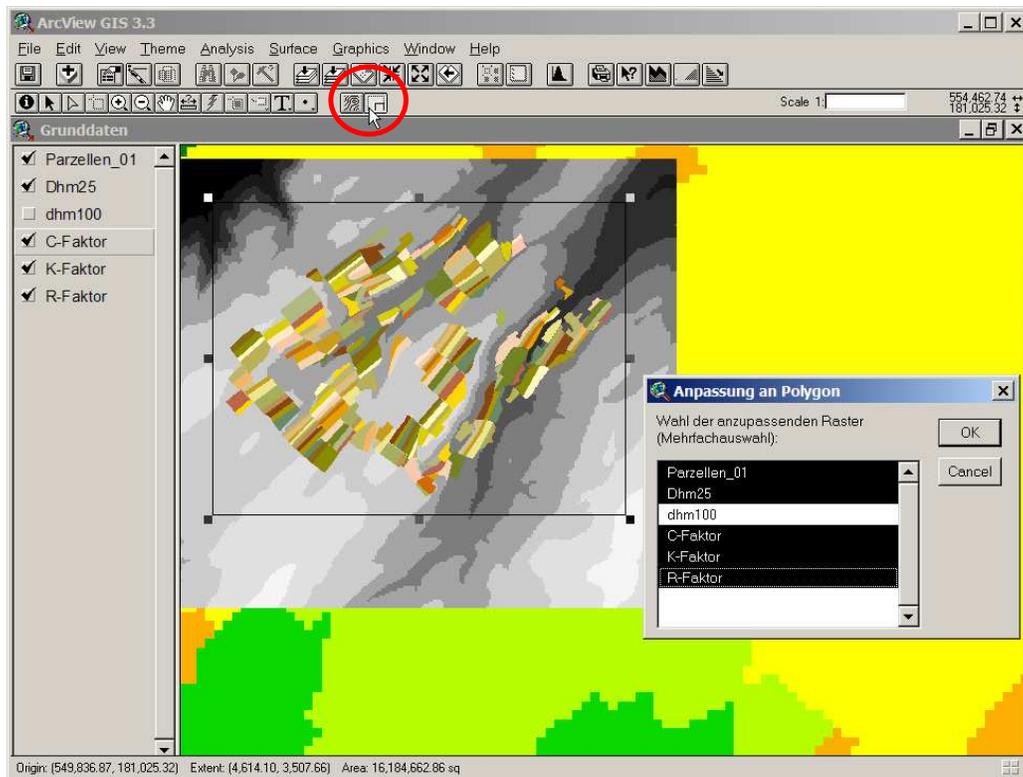
3.2 Ausschneiden und Anpassen von Rasterdateien

Rasterdateien, welche zur Berechnung der Bodenerosion benutzt werden, müssen eine einheitliche Zellengröße und eine einheitliche Ausdehnung haben. Sollte dies nicht der Fall sein, dann wird die gesamte Berechnung der Bodenerosion fehlerhaft (SCHÄUBLE 2005)

Bevor AVErosion angewendet werden kann, müssen alle benötigten Raster auf eine einheitliche Bezugsebene gebracht werden. Hierfür befindet sich in der Extension ein kleines Tool. Die Funktion „TLL Ausschneiden“ dient zum automatischen Ausschneiden und Anpassen beliebig vieler Raster in ein einheitliches Format. Um sich ein Bild davon machen zu können, illustriert Abbildung 3.3 den Vorgang.

Abbildung 3.3: Funktion TLL Ausschneiden in AVErosion. Zu sehen ist das gezogene Rechteck, welches die Ausdehnung der Berechnung festlegt. Im aktivierten Fenster können die Layer ausgewählt werden

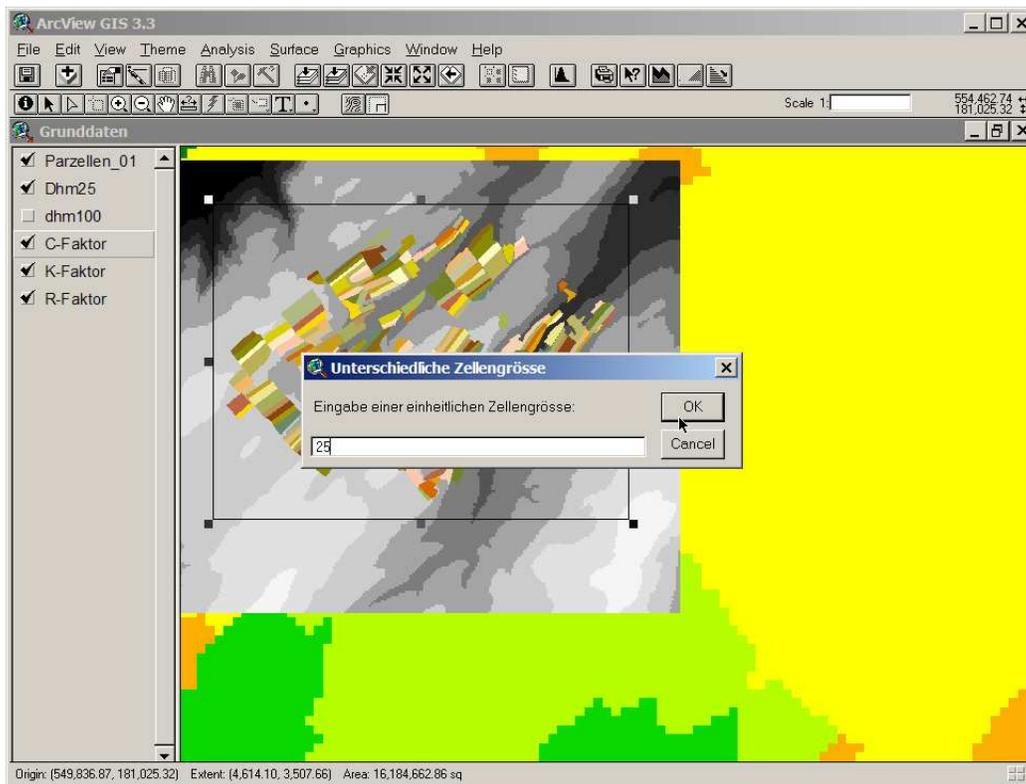
(Quelle: eigene Darstellung, Ausschnitt aus dem GIS ArcView 3.3 mit Extension AVErosion).



Nachdem die Ausdehnung der zu berechnenden Fläche gezogen ist, fragt AVErosion nach der Zellengröße der beabsichtigten Modellierung. Genau hier kommt die Wichtigkeit des DHM zum tragen. Die gewählte Rastergröße entspricht jeweils der des eingesetzten DHM (100, 25, oder 2).

Abbildung 3.4: In einem zweiten Schritt kann die einheitliche Zellengröße der Berechnung festgelegt werden (hier 25, zu sehen im aktivierten Fenster).

(Quelle: eigene Darstellung, Ausschnitt aus dem GIS ArcView 3.3 mit Extension AVErosion)



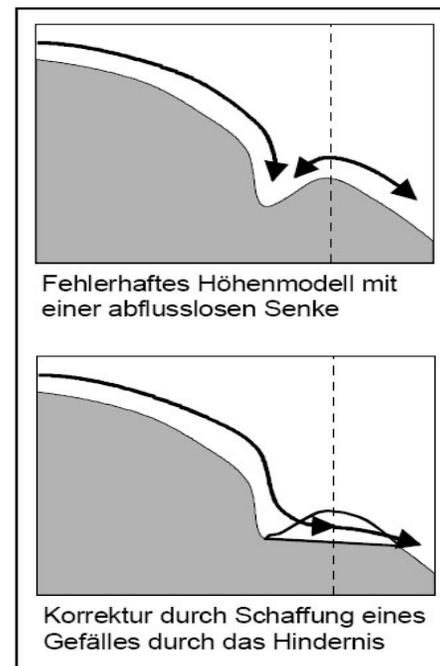
3.3 Untersuchung und Korrektur des verwendeten digitalen Höhenmodells

Zur Sicherstellung der hydrologischen Korrektheit der verwendeten Höhenmodelle (wichtig bei der Berechnung des LS-Faktors) wurde in AVErosion eine automatische Funktion integriert. Diese untersucht ein Höhenmodell auf hydrologisch wirksame Fehler (abflusslose Senken, ebene Flächen, unterbrochene Fließwege, etc.) und korrigiert diese gegebenenfalls. SCHÄUBLE (2005) erklärt das Grundprinzip mit drei aufeinander folgenden Schritten:

- **Schritt 1:** Untersuchung eines Höhenmodells nach abflusslosen Senken und ebenen Flächen (= hydrologische Fehler in einem DEM)
- **Schritt 2:** Beim Vorhandensein hydrologischer Fehler erfolgt die Korrektur des DHMs in Schritt 3, sonst keine Aktion.
- **Schritt 3:** Korrektur des Höhenmodells durch die Schaffung eines leichten Gefälles durch jedes Hindernis. Dabei wird das Höhenmodell nur sehr geringfügig verändert, da das künstliche Gefälle ausschließlich am Hindernis existiert und weniger als 0,002 % beträgt.

Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der DHM-Korrektur.

(Quelle: SCHÄUBLE 2005)



Bei hydrologischer Korrektheit des Höhenmodells bleibt das DHM unverändert. Im Falle von hydrologisch wirksamen Fehlern wird ein neues, angepasstes Höhenmodell ohne Abflusssenken berechnet und ins ArcView-Projekt eingefügt.

3.4 Faktorengenerierung

Die USLE als Grundlagenmodell wurde im Kapitel 2.3 vorgestellt. Um die USLE/MUSLE87 in AVErosion anwenden zu können, müssen die entsprechenden Faktoren digital vorhanden sein oder erst erstellt werden. Selbst berechnen kann AVErosion die Relieffaktoren L und S sowie den Bearbeitungsfaktor P. Die anderen Faktoren müssen entweder selbst erhoben oder von anderen Quellen übernommen werden. In dieser Arbeit werden die restlichen Faktoren von FRIEDLI (2006) übernommen.

3.4.1 R-Faktor [$N \cdot h^{-1}$]

Der R-Faktor wurde direkt aus der Arbeit von FRIEDLI (2006) übernommen. Im Folgenden gebe ich eine kurze Beschreibung über den Hergang der R-Faktoren-Karte. Detaillierte Angaben finden sich in FRIEDLI (2006):

Nach ROGLER & SCHWERTMANN (1981) kann der R-Faktor mit folgender Regressionsgleichung über die mittleren Jahresniederschläge berechnet werden:

$$R = 0.083 * N - 1.77 \quad (N = \text{mittlere Jahresniederschläge})$$

Diese Grundgleichung wurde von FRIEDLI (2006) geringfügig verändert, um sie besser auf die Verhältnisse des Schweizer Mittellandes anzupassen.

Anpassen der Gleichung

Die mittleren Jahresniederschlagswerte wurden bereits im Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) auf ein Kilometerraster interpoliert. FRIEDLI (2006) hat über ein einfaches Interpolationsverfahren die HADES-Daten in ein Hektarraster disaggregiert.

Um den Niederschlagsfaktor zu verbessern, wurden nebst der Disaggregation zwei weitere Aspekte berücksichtigt und in die Umrechnung einbezogen:

- *Schneeabminderung*

Da Niederschlag in Form von Schnee im Moment der Ablagerung keine erosive Wirkung hat, hat FRIEDLI (2006) die Niederschlagsmenge um den Schneeanteil korrigiert.

FRIEDLI (2006) hat einzelnen Messstationen einen nach SCHUEPP (1975) prozentualen Schneeanteil pro Jahr zugewiesen. Die daraus resultierende Regressionsgleichung wurde in die Faktorrechnung eingefügt:

$$R = 0.083 * N * [1 - (0.0264 * h - 2.0663) / 100] - 1.77$$

Mit: R = Niederschlagserosivitätsfaktor

N = Niederschlagsmenge (mittl. jährl. korr. Niederschlagshöhen)

h = Höhe über Meer [m]

3. Modellberechnung

- *Extreme Punktniederschläge*

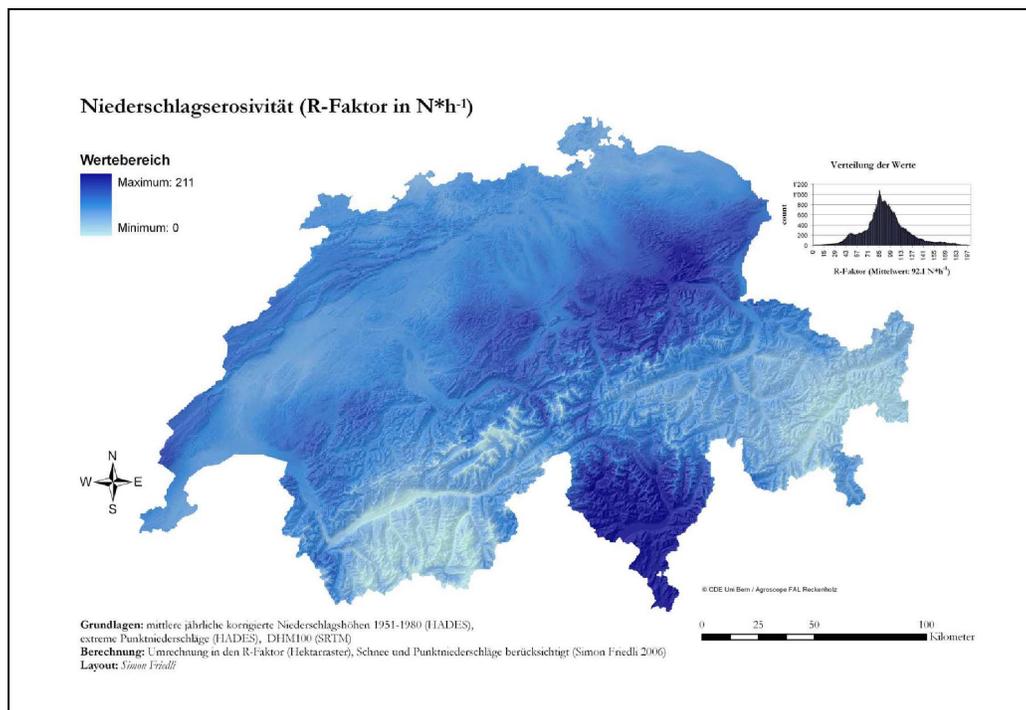
Im HADES sind Datensätze zu Starkniederschlägen der ganzen Schweiz verfügbar. FRIEDLI (2006) hat aus den Datensätzen zu Starkniederschlägen der ganzen Schweiz die stündlichen Starkniederschläge mit einer Wiederkehrperiode von 2.33 Jahren benutzt und im ArcGIS implementiert. Dabei haben Gebiete mit grossen Starkniederschlägen einen direkten Zuschlag auf den R-Faktor erhalten. Die Zuschläge erfolgten nach dem Schema in Tabelle 3.1:

Tabelle 3.1: Zuschläge auf den R-Faktor auf der Basis von stündlichen extremen Punktniederschlägen mit einer Wiederkehrperiode von 2.33 Jahren (HADES) (Quelle: FRIEDLI 2006).

Niederschlagsmenge	Zuschläge
12-13 mm	Keinen Zuschlag [Faktor: 1]
14-40 mm	Zuschlag linear von 0-20% [Faktor: $(\text{Wert}-13) \cdot [0.2/27]+1$]
Ab 40 mm	Konstanter Zuschlag von 20% (Faktor: 1.2)

Als Resultat erhielt FRIEDLI (2006) eine schweizweite Karte der R-Faktoren im Hektarraster, ersichtlich in Abbildung 3.6.

Abbildung 3.6: R-Faktor für die Schweiz im Hektarraster (Quelle: FRIEDLI 2006).



3.4.2 K-Faktor [$\text{kg}\cdot\text{h}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$]

Der K-Faktor wurde direkt aus der Arbeit von FRIEDLI (2006) übernommen. Der K-Faktor beschreibt die durchschnittliche, mittlere Erosionsanfälligkeit eines Bodens über mehrere Jahre (PRASUHN 1991). Die Einheiten des K-Faktors ($\text{kg}\cdot\text{h}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) sind nicht physikalisch begründet.

Um den K-Faktor zu bestimmen, wären Bodenanalysen notwendig, die über die genaue Korngrössenzusammensetzung des einzelnen Bodentypen Auskunft geben. Bodenanalysen sind aufwändig und teuer. Aus diesem Grund hat FRIEDLI (2006) den K-Faktor aus einem Verschnitt der Informationen der digitalen Bodeneignungskarte 1:200'000 (BFS 2000) und den Körnungsangaben der verfügbaren Bodenkarten 1:25'000 (PEYER, 13 Exemplare, versch. Jahre) berechnet. FRIEDLI (2006) beschreibt die Generierung der K-Faktorenkarte folgendermassen:

Die Attributtabelle aus der digitalen Bodeneignungskarte wurde in einem ersten Schritt exportiert und mit den Beschreibungen zu den einzelnen Kartiereinheiten aus dem Handbuch ergänzt. Als Informationskategorien wurden die Spalten „Formelement der Landschaft“, „Skelettgehalt“ und „Wasserdurchlässigkeit“ verwendet. In einer zusätzlichen Spalte wurde nach Handbuch zur digitalen Bodeneignungskarte 1:200'000, Seite 51ff. (EJPD 1980) bei den entsprechenden Einheiten die Angaben tonig, siltig, organisch angefügt. In einem weiteren Schritt wurden die Kartiereinheiten aus der digitalen Bodeneignungskarte in den Bodenkarten 1:25'000 (PEYER K., 13 Exemplare, versch. Jahre) gesucht, einer Bodeneinheit in der entsprechenden Bodenkarte zugeordnet und deren Informationen zu Textur in einer weiteren Spalte erfasst. Da die erwähnten Bodenkarten hauptsächlich Gebiete des Mittellandes abdecken und der grösste Teil der Ackerflächen im Mittelland liegen, kann wenigstens in diesem Gebiet eine höhere Dichte an Informationen erzielt werden (FRIEDLI 2006).

Anhand der zusammengestellten Tabelle wurden Erodibilitätsklassen von 1 (sehr gering) bis 5 (sehr hoch) ausgeschieden. Die Einteilung der Böden in die Klassen wird im Folgenden grob beschrieben. Dabei ist zu bemerken, dass bei den Einteilungen ab Klasse 2 die Bodenkarten 1:25'000 mit ihren Kurzbezeichnungen für Bodentypen eine ganz entscheidende Rolle spielen:

Klasse 1: extrem skelettreiche Böden mit übermässiger Wasserdurchlässigkeit

Klasse 2: toniger Lehm bis Ton (Kurzbez. Bodenkarten 1:25'000)

Klasse 3: sandiger Lehm bis Lehm (Kurzbez. Bodenkarten 1:25'000)

Klasse 4-5: schluffreiche Böden (Kurzbez. Bodenkarten 1:25'000)

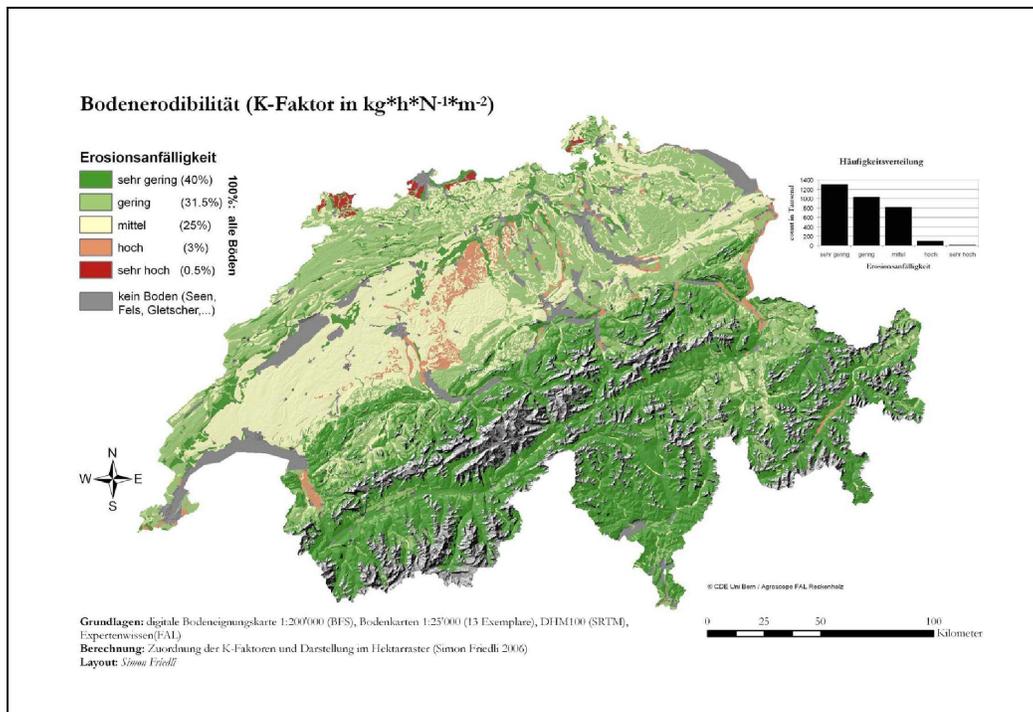
Im Hinblick auf die Berechnungen innerhalb des verwendeten Modells wurden diesen Klassen Wertebereiche zugeteilt. Aus den Wertebereichen wurde der Mittelwert als Berechnungsgrundlage extrahiert. FRIEDLI (2006) hat in seiner Arbeit die folgende Klassenunterteilung (Tabelle 3.2) gemacht und für die K-Faktorkarte genutzt.

Tabelle 3.2: Einteilung der K-Faktoren in Klassen (Gefährdungsstufen). Qualitative Bezeichnungen der einzelnen Klassenbreiten und der Mittelwerte für die quantitative Berechnung mit dem Modell (Quelle: FRIEDLI 2006).

Qualitative Angabe	Quantitative Angabe	Mittelwert (kg*h*N⁻¹*m⁻²)
Sehr gering (1)	0.11-0.20	0.15
Gering (2)	0.21-0.30	0.25
Mittel (3)	0.31-0.40	0.35
Hoch (4)	0.41-0.50	0.45
Sehr hoch (5)	0.51-0.60	0.55

FRIEDLI (2006) hat so eine grobe, aber homogene Karte mit K-Faktoren für die Schweiz hergestellt. Für eine detailliertere Karte fehlen einerseits die Kenntnisse über die genaue Zusammensetzung der einzelnen Böden, um die Faktoren nach WISCHMEIER & SMITH (1978) bzw. nach SCHWERTMANN et al. (1990) zu berechnen, andererseits fassen die betrachteten Kartierungseinheiten der Bodeneignungskarte 1:200'000 relativ grosszügig Bodeneinheiten zusammen und geben Bodenkomplexe anstelle der exakten Verbreitung der einzelnen Bodentypen wieder.

Abbildung 3.7: K-Faktor für die Schweiz (Quelle: FRIEDLI 2006).



3.4.3 C-Faktor [dimensionslos]

Der C-Faktor gibt die relative Veränderung des Bodenabtrags bei einer bestimmten Bewirtschaftung gegenüber dem Abtrag bei langjähriger Schwarzbrache unter sonst gleichen Bedingungen an. (PRASUHN & GRÜNIG 2001:38)

Der C-Faktor wurde direkt von FRIEDLI (2006) übernommen. Für die Berechnung hat FRIEDLI (2006) folgende Berechnungsvariante verwendet:

PRASUHN & GRÜNIG (2001), PRASUHN & MOHNI (2003) und RUETTIMANN (2005) haben kulturspezifische C-Faktoren für das Schweizer Mittelland berechnet. Die Berechnung dieser kulturspezifischen C-Faktoren erfolgte gemäss SCHWERTMANN et al. (1990) für die einzelne Kultur von Saat bis Ernte (siehe Tabelle 3.3). In diesem Verfahren werden nebst der Bodenbearbeitungsmethode die Summenprozente der R-Faktor-Anteile mitberücksichtigt.

Tabelle 3.3: Kulturspezifische C-Faktoren mit repräsentativen Brachewerten in Prozent (vgl. PRASUHN & MOHNI 2003). (Quelle: FRIEDLI 2006)

C-Faktor	Kultur	Brache (%)	Erläuterungen
0.200	Rebbau	0	Durchschnitt der Werte bei Ertragsanlagen mit Schutzmassnahmen (verschiedene) nach AUERSWALD 2002
0.100	Gartenbau	0	Produktionsflächen für Gemüse, Gemüsesetzlinge, Schnittblumen, Zierstauden und Topfpflanzen im Freien, in Gewächshäusern oder unter Folientunnels. Sowie mehrjährige Beerenkulturen, die Baum- und Rebschulen, Christbaumkulturen, ausserhalb des Wald liegende Pflanzgärten und Forstbetriebe und der gartenbauliche Teil von Landschaftsgärtnereien (PRASUHN & MOHNI 2003)
0.194	Körnermais	20	nach RUETTIMANN 2005 (unveröffentlicht)
0.199	Silomais	3	Brache: da Mais erst im Mai gesät wird, liegt im Winter oft Kunstweise vor (daher nur 3% Flächenanteil Brache); nach RUETTIMANN 2005 (unveröffentlicht)
0.245	Gemüse	30	Berechnung für Friesenberg ergibt einen C-Faktor von 0.245, da gemeindeweise Berechnung, Hanglage nicht berücksichtigt (PRASUHN & GRÜNIG 2001)
0.137	Rüben, restl. Hackfrüchte	30	entspricht dem C-Faktor für Zuckerrüben; nach RÜTTIMANN 2005 (unveröffentlicht) (0.134), um 20% erhöhte Erosion (0.147) wegen Walze (entsprechend dem Anteil verrechnet)
0.097	Kartoffeln	20	Schnitt von Saatkartoffeln und Kartoffeln für die Konsumation; nach RUETTIMANN 2005 (unveröffentlicht) (entsprechend dem Anteil verrechnet)
0.110	Winterbrache		C-Faktor berechnet für den Zeitraum der Rüben (15. Okt. – 1. Apr.) (Kartierschlüssel Erosion: MOSIMANN & RUETTIMANN 1999)
0.092	Winterweizen	3	nach RUETTIMANN 2005 (unveröffentlicht) (0.086) um 25% erhöhte Erosion (0.108) wenn nach Hackfrüchten gepflanzt (entsprechend dem Anteil verrechnet)
0.029	Sommerweizen	3	nach RUETTIMANN 2005 (unveröffentlicht)
0.086	Futterweizen	3	wie Winterweizen nach RUETTIMANN 2005 (unveröffentlicht)
0.028	Gerste	3	PRASUHN & GRÜNIG 2001
0.045	Roggen	3	PRASUHN & GRÜNIG 2001
0.041	Triticale	3	nach RUETTIMANN 2005 (unveröffentlicht)
0.050	Hafer	3	nach RUETTIMANN 2005 (unveröffentlicht) (Schnitt von Sommer- zu Winterhafer)
0.054	Dinkel, übrige Getreide	3	PRASUHN & GRÜNIG 2001
0.054	Ackerbohne (Sommer)	0	nach RUETTIMANN 2005 (unveröffentlicht)
0.080	Eiweisserbsen	0	PRASUHN & GRÜNIG 2001
0.100	Andere Kulturen	20	Annahme: Mittelwert aus verschiedenen Kulturen (PRASUHN (interne Angabe))
0.003	Bunbrache	0	PRASUHN & GRÜNIG 2001
0.100	Rotationsbrache	0	PRASUHN & GRÜNIG 2001
0.060	Raps	3	PRASUHN & GRÜNIG 2001
0.008	Kunstweise	0	Annahme: die Kunstweisen sind meist dreijährig, teilweise zweijährig, daher Berechnung des durchschnittlichen C-Faktors über zwei einhalb Jahre

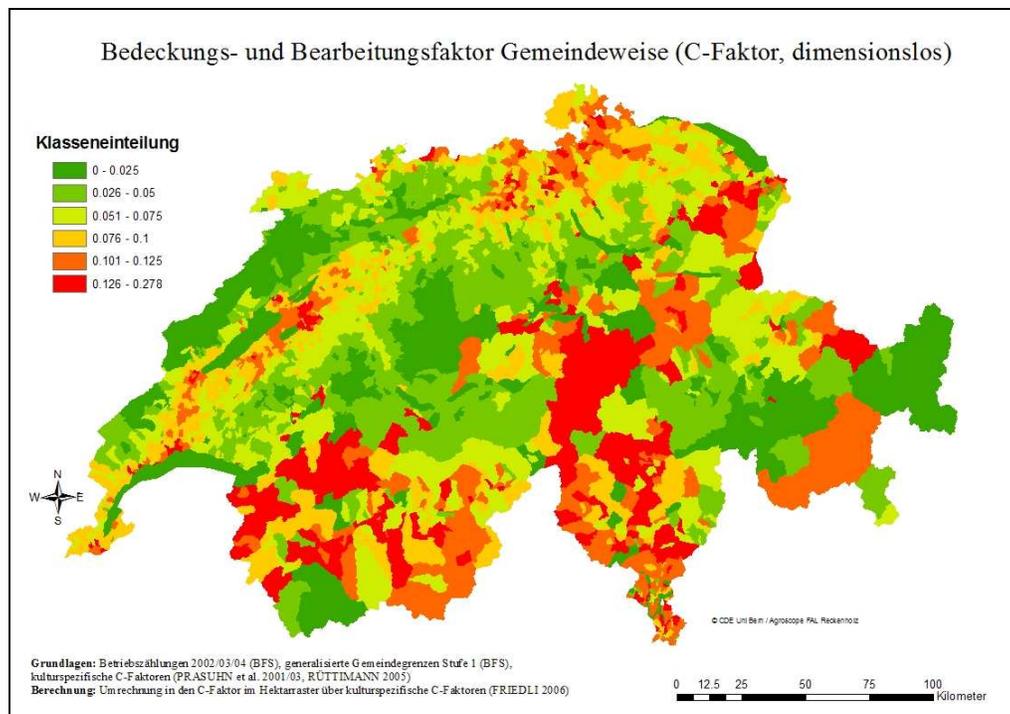
Für jede Gemeinde wurde entsprechend den prozentualen Kulturanteilen gemäss Betriebszählungsdaten 2002/03/04 (BFS 2002/03/04) der C-Faktor über ein additives Verfahren berechnet. Für brach liegende Felder wurde je nach Kultur ein Brachefaktor zugeordnet.

Bei der Berechnung wurde nur der konventionelle Anbau mit Pflug berücksichtigt. Die Untersuchungsgebiete dieser Arbeit sind relativ klein und umfassen jeweils nur eine bis zwei Gemeinden. Dementsprechend ist der C-Faktor bei diesem Ansatz für die meisten Parzellen innerhalb eines Gebietes einheitlich. Für schlagbezogene Berechnungen müssten die C-Faktoren anhand der schlagspezifischen Fruchtfolgen berechnet werden. Dabei müsste auch das Bodenbearbeitungsverfahren berücksichtigt werden.

Mit dieser Methode werden für die Gesamtschweiz die gleichen kulturspezifischen C-Faktoren eingesetzt, was gemäss Schlüssel zur Abschätzung und Beurteilung von Bodenerosion in der Praxis von MOSIMANN & RUETTIMANN (1995, 1996a, 1996b, 1999) nicht unproblematisch ist (FRIEDLI 2006).

Abbildung 3.8: C-Faktoren für die Schweiz, Gemeindeweise.

(Quelle: FRIEDLI 2006, leicht abgeändert)



3.4.4 L-Faktor [dimensionslos]

Der L-Faktor bildet die erste Komponente des oft gemeinsam beschriebenen Relief-faktors LS. Er beschreibt die so genannte erosive Hanglänge. Dies ist die Hanglänge, ab der Oberflächenabfluss auftritt, bis zu jenem Punkt, an dem Sedimentation

einsetzt oder der Abfluss kanalisiert wird. AVErosion berechnet den L-Faktor unter Verwendung des DHM nach der Formel von RENARD et al. (1997):

- L-Faktor:

$$\beta = (\sin\Theta/0.0896)/[3*(\sin\Theta)^{0.8}+0.56] \quad (\beta\text{-Wert zur Berechnung von } m)$$

$$m = \beta/(1 + \beta) \quad (m\text{-Wert})$$

$$L = (\lambda^{m+1} - \lambda_{i-1}^{m+1}) / (\lambda_i - \lambda_{i-1}) * 22.13^m \quad (L\text{-Faktor, Zellengenau})$$

Mit: β = Anfälligkeit für Rillenerosion. Diese wächst mit steigender Neigung

Θ = Hangneigung in Grad [°]

m = Hanglängenexponent, der das Verhältnis von Rillen- zu flächenhafter Erosion angibt

λ = maximale Fließlänge im m (=USLE)

oder

Grösse des Einzugsgebietes in Zahl der akkumulierten Zellen*Zellengrösse in m (=MUSLE87)

AVErosion unterscheidet die Berechnung von L, je nachdem ob der User die USLE oder MUSLE87-Berechnungsmethode wählt (siehe Kap. 2.3.1 & 2.3.2). Abbildung 2.6 (S. 21) zeigt den deutlichen Unterschied zwischen den Berechnungen, wenn mit hoch auflösenden Daten gearbeitet wird.

3.4.5 S-Faktor [dimensionslos]

Der S-Faktor beschreibt den Einfluss der Hangneigung auf die Erosion. Die Abtrags-schätzung reagiert äusserst sensibel auf die Hangneigung. Auch hier verwendet AVErosion die Bestimmungsformel von RENARD et al. (1997). Es werden für die Berechnung zwei Formeln verwendet, eine für flachere Partien bis 9 % Neigung, eine für steilere Partien. Die Grenze der Formeln, also 9 % Neigung, ergibt genau einen S-Faktor von 1. Im Folgenden die Formeln zur Bestimmung des S-Faktors:

- S-Faktor:

$$S_{\text{flach}} = 10.8 * \sin\Theta + 0.03 \quad S\text{-Wert für Neigungen } < 9\% \text{ (bzw. bis } 5.14^\circ)$$

$$S_{\text{steil}} = 16.8 * \sin\Theta - 0.5 \quad S\text{-Wert für Neigungen } \geq 9\% \text{ (bzw. ab } 5.14^\circ)$$

Mit: Θ = Hangneigung in Grad [°]

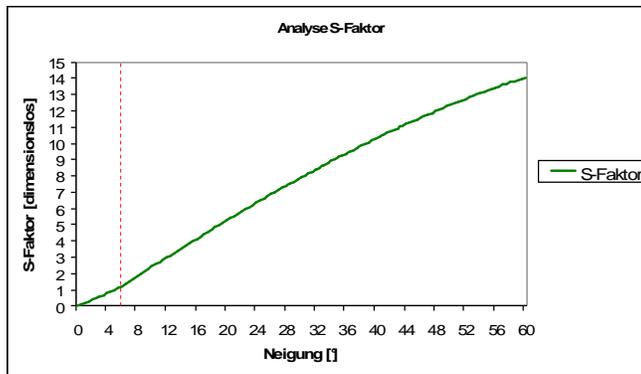


Diagramm 3.1: Verhalten des S-Faktors in Bezug zur Hangneigung. Aufgrund der Berechnung mit Sinus nimmt der S-Faktor nicht linear mit der Neigung zu. Die Zunahme des S-Faktors schwächt sich mit zunehmender Neigung leicht ab. (Quelle: eigene Darstellung)

Die Relieffaktoren werden oft zusammengefasst als LS-Faktor beschrieben. Da AVErosion diese Faktoren einzeln berechnet und ausgibt, sind hier analog dazu die Faktoren getrennt beschrieben. Miteinander multipliziert spiegelt der Layer als LS-Faktor im GIS das Gebietsrelief wieder.

3.4.6 P-Faktor [dimensionslos]

Im Erosionsschutzfaktor P werden die Schutzwirkungen von Kontur- und Streifennutzung quantifiziert. Der P -Faktor gibt das Verhältnis des Bodenabtrags bei Anwendung von Schutzmassnahmen zu dem ohne Massnahmen an (SCHWERTMANN et al. 1990; 53).

Konturnutzung ist die Bearbeitung der Ackerfläche entlang der Höhenlinien. Bei der Streifennutzung wird eine dichte Kultur (z. B. Wintergerste oder Kunstwiese) in einem Querstreifen von ca. 1 bis 2 Meter alle 20 bis 40 Meter höhenlinienparallel eingesät. Laut FRIEDLI (2006) kommt in der Schweizer Landwirtschaft oft eine Mischform zwischen Quer- und Längsbearbeitung vor.

Der P -Faktor bewegt sich theoretisch im Wertebereich zwischen 0 und 1. In seiner Arbeit hat FRIEDLI (2006) einen pauschalen P -Wert von 0.88 für die ganze Schweiz eingesetzt. Der Wert stammt von Untersuchungen von PRASUHN & GRÜNIG (2001) und kam durch Feldberechnungen nach AUERSWALD (1992) im Raum Frienisberg zustande. AVErosion berechnet den P -Faktor in Abhängigkeit der Hangneigung. Im Folgenden die Formeln zur Berechnung des P -Faktors nach SCHÄUBLE (2005):

3. Modellberechnung

$$P_{\text{vorl}} = 0.4 + 0.02 \cdot \theta \quad (\text{vorläufiger P-Faktor})$$

[Regressionsformel mit $r^2 = 0.96$, berechnet aus Reklassifizierungsschablone der DIN 19708: 2003-05]

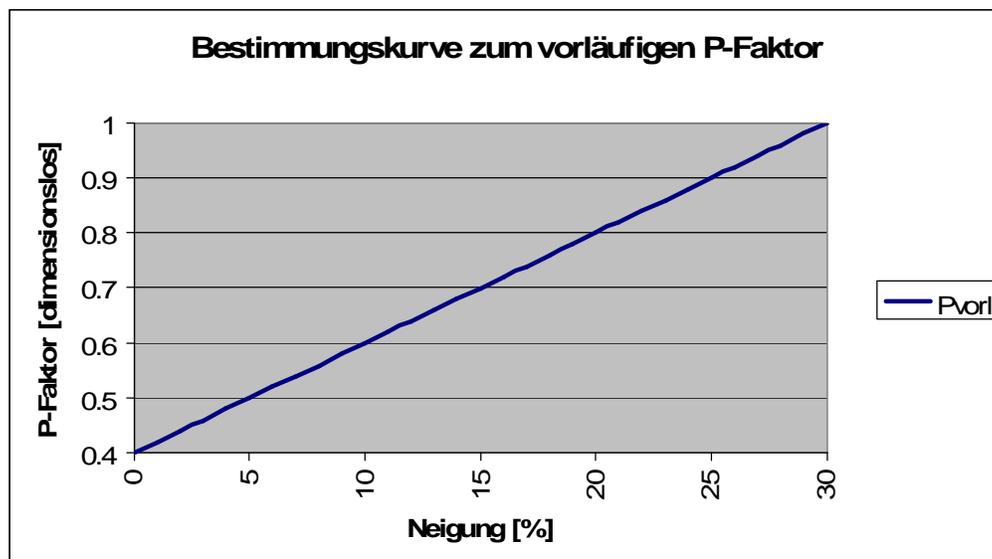
$$HL_{\text{krit}} = 170 \cdot e^{-0.13 \cdot \theta} \quad (\text{kritische Hanglänge})$$

$$P = HL_{\text{real}} < HL_{\text{krit}}, \text{ dann } P_{\text{vorl}} \text{ ansonsten } 1 \quad (\text{P-Faktor})$$

Mit: θ = Hangneigung in %

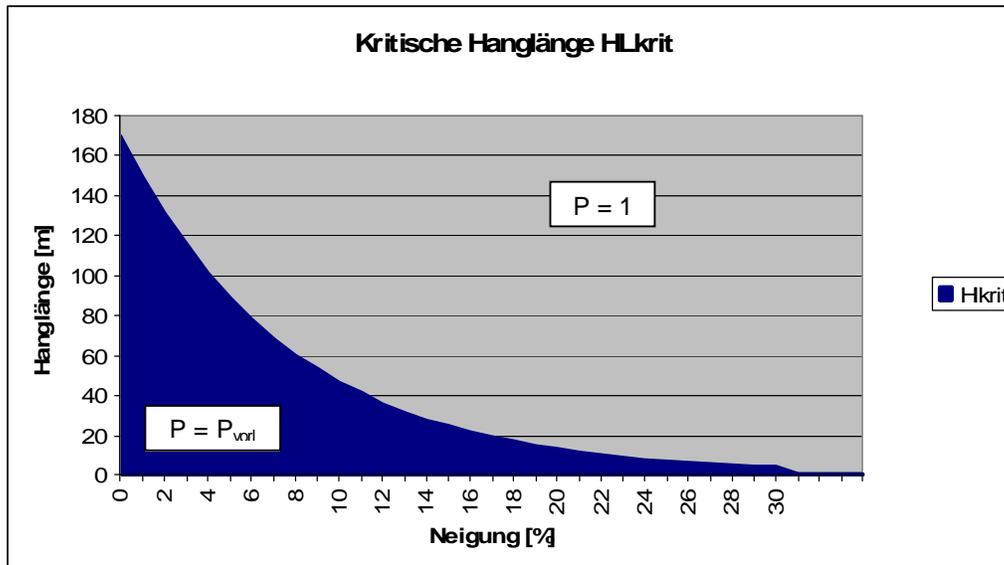
Der P-Faktor bewegt sich somit bei AVErosion in einem Bereich von 0,4 bis 1. Des Weiteren können für Hangneigungen über 30% nur noch P-Faktoren von 1 gesetzt werden (siehe Diagramm 3.2), da P_{vorl} sonst P-Werte angibt, die grösser als 1 sind.

Diagramm 3.2: P_{vorl} in Bezug zur Hangneigung (Quelle: eigene Darstellung).



Bei wendender Bodenbearbeitung kann hangparallele Bewirtschaftung (Konturnutzung, Streifennutzung) erheblich zur Senkung des Bodenerosionsrisikos beitragen. Über eine Verringerung des P-Faktors (P dann < 1) geht dies in das Modell ein. Voraussetzung dafür, dass sich eine Konturnutzung erosionsmindernd auswirken kann, ist, dass eine von der Hangneigung abhängige kritische Hanglänge HL_{krit} nicht überschritten wird (SCHWERTMANN et al. 1990, DIN 19708: 2003-05). Das Diagramm 3.3 zeigt die Bestimmungskurve für die kritische Hanglänge.

Diagramm 3.3: kritische Hanglänge in Bezug zur prozentualen Hangneigung. Ist die Länge des Untersuchten Hanges kürzer als HL_{krit} , so kommt P_{vor} zum Einsatz (blauer Bereich), ansonsten gilt $P = 1$ (Quelle: eigene Darstellung).



Nach oben genannten Schritten und Berechnungen kann nun die Bodenerosionsmodellierung nach USLE/MUSLE87 durchgeführt werden.

3.5 Berechnung der Bodenerosionsgefährdung

Bei der Berechnung der Bodenerosionsgefährdung stehen verschiedenen Optionen zur Verfügung. Nachfolgend eine Auflistung der Möglichkeiten bei der Bodenerosionsberechnung mit AVErosion:

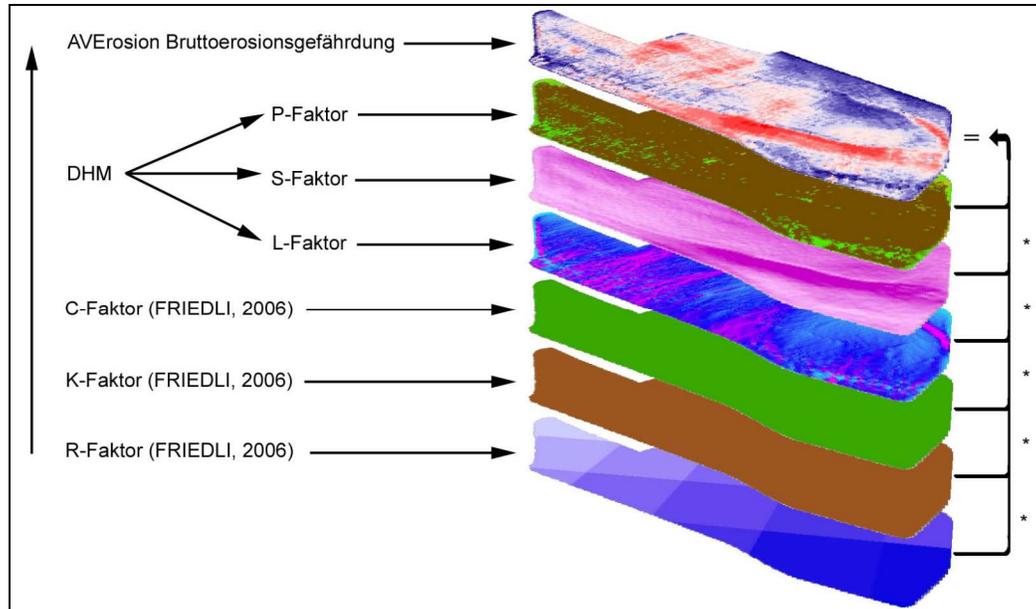
- AVErosion lässt den Benutzer das Erosionsmodell wählen. Zur Auswahl stehen die traditionelle USLE und die abgewandelte Form MUSLE87.
- Die Berechnungsschritte, welche AVErosion durchgeht, können optional als zusätzliche Datenlayer eingefügt werden. Dies betrifft im Besonderen die Zwischenschritte bei der Berechnung des L- und S-Faktors und des P-Faktors.
- Beim zusätzlichen Einbezug von einem Parzellennetz in die Modellierung berechnet AVErosion nebst einer Rasterzellengenauen Bodenerosionsmodellierung auch ein zweites Resultat, welches für jede Parzelle einen Mittelwert angibt (schlagbezogene Modellierung).

3. Modellberechnung

Einen Überblick über die Berechnung der Bodenerosionsgefährdung bietet die Abbildung 3.9. Hier ist schematisch dargestellt, wie die verschiedenen Faktorenlayer gleichen Ausmasses übereinander gelegt und miteinander multipliziert werden.

Abbildung 3.9: Schematische Darstellung einer Berechnung der Bodenerosionsgefährdung in AVErosion. Die Faktoren R, K, und C sind jeweils im Hektarraster. Die vom DHM abhängigen Faktoren L, S und P sind in der Auflösung des eingesetzten DHM.

(QUELLE: eigene Darstellung, Layer erstellt mit AVErosion)



4. Gebietsbeschreibung

Die ausgewählten Gebiete, in denen AVErosion zum Einsatz kommen soll, sind entweder Untersuchungsgebiete der ART oder Bestandteil der COST-Aktion 634. Im Rahmen dieses Projektes hat das CDE zwei Dissertationen ausgeschrieben. Nebst den Dissertationen bietet das Projekt genug Raum für diverse Master- und Bachelorarbeiten. Von diesen ist diese Diplomarbeit ein Bestandteil.

Die drei Gebiete, in denen AVErosion angewendet werden soll:

- Estavayer-le-Lac (FR)
- Oberaargau (BE)
- Frienisberg (BE)

Die drei Untersuchungsgebiete wurden so gewählt, dass wichtige Unterschiede in der Schweizer Landwirtschaft wie die natürlichen und kulturellen Landschaftstypen, unterschiedliche Mentalitäten (französisch-, deutschsprachiger Raum), Bodenbearbeitungsmethoden und Gesetzgebungen betreffend dem Bodenschutz in Betracht gezogen und abgedeckt werden können. Weitere Gründe für die Gebietsauswahl sind die Verfügbarkeit von Daten aus vorhergehenden Untersuchungen, Gebietszugänglichkeit und bestehende Beziehungen zu lokalen Akteuren (LEDERMANN et al. unveröffentlicht). Alle drei Untersuchungsgebiete sind nördlich des Alpenbogens im Schweizer Mittelland, der landwirtschaftlichen Hauptzone des Landes, gelegen. Die Grenzen der Untersuchungsgebiete (Parzellennetze) wurden jeweils so gewählt, dass möglichst kein Siedlungsraum und Wald beinhaltet sind. Als Grundlage der Berechnungen dient daher jeweils ein aktueller Parzellenplan, der nur landwirtschaftliche Nutzflächen beinhaltet.

Die Gesamtheit der in dieser Arbeit zu berechnenden Fläche beläuft sich auf 1040 Hektaren, aufgeteilt in 653 Einzelparzellen. Das gibt eine durchschnittliche Parzellengrösse von 1.6 ha. Die durchschnittliche Grösse eines landwirtschaftlichen Betriebes beläuft sich in der Schweiz auf 16.7 ha (BFS 2005). Im Vergleich zu anderen Europäischen Ländern ist die Betriebs- und Parzellengrösse in der Schweiz eher klein (LEDERMANN et al. unveröffentlicht).

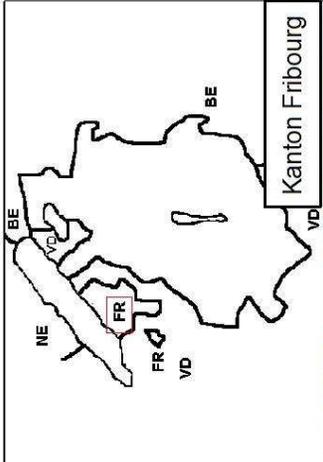
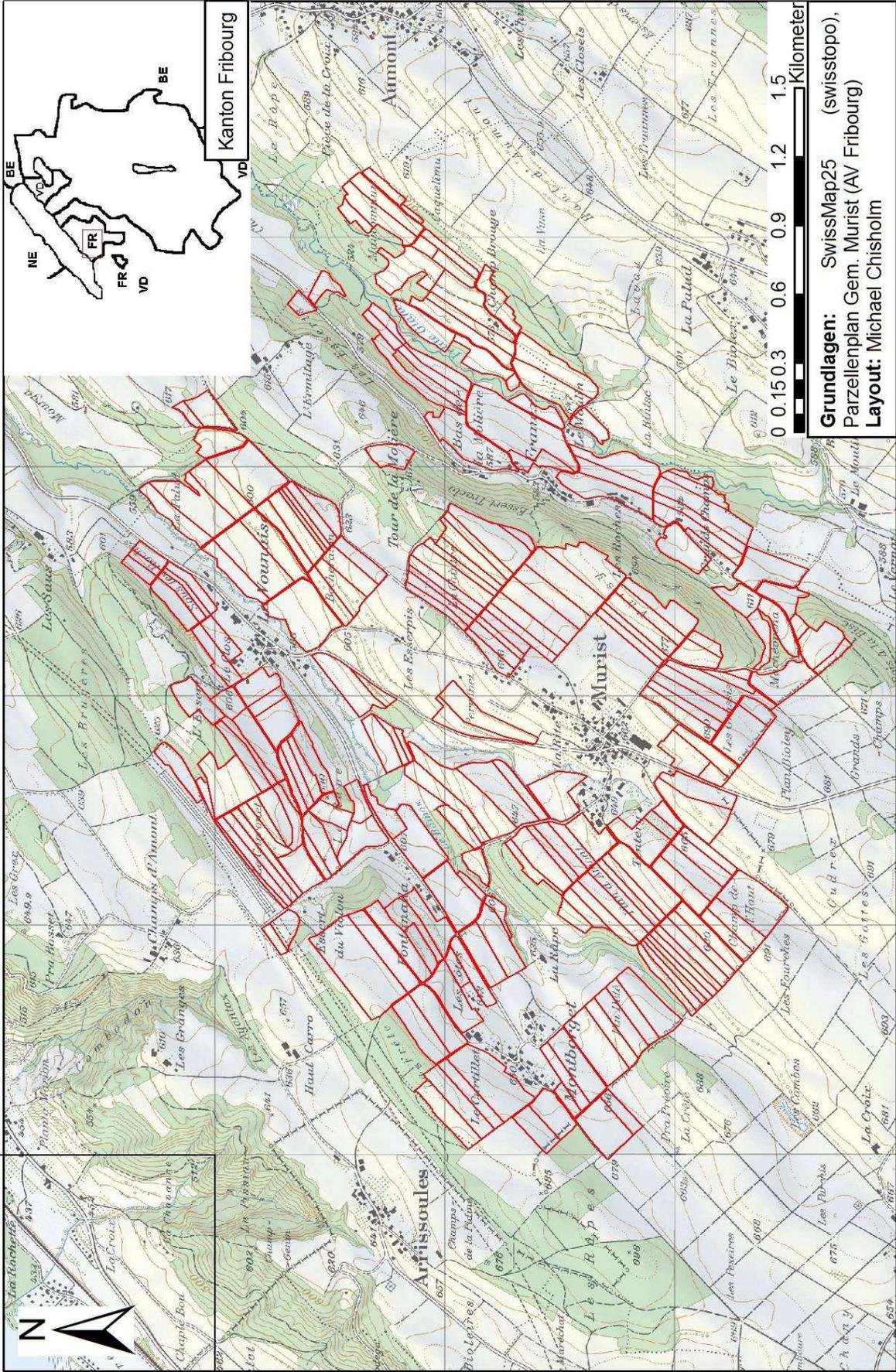
4.1 *Estavayer-le-Lac*

Das Untersuchungsgebiet Estavayer-le-Lac ist südwestlich von der gleichnamigen Ortschaft zwischen 450 und 735 m ü. M. gelegen. Estavayer ist eine Freiburgische Exklave, umgeben vom Kanton Waadt, und liegt somit im französischsprachigen Teil der Schweiz. Das Untersuchungsgebiet ist charakterisiert durch ein mittelstarkes Relief, welches sich über das gesamte Gebiet erstreckt.

Die geologischen Einheiten im Untersuchungsgebiet bestehen vorwiegend aus Molasse. Mit sandig-lehmig bis lehmig-sandigen Braunerdeböden (BFS 2000) weist das Gebiet nach den Klassifizierungen von WISCHMEIER & SMITH (1978) und FRIEDLI (2006) eine mittelstarke Bodenerodibilität auf (LEDERMANN et al. unveröffentlicht).

Untersuchungen von LEDERMANN et al. (unveröffentlicht) zufolge werden 80% der landwirtschaftlichen Anbauflächen mit herkömmlichen Ackerbau bewirtschaftet. Somit weist das Gebiet Estavayer von allen drei Untersuchungsgebieten den grössten Anteil an Ackerbau auf. Das Parzellennetz des Untersuchungsgebietes weist 238 Einzelparzellen mit einer Gesamtfläche von 453 ha auf. Daraus resultiert eine durchschnittliche Parzellengrösse von 1,9 ha. Das heisst, im Schnitt weist Estavayer von allen drei Gebieten die Grössten Parzellen auf.

*Abbildung 4.1 (nächste Seite): Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes Estavayer-le-Lac mit darüber gelegtem Parzellennetz.
(Quelle: eigene Darstellung).*



Grundlagen: SwissMap25 (swisstopo),
 Parzellenplan Gem. Murist (AV Fribourg)
Layout: Michael Chisholm

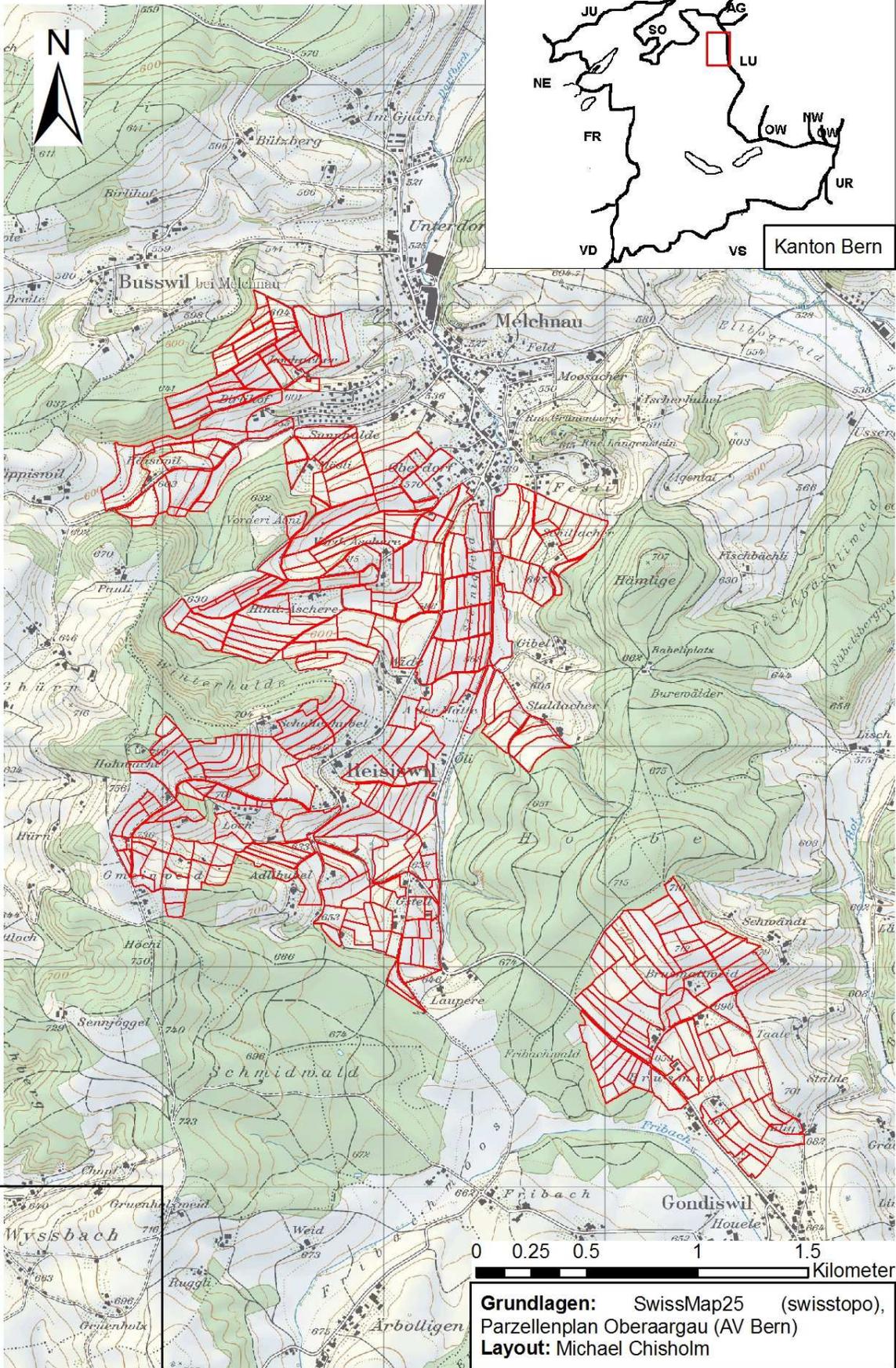
4.2 Oberaargau

Das Untersuchungsgebiet Oberaargau liegt zwischen 520 und 780 m ü. M. in der Umgebung der Ortschaften Melchnau, Reisiswil und Gondiswil. Das Gebiet ist ein Ausläufer des Emmentals und als solcher durch eine Hügellandschaft mit zum Teil beträchtlichen Hangneigungen gekennzeichnet.

Die geologischen Einheiten im Untersuchungsgebiet bestehen grösstenteils aus Oberer Meeremolasse. Die häufigsten Bodenarten sind Braunerden und saure Braunerden (HAUERT 2007, BFS 2000). Die überwiegend sandig-siltige Textur des Bodens (BFS 2000) weist nach den Klassifizierungen von WISCHMEIER & SMITH (1978) und FRIEDLI (2006) eine mittelstarke Bodenerodibilität auf (LEDERMANN et al. unveröffentlicht).

Das Parzellennetz des Untersuchungsgebietes weist 364 Einzelparzellen mit einer Gesamtfläche von 322 ha auf. Daraus resultiert eine durchschnittliche Parzellengrösse von 0,9 ha, was der kleinsten mittleren Parzellenfläche aller drei Untersuchungsgebiete entspricht. Ein Grund für die im Vergleich zu den anderen Untersuchungsgebieten kleineren Parzellen ist das starke Relief im Oberaargau. Mit einer mittleren Hangneigung von knapp 18% über alle Parzellen hinweg gesehen ist das Gebiet Oberaargau das am stärksten reliefierte Untersuchungsgebiet.

*Abbildung 4.2 (nächste Seite): Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes Oberaargau mit darüber gelegtem Parzellennetz.
(Quelle: eigene Darstellung)*



222

Grundlagen: SwissMap25 (swisstopo),
 Parzellenplan Oberaargau (AV Bern)
Layout: Michael Chisholm

4.3 *Frienisberg*

Das Untersuchungsgebiet Frienisberg liegt nordwestlich von Bern zwischen 475 und 720 m ü. M. Es werden die fünf Teilgebiete Seedorf, Schwanden, Suberg, Lobsigen und Frienisberg berechnet. Die Teilgebiete Seedorf, Suberg und Lobsigen liegen in der Seedorf-Mulde, das Teilgebiet Schwanden in der Lyssbachebene und das am höchsten gelegene Teilgebiet Frienisberg am Frienisberg-Nordabhang. Das Gebiet als Ganzes weist im Vergleich ein eher sanftes Relief auf. Die Ausnahme bildet das Teilgebiet Frienisberg, welches ein starkes Relief mit grossen Hangneigungen aufweist (PRASUHN & GRÜNIG 2001, LEDERMANN et al. unveröffentlicht).

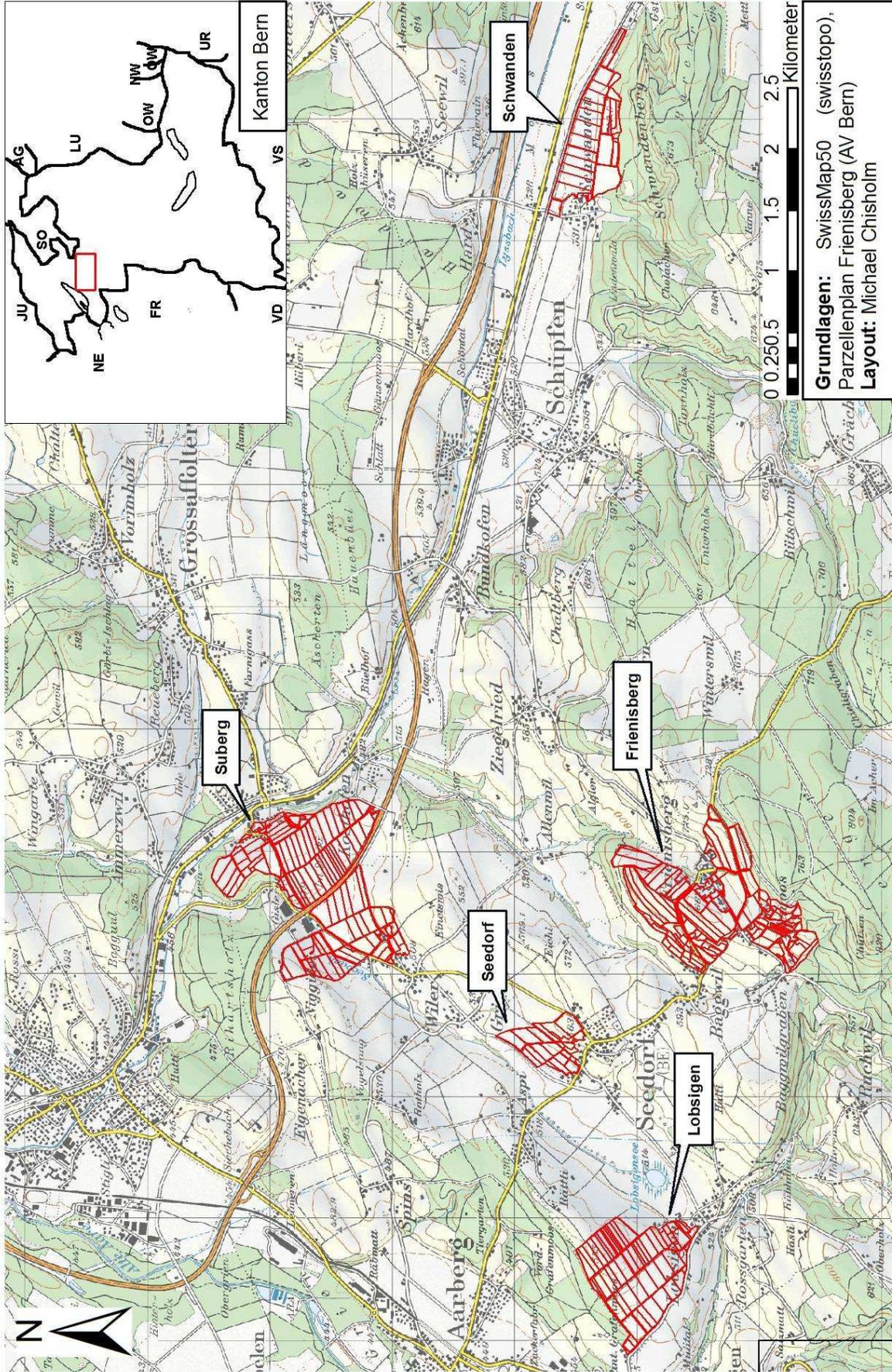
Im Raum Frienisberg werden schon seit längerem verschiedene Untersuchungen und Kartierungen bezüglich Bodenerosion durchgeführt (PRASUHN & GRÜNIG 2001, HAUERT 2007, LEDERMANN et al. unveröffentlicht).

Die geologischen Einheiten im Untersuchungsgebiet bestehen grösstenteils aus Süsswassermolasse und Würm-Moräne. Die häufigsten Bodenarten sind Braunerden und Parabraunerden (HAUERT 2007, BFS 2000). Die überwiegend sandig-lehmige Textur des Bodens (BFS 2000, PRASUHN & GRÜNIG 2001) weist nach den Klassifizierungen von WISCHMEIER & SMITH (1978) und FRIEDLI (2006) eine mittelstarke Bodenerodibilität auf (LEDERMANN et al. unveröffentlicht).

Das Parzellennetz des Untersuchungsgebietes weist 209 Einzelparzellen mit einer Gesamtfläche von 265 ha auf. Daraus resultiert eine durchschnittliche Parzellengrösse von 1,3 ha. Wie bereits angetönt besitzt das Gebiet aufgrund der Verteilung der fünf Teilgebiete über ein grösseres Gebiet bezüglich der Eigenschaften eine grössere Heterogenität als in Estavayer oder Oberaargau. Bezüglich Erosionsgefährdung ist zu erwarten, dass vor allem im steilen Teilgebiet Frienisberg gefährdete Gebiete ausgeschieden werden.

Abbildung 4.3 (nächste Seite): Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes Frienisberg mit darüber gelegtem Parzellennetz der fünf Teilgebiete Seedorf, Schwanden, Suberg, Lobsigen und Frienisberg.

(Quelle: eigene Darstellung)

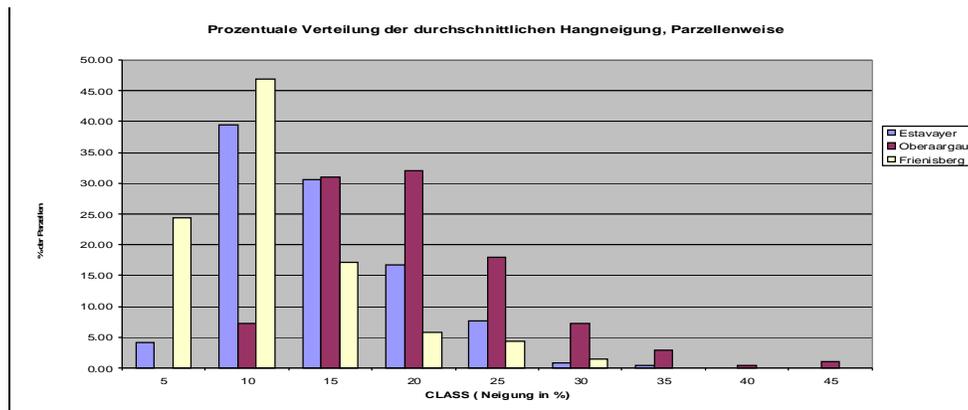


Grundlagen: SwissMap50 (swissfopo),
 Parzellenplan Frenisberg (AV Bern)
Layout: Michael Chirsholm

4.4 Gebietsvergleich

Das Diagramm 4.1 und die Tabelle 4.1 zeigen den Charakter der Untersuchungsgebiete. Im Diagramm 4.1 wird ersichtlich, wie stark die flachen Gebiete die mittlere Hangneigung im Untersuchungsgebiet Frienisberg beeinflussen. Das Gebiet Oberaargau weist keine Hangneigungen von unter 5 % auf. Die erhobenen Zahlen sind durchschnittliche Werte pro Parzelle.

Diagramm 4.1: Verteilung der Hangneigung (Mittelwerte pro Parzelle) in den Untersuchungsgebieten, berechnet aus DTM-AV (swisstopo). (Quelle: eigene Darstellung)



Folgende Daten in Tabelle 4.1 charakterisieren die Landnutzung der Untersuchungsgebiete. Die angegebenen Werte sind Gemeindewerte aus der Betriebszählung 2005 (BFS 2005), nicht die genauen Werte für die hier eingesetzten Untersuchungsgebiete. Die grossen Anteile der landwirtschaftlichen Nutzfläche gemessen an der Gebietsfläche charakterisieren diese Gebiete als typische landwirtschaftliche Gebiete mit einer hohen Konzentration von Ackerbau.

Tabelle 4.1: Landnutzung in den Untersuchungsgebieten nach der Eidgenössischen Betriebszählung 2005. (Quelle: BFS 2005)

	Gebiet	Gebietsfläche		Landwirt. Nutzfläche		Offene Ackerfläche		Hackfrüchte		Kunstwiesen	
		ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
	Estavayer/Murist	820	100	717	87	419	51	180	22	152	19
Oberaargau	Gondiswil (1994)	937	100	626	67	206	22	38	4	240	26
	Melchnau (1994)	1030	100	534	52	178	17	35	3	168	16
	Reisiswil (1994)	201	100	126	63	44	22	12	6	38	19
Frienisberg	Grossaffoltern (1994)	1503	100	932	62	585	39	217	14	131	9
	Rapperswil (BE) (1994)	1819	100	1126	62	634	35	236	13	255	14
	Seedorf (BE) (1994)	2089	100	1330	64	727	35	344	17	234	11

5. Visualisierung und Besprechung der Resultate

Im Kapitel 3 wurden die Grundlagen zu den folgenden digitalen Karten eingehend beschrieben. Die Aufbereitung der Grundlagenlayer (Kapitel 3.1) sowie die Berechnung oder Aufbereitung der erosionsrelevanten Faktoren (Kapitel 3.2) sind Voraussetzungen, um die Bodenerosionsgefährdung mit AVErosion zu berechnen. Sie werden bewusst nicht im Resultatteil behandelt. Anschliessend können die Resultate der Gebiete untereinander verglichen werden. Die in diesem Kapitel präsentierten Karten repräsentieren alle das Untersuchungsgebiet Estavayer. Die entsprechenden Resultate für die anderen Untersuchungsgebiete befinden sich im Anhang.

Für die folgenden Karten wurde die Bodenerosionsgefährdung nach USLE/MUSLE87 mit AVErosion berechnet. Die Faktoren, welche die Landnutzung beschreiben (C- und P-Faktor) sind Abschätzungen, also nicht vor Ort erhoben worden. Zusätzlich ist auch die Auflösung auf Gemeindeebene sehr tief. Die Parzellenpläne der einzelnen Gebiete entsprechen der berechneten Fläche. Es wird angenommen, dass auf allen Parzellen Ackerbau herrscht. Insofern ist auf den nachfolgenden Karten nicht die effektiv stattfindende Bodenerosion dargestellt, sondern die Bodenerosionsgefährdung unter Annahme ackerbaulicher Bedingungen.

Die Modellierungen werden nach Auflösung des DHM präsentiert. So wird die nach und nach verbesserte Qualität sichtbar. Im Weiteren werden die schlagbezogenen Modellierungen dargestellt, wo jeweils die mittlere Bodenerosionsgefährdung pro Parzelle modelliert wird.

5.1 *Bodenerosionsgefährdung rasterzellenscharf*

In diesem ersten Teil der Resultatsbetrachtung werden die rasterzellenscharfen Modellierungen unter Verwendung beider zur Verfügung stehender Bodenerosionsmodelle (USLE/MUSLE87) präsentiert. Die Bezeichnung „*rasterzellenscharf*“ bedeutet, dass hier alle Modellierung in der Auflösung (resp. Fläche der Einzelpixel) des jeweils eingesetzten DHMs durchgeführt worden sind. Für eine Berechnung mit dem DHM100 (BFS) beispielsweise bedeutet dies, dass das Resultat eine Bodenerosionsgefährdungskarte im Hektarraster ist.

5.1.1 Karte rasterzellenscharfe Bodenerosionsgefährdung mit DHM100 (Hektarraster)

In der nachfolgenden Karte wurde für die das Untersuchungsgebiet Estavayer die Bodenerosionsgefährdung mit der Grundlage des DHM100 (BFS) im Hektarraster berechnet. Es ist sowohl die Berechnung mit USLE als auch mit MUSLE87 dargestellt. Visuell sehen sich die zwei Resultate sehr ähnlich. Es bildet sich bei beiden Modellen einzig ein grösserer Fleck mit erhöhter Erosionsgefährdung im Westen des Untersuchungsgebietes. Die aus der Modellierung resultierenden Werte sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Dort ist gut ersichtlich, dass sich die Resultate zwischen USLE- und MUSLE87-Modellierung nicht gross unterscheiden. Die Ähnlichkeit der Resultate spiegelt sich anhand von Diagramm 5.1 für das Beispiel Estavayer wieder.

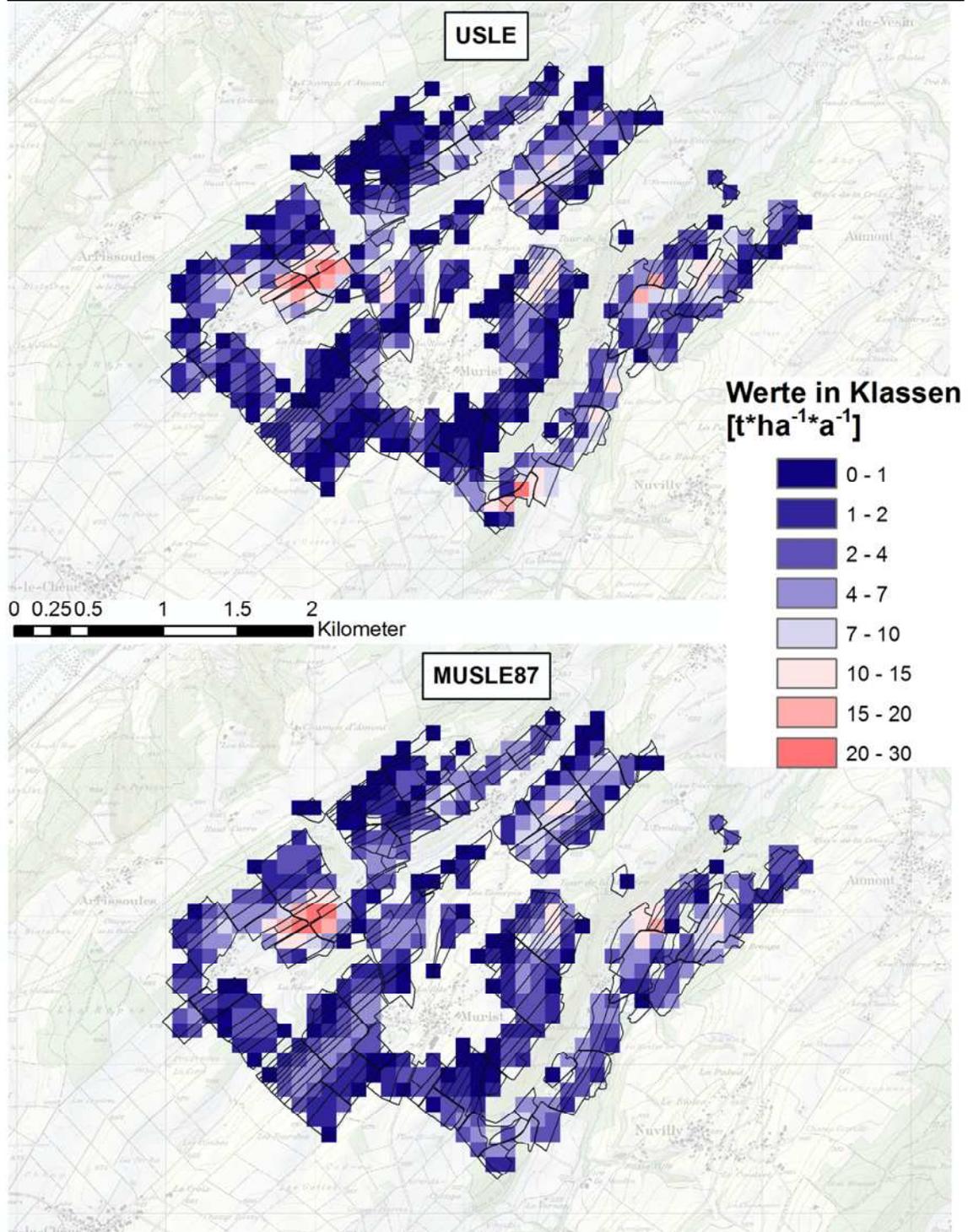
Tabelle 5.1: Statistische Werte zur Bodenerosionsgefährdung A (rasterzellenscharf) für die drei Untersuchungsgebiete in Hektarraster-Auflösung. (Quelle: eigene Berechnung)

	$A_{\text{Mittelwert}} [\text{t}^*\text{ha}^{-1}*\text{a}^{-1}]$	$A_{\text{Median}} [\text{t}^*\text{ha}^{-1}*\text{a}^{-1}]$
Estavayer USLE	3.65	2.02
Estavayer MUSLE87	3.48	2.57
Oberaargau USLE	3.13	1.82
Oberaargau MUSLE87	2.30	1.83
Frienisberg USLE	2.21	1.30
Frienisberg MUSLE87	2.24	1.65

In der Tabelle 5.1 ist pro Gebiet das arithmetische Mittel $A_{\text{Mittelwert}}$ und der Median A_{Median} der Bodenerosionsgefährdung aufgeführt. Der Median bezeichnet den Wert, der genau die Mitte der Stichprobe - oder in diesem Fall die Mitte aller Pixelwerte - markiert. Gegenüber dem arithmetischen Mittel hat der Median den Vorteil, robuster gegenüber Ausreissern zu sein. Im Falle der hier gemachten Modellierung haben die Pixel mit hohen Abtragswerten (rote Bereiche), somit weniger Einfluss beim Medianwert. Die Medianwerte liegen allesamt in etwa um $1 \text{ t}^*\text{ha}^{-1}*\text{a}^{-1}$ tiefer.

Abbildung 5.1 (nächste Seite): Rasterzellenscharfe Bodenerosionsgefährdungsmodellierung für das Untersuchungsgebiet Estavayer auf der Grundlage vom DHM100 (BFS) im Hektarraster. Abgebildet ist sowohl die Modellierung mit USLE (oben) als auch mit MUSLE87 (unten). (Quelle: eigene Darstellung)

**Estavayer - AVErosion Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$
auf Grundlage von DHM100**

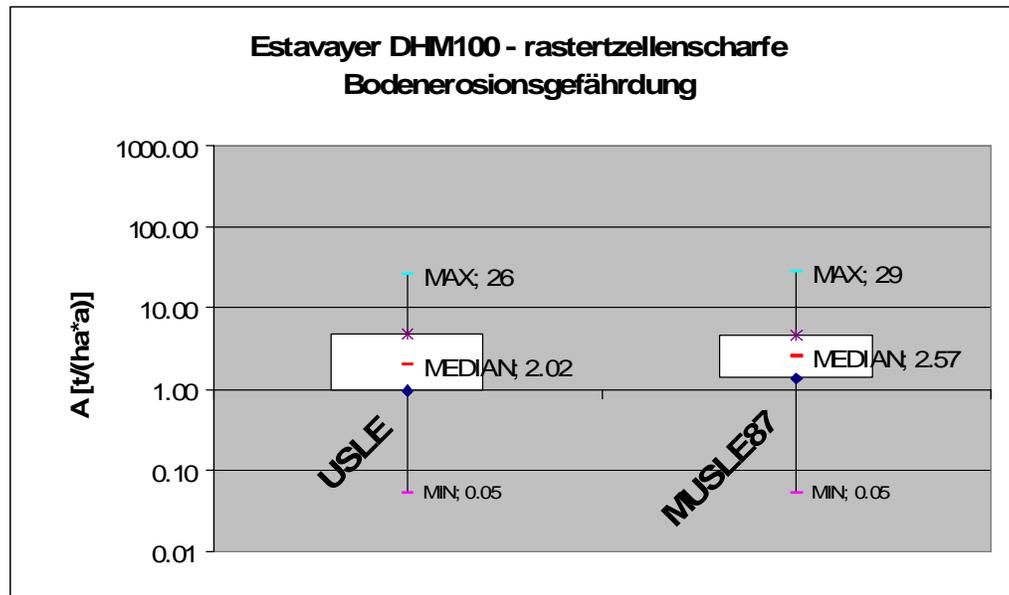


Grundlagen: SwissMap25 (swisstopo), Parzellennetz Gemeinde Murist (AV Fribourg), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K- Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung AVErosion auf Grundlage von DHM100 (BFS)]

Berechnung: AVErosion mit Modellen USLE/MUSLE87

Layout: Michael Chisholm

Diagramm 5.1: Boxplot zur rasterzellenscharfen Erosionsgefährdung von Estavayer mit DHM100. Die Y-Achse ist logarithmisch. (Quelle: Eigene Darstellung)



Betrachtet man die Boxplots und die darin enthaltenen Werte in Diagramm 5.1 verdeutlicht sich die Ähnlichkeit der Modellierungen mit USLE und MUSLE87. Der Wertebereich ist in derselben Größenordnung. Die weissen Rechtecke zeigen den Bereich an, wo dich die Hälfte aller berechneten Werte befinden. Die schmalere Box der MUSLE87-Modellierung zeigt dabei an, dass die Erosionswerte bei dieser Methode etwas näher beieinander liegen.

5.1.2 Karte rasterzellenscharfe Bodenerosionsgefährdung mit DHM25 (25m-Raster)

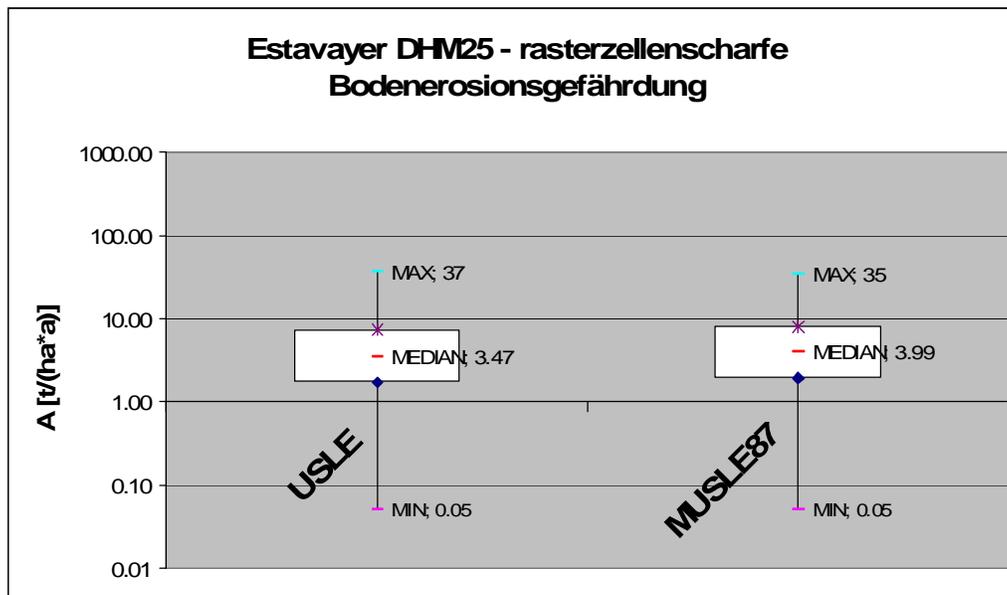
In der nachfolgenden Karte wurde für das Untersuchungsgebiet Estavayer die Bodenerosionsgefährdung auf der Grundlage des DHM25 (swisstopo) im 25m-Raster berechnet. Es ist sowohl die Modellierung mit USLE als auch mit MUSLE87 dargestellt. Im Vergleich zur Berechnung im Hektarraster bilden sich hier visuelle Differenzen zwischen den Karten. Die räumliche Verteilung von hoch bzw. gering erosionsgefährdeten Flächen ist zwar ähnlich, aber auf der USLE-Karte (oben) wird der Effekt des Single-Flow Algorithmus der USLE (Kapitel 2.3.1) sichtbar. Im nordöstlichen Teil des Gebietes ist gut zu erkennen, wie sich linienartige Strukturen bilden. Im Gegensatz dazu bildet die MUSLE87-Modellierung fleckenhafte Erosionsstrukturen, die aufgrund der Nachbarschaftsbeziehungen des Multiple-Flow Algorithmus (Kapitel 2.3.2) zustande kommen. Schaut man die Resultate der Berechnungen in Tabelle 5.2 und Diagramm 5.2 an, ist ersichtlich, dass der Effekt der unterschiedlichen Beurteilung des L-Faktors für die Gebietserosion in dieser Auflösung noch keine grossen Implikationen hat.

Tabelle 5.2: Statistische Werte zur Bodenerosionsgefährdung A (rasterzellenscharf) für die drei Untersuchungsgebiete in der Auflösung 25m. (Quelle: Eigene Berechnung)

	$A_{\text{Mittelwert}} [\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$	$A_{\text{Median}} [\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$
Estavayer USLE	5.48	3.47
Estavayer MUSLE87	5.88	3.99
Oberaargau USLE	5.12	3.46
Oberaargau MUSLE87	5.14	3.53
Frienisberg USLE	3.84	2.35
Frienisberg MUSLE87	3.44	2.56

In der Tabelle 5.2 ist pro Gebiet das arithmetische Mittel $A_{\text{Mittelwert}}$ und der Median A_{Median} der Bodenerosionsgefährdung aufgeführt. Die Unterschiede zwischen den Modellierungen mit USLE und MUSLE87 liegen im Kommastellenbereich und sind somit im Schnitt noch geringer als bei der Modellierung im Hektarraster. Die Mittelwerte und Mediane liegen jedoch in dieser Auflösung weiter auseinander (Mittelwert bis zu $2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ höher als der Median). Aus dem Vergleich zwischen Mittelwert und Median wird auch deutlich, dass in dieser Auflösung die Ausreisser nach oben zunehmen.

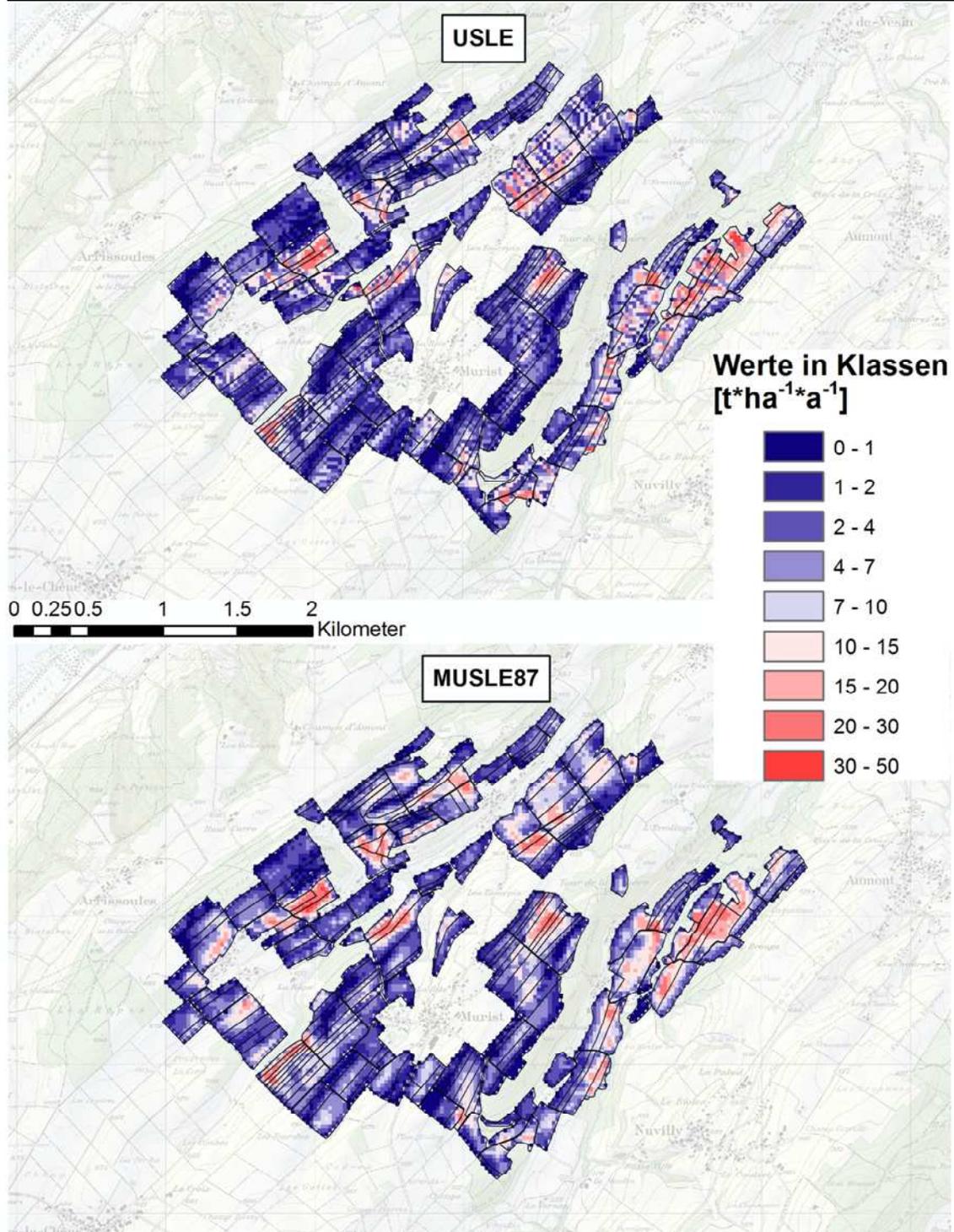
Diagramm 5.2: Boxplot zur rasterzellenscharfen Erosionsgefährdung im Untersuchungsgebiet Estavayer mit DHM25 (swisstopo). Die Y-Achse ist logarithmisch. (Quelle: Eigene Darstellung)



Ein weiteres Indiz dafür, dass sich die USLE und MUSLE87 Modellierungen in dieser Auflösung zumindest im Wertebereich einander annähern, liefert Diagramm 5.2. Betrachtet man die Boxplots und die darin enthaltenen Werte, verdeutlicht sich die Ähnlichkeit der Modellierungen mit USLE und MUSLE87. Der Wertebereich ist in derselben Grössenordnung. Auch die Verteilung der Werte ist sehr ähnlich, wie die Ausdehnung der Box zeigt.

Abbildung 5.2 (nächste Seite): Rasterzellenscharfe Bodenerosionsgefährdungsmodellierung für das Untersuchungsgebiet Estavayer auf der Grundlage vom DHM25 (swisstopo) im 25m-Raster. Abgebildet ist sowohl die Modellierung mit USLE (oben) als auch mit MUSLE87 (unten). (Quelle: eigene Darstellung)

**Estavayer - AVErosion Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$
auf Grundlage von DHM25**



Grundlagen: SwissMap25 (swisstopo), Parzellennetz Gemeinde Murist (AV Fribourg), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K- Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung AVErosion auf Grundlage von DHM25 (swisstopo)]

Berechnung: AVErosion mit Modellen USLE/MUSLE87

Layout: Michael Chisholm

5.1.3 Karte rasterzellenscharfe Bodenerosionsgefährdung mit DTM-AV (2m-Raster)

Betrachtet man die Resultate aller drei Auflösungen, ist bei der Modellierung mit dem DTM-AV (swisstopo) der Unterschied zwischen USLE- und MUSLE87-Berechnung am deutlichsten erkennbar. Durch die Single-Flow Methodik der USLE und der daraus resultierenden Geradlinigkeit der Reliefmodellierung können kleinförmige Geländeunebenheiten nicht umgangen werden (siehe Kap. 2.3.1). Die Auswirkung auf das Resultat ist in dieser Auflösung beträchtlich, nicht nur in der Kartendarstellung, wie die Werte in Tabelle 5.3 zeigen.

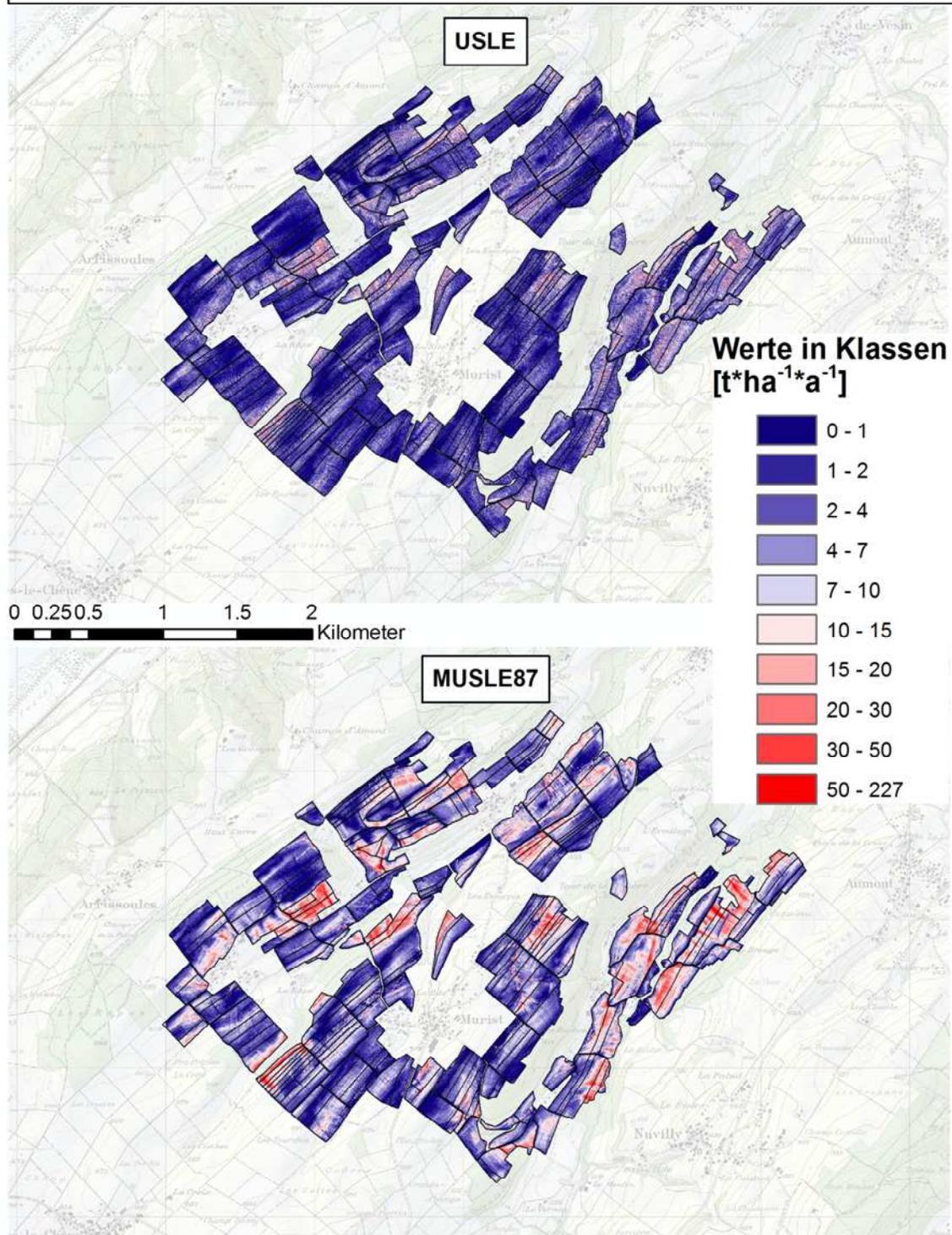
Tabelle 5.3: Statistische Werte zur Bodenerosionsgefährdung A (rasterzellenscharf) für die drei Untersuchungsgebiete in der Auflösung 2m. (Quelle: Eigene Berechnung)

	$A_{\text{Mittelwert}} [\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$	$A_{\text{Median}} [\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$
Estavayer USLE	3.68	2.17
Estavayer MUSLE87	7.11	4.9
Oberaargau USLE	3.83	2.33
Oberaargau MUSLE87	6.95	5.00
Frienisberg USLE	2.92	1.67
Frienisberg MUSLE87	4.51	2.57

In der Tabelle 5.3 ist pro Gebiet das arithmetische Mittel $A_{\text{Mittelwert}}$ und der Median A_{Median} der Bodenerosionsgefährdung aufgeführt. Die Differenz zwischen den Modellierungen mit USLE und MUSLE87 ist im Vergleich zu den Berechnungen in den tieferen Auflösungen beträchtlich. Der Mittelwert der Erosionsgefährdung mit MUSLE87-Modellierung ist jeweils ungefähr um den Faktor 2 höher als bei der USLE-Erosionsgefährdungsmodellierung. Die Mittelwerte und Mediane liegen wie bei der Berechnung mit DHM25 (swisstopo) relativ weit auseinander (Mittelwert bis zu $2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ höher als der Median). Betrachtet man unter diesem Gesichtspunkt das Diagramm 5.3, wird der Grund deutlich. Beide Modelle berechnen in dieser Auflösung punktuell Bodenerosionswerte, die extrem hoch sind (bis zu $226 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ bei MUSLE87-Modellierung).

Abbildung 5.3 (nächste Seite): Rasterzellenscharfe Bodenerosionsgefährdungsmodellierung für das Untersuchungsgebiet Estavayer auf der Grundlage vom DTM-AV (swisstopo) im 2m-Raster. Abgebildet ist sowohl die Modellierung mit USLE (oben) als auch mit MUSLE87 (unten). (Quelle: eigene Darstellung)

**Estavayer - AVErosion Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$
auf Grundlage von DTM-AV**



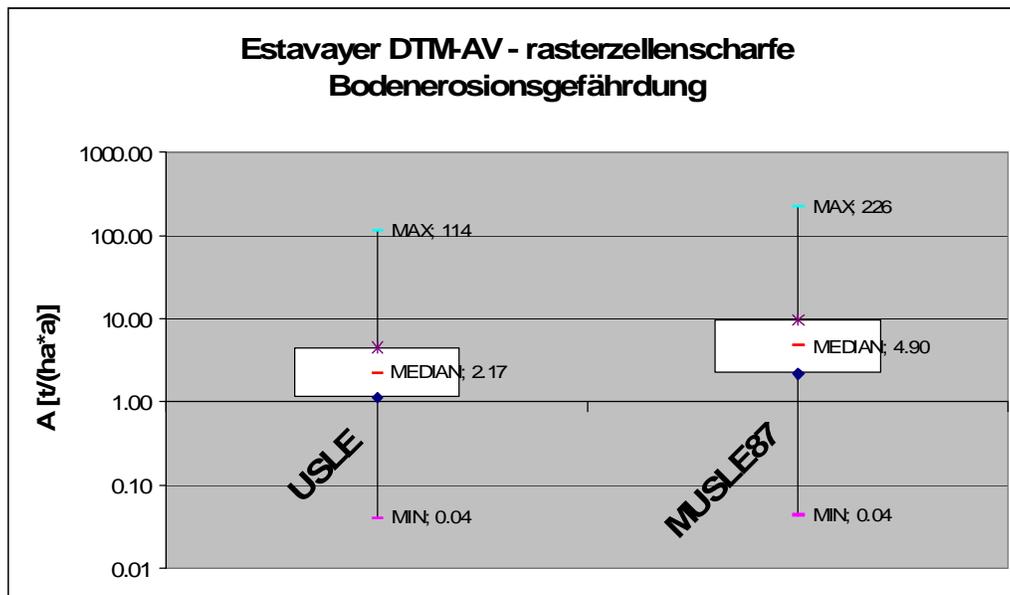
Grundlagen: SwissMap25 (swisstopo), Parzellennetz Gemeinde Murist (AV Fribourg), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K-Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung AVErosion auf Grundlage von DTM-AV (swisstopo)]

Berechnung: AVErosion mit Modellen USLE/MUSLE87

Layout: Michael Chisholm

Diagramm 5.3: Boxplot zur rasterzellenscharfen Erosionsgefährdung vom Untersuchungsgebiet Estavayer mit DTM-AV (swisstopo). Die Y-Achse ist logarithmisch.

(Quelle: Eigene Darstellung)



Der Aspekt der Maximalwerte in Diagramm 5.3 wurde bereits angesprochen. Ansonsten verdeutlicht das Diagramm die Tendenz der MUSLE87, in dieser Auflösung deutlich höhere Abtragswerte zu berechnen.

5.2 Schlagbezogene Bodenerosionsgefährdung

AVErosion produziert nebst den eben genannten rasterzellenscharfen Bodenerosionsgefährdungsmodellierungen auch schlagbezogene Bodenerosionsgefährdungsmodellierungen. Das Prinzip hierbei ist einfach: es wird für jede Parzelle der Mittelwert der Erosionsgefährdung von allen darin befindlichen Rasterzellen berechnet und repräsentativ für die ganze Parzelle eingesetzt. Nachfolgend werden schlagbezogene Modellierungen für die Auflösung vom DHM25 (swisstopo) und DTM-AV (swisstopo) dargestellt. Für eine schlagbezogene Erosionsgefährdungskarte ist das DHM100 (BFS) zu grobmaschig. Ich verzichte deshalb hier auf die Präsentation einer schlagbezogenen Modellierung in der Hektarrasterauflösung.

5.2.1 Karte schlagbezogene Bodenerosionsgefährdung mit DHM25 (25m-Raster)

Die nachfolgende Karte illustriert die Mittelwerte jeder einzelnen Parzelle in der Bezugsgrösse 25m. Zur Erleichterung der Ansicht ist das Parzellennetz für das modellierte Gebiet eingefügt (schwarze Linien). Es ist sowohl die Berechnung mit USLE als auch die Berechnung mit MUSLE87 dargestellt. Da hier die kleinstmögliche Bezugsfläche die Parzelle ist, werden die Unterschiede zwischen USLE und MUSLE87 nicht so gut sichtbar wie bei der zellenscharfen Modellierung. Bei beiden Modellen kristallisieren sich mehrere Parzellen aus, welche stärker gefährdet sind (rot). Die Verteilung der gefährdeten Parzellen ist bei beiden Modellierungen in etwa gleich. Auch die Abtragsmengen unterscheiden sich wie bei der rasterzellenscharfen Berechnung nur geringfügig, ersichtlich in Tabelle 5.4.

Tabelle 5.4: Statistische Werte zur schlagbezogenen Erosionsgefährdung für die drei Untersuchungsgebiete in der Auflösung 25m. (Quelle: Eigene Berechnung)

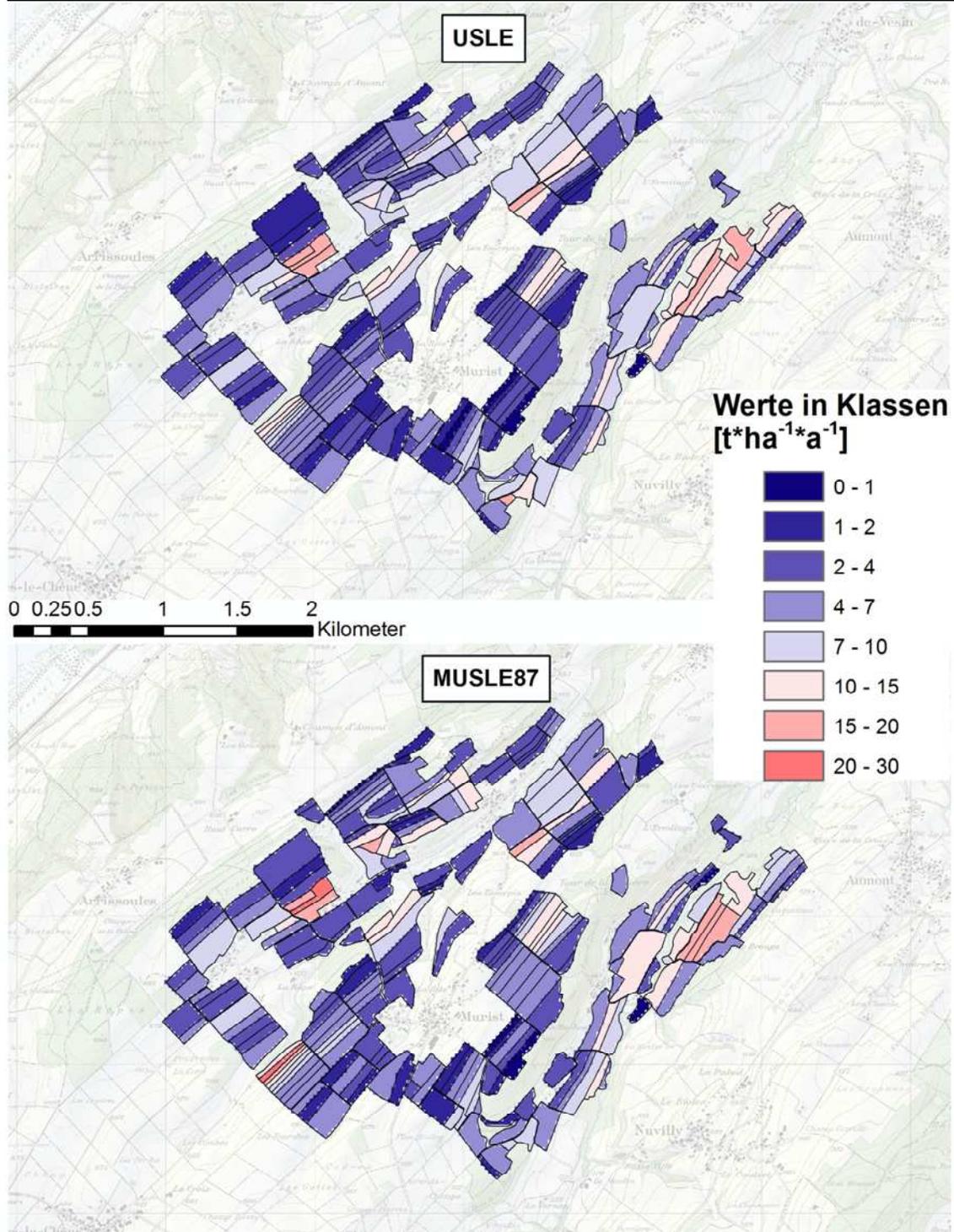
	$A_{\text{Mittelwert}} [\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$	$A_{\text{Median}} [\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$
Estavayer USLE	5.41	4.09
Estavayer MUSLE87	5.74	4.63
Oberaargau USLE	4.90	4.13
Oberaargau MUSLE87	4.82	3.92
Frienisberg USLE	3.63	2.58
Frienisberg MUSLE87	3.10	2.51

5. Visualisierung und Besprechung der Resultate

Aufgrund der Abschwächung der Extremwerte durch Mittelung auf Parzellenebene liegen die Mittelwerte und Mediane im Vergleich zur rasterzellenscharfen Modellierung mit DHM25 (swisstopo) näher beieinander.

Abbildung 5.4 (nächste Seite): Schlagbezogene Bodenerosionsgefährdungsmodellierung für das Untersuchungsgebiet Estavayer auf der Grundlage vom DHM25 (swisstopo) im 25m-Raster. Abgebildet ist sowohl die Modellierung mit USLE (oben) als auch mit MUSLE87 (unten). (Quelle: eigene Darstellung)

**Estavayer - AVErosion Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$
auf Grundlage von DHM25 - schlagbezogen**



Grundlagen: SwissMap25 (swisstopo), Parzellennetz Gemeinde Murist (AV Fribourg), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K- Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung AVErosion auf Grundlage von DHM25 (swisstopo)]

Berechnung: AVErosion mit Modellen USLE/MUSLE87

Layout: Michael Chisholm

5.2.2 Karte schlagbezogene Bodenerosionsgefährdung mit DTM-AV (2m-Raster)

Wie bereits zuvor bei der rasterzellenscharfen Modellierung mit dem DTM-AV (swisstopo) bildet sich auch hier der deutliche Unterschied der Modellierung in dieser Auflösung heraus. Während die USLE-Modellierung so gut wie gar keine Schläge mit sehr hoher Gefährdung (rot) aufweist, kristallisieren sich bei der MUSLE87-Modellierung mehrere stark gefährdete Parzellen heraus.

Bei der Analyse der Bodenabtragswerte für die verschiedenen Gebiete (siehe Tabelle 5.5) fällt auf, dass im Gebiet Frienisberg der Unterschied zwischen USLE und MUSLE87-Berechnung nicht so deutlich ausfällt wie in den rasterzellenscharfen Berechnungen zuvor. Dies ist zu erklären mit dem grossen Anteil an Parzellen mit geringer Hangneigung in diesem Untersuchungsgebiet (siehe Diagramm 4.1, S. 52).

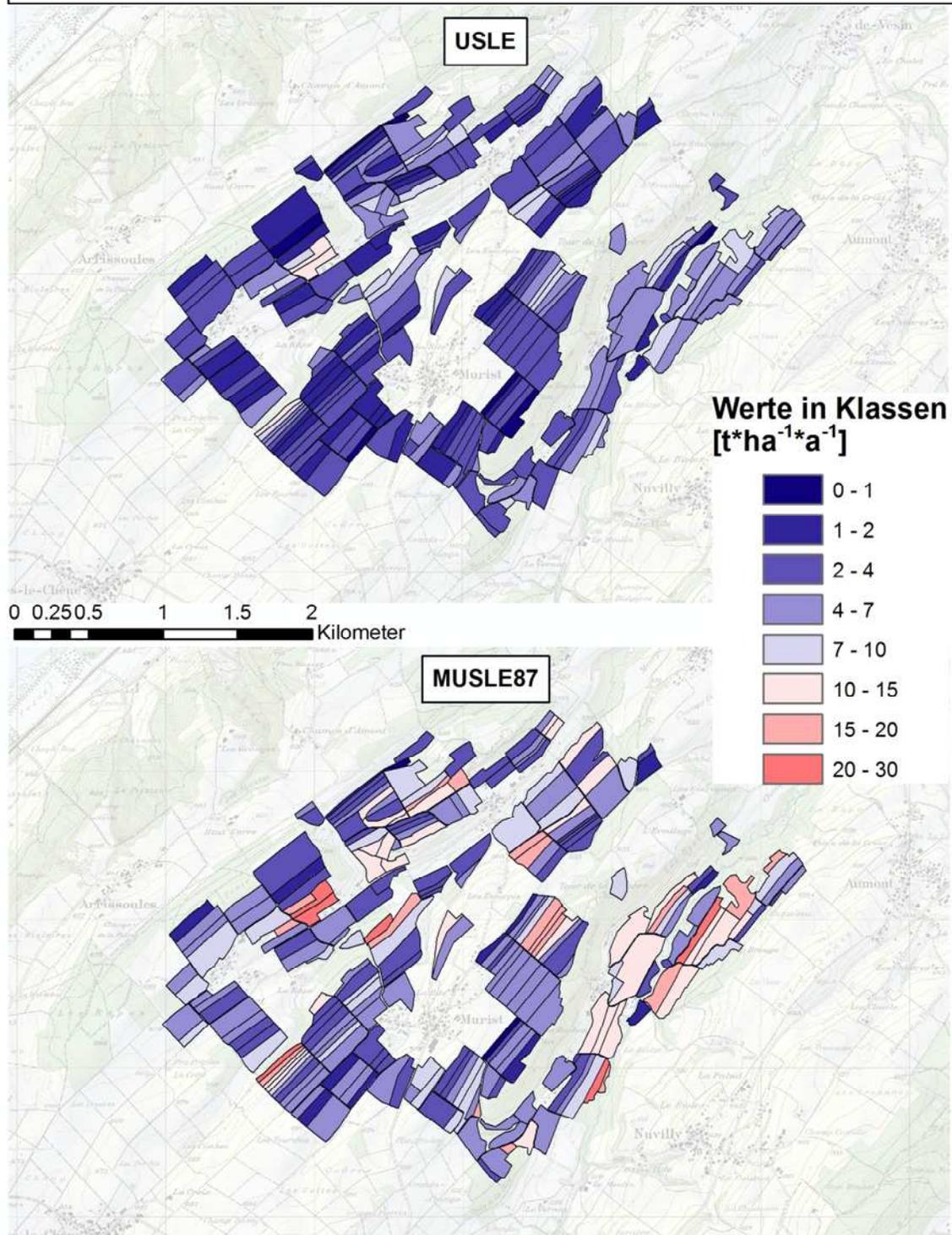
Tabelle 5.5: Statistische Werte zur schlagbezogenen Erosionsgefährdung für die drei Untersuchungsgebiete in der Auflösung 2m. (Quelle: Eigene Berechnung)

	$A_{\text{Mittelwert}} [\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$	$A_{\text{Median}} [\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$
Estavayer USLE	3.74	3.12
Estavayer MUSLE87	7.12	5.48
Oberaargau USLE	3.69	3.30
Oberaargau MUSLE87	6.65	5.77
Frienisberg USLE	2.93	2.11
Frienisberg MUSLE87	4.28	2.96

Die kleine Parzellengrösse und das starke Relief im Untersuchungsgebiet Oberaargau haben zur Folge, dass die Mittel- und Medianwerte in diesem Gebiet nahe beieinander liegen.

Abbildung 5.5 (nächste Seite): Schlagbezogene Bodenerosionsgefährdungsmodellierung für das Untersuchungsgebiet Estavayer auf der Grundlage vom DTM-AV (swisstopo) im 2m-Raster. Abgebildet ist sowohl die Modellierung mit USLE (oben) als auch mit MUSLE87 (unten). (Quelle: eigene Darstellung)

**Estavayer - AVErosion Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$
auf Grundlage von DTM-AV - schlagbezogen**



Grundlagen: SwissMap25 (swisstopo), Parzellennetz Gemeinde Murist (AV Fribourg), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K- Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung AVErosion auf Grundlage von DTM-AV (swisstopo)]

Berechnung: AVErosion mit Modellen USLE/MUSLE87

Layout: Michael Chisholm

5.3 Zusätzlicher Output

Für die schlagbezogenen Modellierungen erzeugt AVErosion jeweils Flächenraster der Attribute und Faktorenwerte. Dazu wird automatisch auch eine Tabelle erstellt. Ein Ausschnitt aus einer solchen Attributtabelle ist in Tabelle 5.6 ersichtlich.

Tabelle 5.6: Ausschnitt aus der Attributtabelle der schlagbezogenen Modellierung vom Untersuchungsgebiet Estavayer mit DHM25 (swisstopo). Nebst den USLE/MUSLE87-Faktoren sind auch λ (erosive Hanglänge in m), der m-Wert (Hanglängenexponent, benötigt zur Berechnung des L-Faktors) und HL_{krit} (kritische Hanglänge, benötigt zur Beurteilung des P-Faktors) angegeben.

(Quelle: eigene Berechnung)

ID	Grösse	A	R	K	L	S	C	P	λ	m-Wert	HL_{krit}
....
625	18125	10.52	78.65	0.35	2.80	1.92	0.07	0.92	98.80	0.51	32.79
630	9375	16.75	78.67	0.35	3.11	3.01	0.07	1.00	92.94	0.58	11.06
640	13750	13.99	78.71	0.35	4.95	1.57	0.07	0.94	255.82	0.53	36.48
650	3125	2.58	78.69	0.35	1.30	1.00	0.07	0.63	30.64	0.44	69.25
660	22500	9.33	78.85	0.35	3.75	1.30	0.07	0.86	146.28	0.53	48.47
665	12500	5.26	78.87	0.35	1.84	1.56	0.07	0.81	52.91	0.54	37.80
670	8125	1.89	78.65	0.35	1.24	0.88	0.07	0.55	31.33	0.44	71.23
680	11250	1.93	78.65	0.35	1.40	0.71	0.07	0.59	35.22	0.40	80.75
685	11875	5.24	78.70	0.35	1.92	1.47	0.07	0.83	53.62	0.48	45.67
690	18750	10.44	78.76	0.35	2.63	2.14	0.07	0.97	77.62	0.54	25.81
740	18125	1.35	78.84	0.35	1.05	0.59	0.08	0.50	25.00	0.40	89.23
750	6250	1.90	79.35	0.35	3.60	0.30	0.07	0.73	214.57	0.43	124.18
760	42500	6.38	79.14	0.35	2.62	1.31	0.07	0.86	85.36	0.50	51.47
800	22500	2.16	77.69	0.35	1.29	0.88	0.07	0.56	31.93	0.40	81.94
810	18125	5.17	78.42	0.35	1.39	1.83	0.07	0.79	33.16	0.50	42.23
820	8750	13.34	78.31	0.35	2.34	3.15	0.07	1.00	59.31	0.59	9.56
830	24375	9.76	78.40	0.35	3.40	1.58	0.07	0.95	102.86	0.56	40.17
840	24375	4.21	78.71	0.35	2.28	1.02	0.07	0.82	66.80	0.50	54.61
850	9375	7.65	78.74	0.35	3.76	1.13	0.07	0.97	151.51	0.52	48.60
860	18750	11.44	78.58	0.35	5.01	1.19	0.07	0.95	234.84	0.53	49.57
....

6. Bewertung der Resultate und des Modells

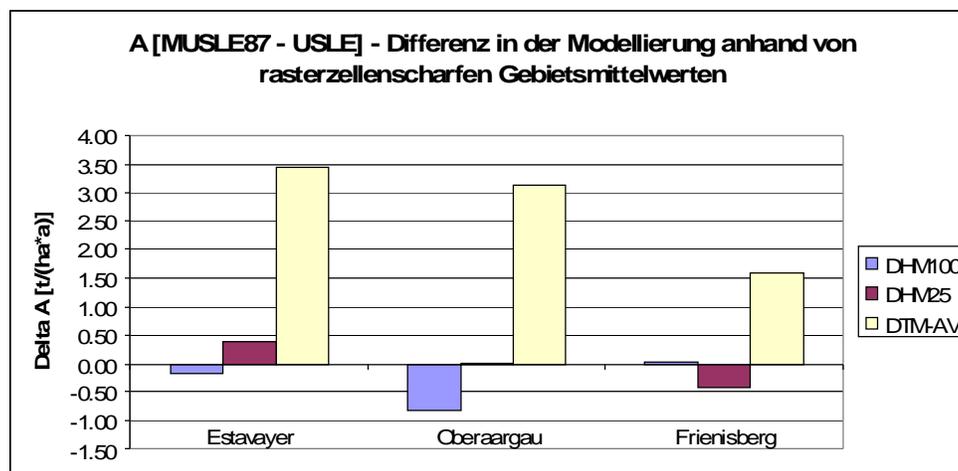
Wie im Resultatsteil gesehen, gibt es Unterschiede in den Modellierungen der Gebiete, je nachdem welches Modell und welche Auflösung gewählt werden. Um den Einfluss des Reliefs beziehungsweise der Auflösung des DHM zu evaluieren, sind in diesem Kapitel einzelne Schläge untersucht worden. Die Modellierungen der einzelnen Schläge werden untereinander verglichen. Eine weitere Möglichkeit, insbesondere bei Modellierungen mit DTM-AV, bietet sich darin, modellierte Parzellen mit Feldaufnahmen zu vergleichen. Im zweiten Teil des Kapitels werden denn auch einzelne Schläge in 2m-Auflösung mit Fotografien derselben Schläge aus laufenden Felduntersuchungen (COST) verglichen, um die Gefährdungsmodellierung zu evaluieren.

6.1 Vergleiche zwischen Modellierungen unterschiedlicher Auflösung

Die Berechnung in drei Auflösungen hat gezeigt, wie fest sich die Relieffaktoren je nach DHM verändern und so Einfluss auf das Resultat haben. Für die Auflösungen 100m und 25m liefern beide Modelle ähnliche Resultate. Auffällig ist Disparität der Modellierungen in hoher Auflösung, wo die MUSLE87-Modellierung deutlich höhere Abtragsraten prognostiziert als die USLE-Modellierung. Diese Differenz im Resultat ist in Diagramm 6.1 dargestellt.

Diagramm 6.1: Vergleich der Bodenerosionsgefährdung A mit USLE und MUSLE87. Die Balken geben die Differenz $[A_{MUSLE87} - A_{USLE}]$ in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ an.

(Quelle: eigene Berechnung)



6. Bewertung der Resultate und des Modells

Im Schnitt über alle drei Untersuchungsgebiete berechnet die MUSLE87 in der 2m-Auflösung ein um den Faktor 1,7 höheren Abtrag als die USLE-Modellierung. Im Gegensatz zur USLE, welche die höchsten Abtragsraten in der DHM25-Auflösung berechnet, steigt die mittlere Erosionsgefährdung bei der MUSLE87-Modellierung mit höher werdender Auflösung des DHM. Die DTM-AV Modellierungen mit USLE ergeben unrealistische Werte (SCHÄUBLE 1999; vgl. Abbildung 2.1, S. 21 in dieser Arbeit). Ich konzentriere mich daher hier beim Vergleich zwischen den Auflösungen auf die Resultate der MUSLE87.

Tabelle 6.1: Faktoren und Abtragswerte aus schlagbezogenen Modellierungen mit MUSLE87 in verschiedenen Auflösungen vom Untersuchungsgebiet Estavayer.

(Quelle: eigene Darstellung)

Untersuchungsgebiet Estavayer schlagbezogen						
Einflussfaktoren (MUSLE87), aktuelle Erosionsgefährdung	Berechnung MUSLE87 mit DHM100		Berechnung MUSLE87 mit DHM25		Berechnung MUSLE87 mit DTM-AV	
	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich
R-Faktor [$N \cdot h^{-1}$]	78	75 bis 81	78	75 bis 81	78	75 bis 81
K-Faktor [$kg \cdot h \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$]	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
C-Faktor [dimensionslos]	0.07	0.06 bis 0.10	0.07	0.06 bis 0.10	0.07	0.06 bis 0.10
λ [erosive Hanglänge in m]	125 (Median: 100)	100 bis 732	99 (Median: 68)	25 bis 1022	122.96 (Median: 80)	8 bis 1197
L-Faktor [dimensionslos]	2.16	1.00 bis 5.36	2.42	1.00 bis 7.58	2.58	0.74 bis 6.95
S-Faktor [dimensionslos]	0.73	0.03 bis 2.81	1.21	0.25 bis 3.68	1.50	0.23 bis 4.33
P-Faktor [dimensionslos]	0.84	0.40 bis 1.00	0.79	0.46 bis 1.00	0.81	0.52 bis 1.00
Erosionsgefährdung [$t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]	3.28 (Median: 2.56)	0.05 bis 20.12	5.74 (Median: 4.63)	0.70 bis 22.91	7.12 (Median: 5.48)	0.88 bis 24.45

Tabelle 6.2: Faktoren und Abtragswerte aus schlagbezogenen Modellierungen mit MUSLE87 in verschiedenen Auflösungen vom Untersuchungsgebiet Oberaargau.

(Quelle: eigene Darstellung)

Untersuchungsgebiet Oberaargau schlagbezogen						
Einflussfaktoren (MUSLE87), aktuelle Erosionsgefährdung	Berechnung MUSLE87 mit DHM100		Berechnung MUSLE87 mit DHM25		Berechnung MUSLE87 mit DTM-AV	
	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich
R-Faktor [$N \cdot h^{-1}$]	97	93 bis 101	97	93 bis 101	97	93 bis 101
K-Faktor [$kg \cdot h \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$]	0.43	0.35 bis 0.45	0.43	0.35 bis 0.45	0.43	0.35 bis 0.45
C-Faktor [dimensionslos]	0.03	0.02 bis 0.03	0.03	0.02 bis 0.03	0.03	0.02 bis 0.03
λ [erosive Hanglänge in m]	108 (Median: 100)	100 bis 209	80 (Median: 55)	25 bis 933	94.53 (Median: 61)	7 bis 674
L-Faktor [dimensionslos]	2.13	1.32 bis 3.80	2.37	1.04 bis 9.36	2.65	0.70 bis 8.08
S-Faktor [dimensionslos]	0.89	0.17 bis 3.39	1.72	0.23 bis 5.39	2.30	0.37 bis 5.71
P-Faktor [dimensionslos]	0.91	0.43 bis 1.00	0.83	0.44 bis 1.00	0.87	0.49 bis 1.00
Erosionsgefährdung [$t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]	2.27 (Median: 1.83)	0.24 bis 11.75	4.82 (Median: 3.92)	0.30 bis 22.47	6.65 (Median: 5.77)	0.47 bis 33.90

Tabelle 6.3: Faktoren und Abtragswerte aus schlagbezogenen mit MUSLE87 Modellierungen in verschiedenen Auflösungen vom Untersuchungsgebiet Frienisberg.

(Quelle: eigene Darstellung)

Untersuchungsgebiet Frienisberg schlagbezogen						
Einflussfaktoren (MUSLE87), aktuelle Erosionsgefährdung	Berechnung MUSLE87 mit DHM100		Berechnung MUSLE87 mit DHM25		Berechnung MUSLE87 mit DTM-AV	
	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich
R-Faktor ($N \cdot h^{-1}$)	88	84 bis 94	88	84 bis 94	88	84 bis 94
K-Faktor ($kg \cdot h \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$)	0.35	0.35 bis 0.45	0.35	0.35 bis 0.45	0.35	0.35 bis 0.45
C-Faktor (dimensionslos)	0.08	0.07 bis 0.11	0.08	0.07 bis 0.11	0.08	0.01 bis 0.11
λ (erosive Hanglänge in m)	143 (Median: 100)	100 bis 1218	88 (Median: 58)	25 bis 669	38 (Median: 30)	5 bis 172
L-Faktor (dimensionslos)	1.80	1.00 bis 3.92	1.79	1.03 bis 3.86	1.58	0.53 bis 4.16
S-Faktor (dimensionslos)	0.42	0.03 bis 1.70	0.72	0.17 bis 2.52	1.05	0.34 bis 3.90
P-Faktor (dimensionslos)	0.73	0.4 bis 1.00	0.66	0.43 bis 1.00	0.65	0.46 bis 1.00
Erosionsgefährdung ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$)	2.09 (Median: 1.67)	0.07 bis 9.45	3.10 (Median: 2.51)	0.49 bis 14.82	4.28 (Median: 2.96)	0.62 bis 28.29

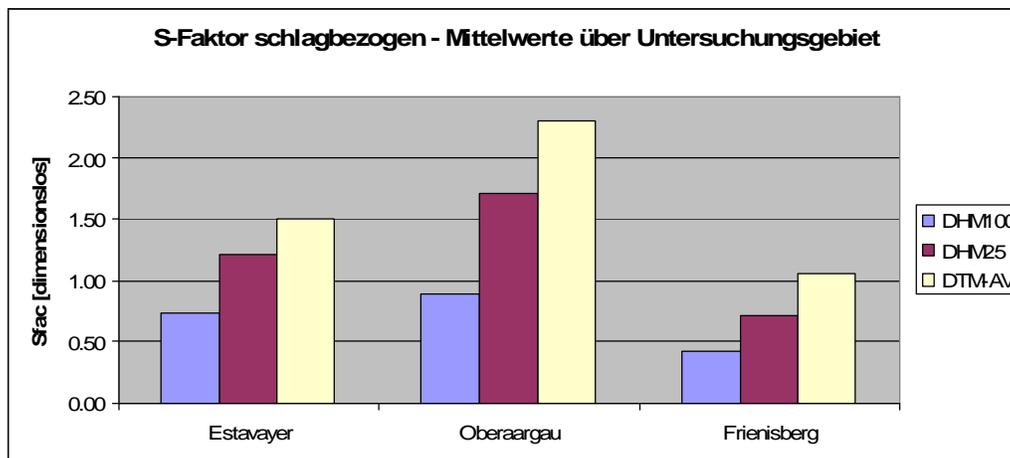
Tabelle 6.1 bis Tabelle 6.3 zeigen für jedes Gebiet die Werte aus der Berechnung für schlagbezogene Modellierungen in allen Auflösungen. Ein Vergleich zwischen den berechneten Werten der Bodenerosionsgefährdung auf allen hier angewandten Auflösungsebenen zeigt neben dem Wertebereich auch die Mittelwerte und Medianwerte. Die R-, K-, und C-Faktoren stammen aus den Berechnungen von FRIEDLI (2006) und sind daher je Gebiet über alle Auflösungen hinweg identisch. Die wichtigsten Beobachtungen bei der Tabellenbetrachtung sind folgende:

- Die erosive Hanglänge λ nimmt mit zunehmender Auflösung ab. Dies kann damit erklärt werden, dass in höherer Auflösung mehr kleinräumige Geländeformen erfasst werden, Diese kleinen „Hindernisse“ verkürzen die erosive Hanglänge tendenziell.
- Der S-Faktor nimmt mit zunehmender Auflösung zu. Mit der höheren Auflösung werden die berechneten Hänge kürzer, jedoch nehmen die Hänge in ihrer Steilheit eher zu.
- Im Vergleich zu einer Modellierung mit dem DHM100 (BFS) liefert die Berechnung mit dem DTM-AV (swisstopo) im Schnitt gut doppelt so hohe Erosionsgefährdungsraten im untersuchten Gebiet. Im Gebiet Oberaargau, welches von allen Dreien das stärkste Relief besitzt, steigt die Erosionsgefährdung von DHM100 bis DTM-AV sogar um das dreifache an (vgl. Tabelle 6.2). Dies liefert einen Hinweis auf die Wichtigkeit des S-Faktors in der USLE-Gleichung

Der Anstieg der Resultate in höherer Auflösung hängt stark von der Entwicklung der Hangneigung und somit des S-Faktors ab (vgl. Tab. 6.1 bis 6.3). Je höher das Relief aufgelöst ist, desto kleinräumiger werden die Reliefmerkmale abgebildet. Betrachtet man die S-Faktorenwerte und die Erosionsgefährdungswerte in Tabelle 6.1 bis Tabelle 6.3, so ist der parallele Anstieg der Werte mit steigender Auflösung gut ersichtlich. Diagramm 6.2 zeigt diesen steten Anstieg der Werte anhand des S-Faktors auf.

Diagramm 6.2: Entwicklung des S-Faktors in verschiedenen Auflösungen. Angezeigt wird der S-Faktor aus schlagbezogenen Modellierungen aus allen Untersuchungsgebieten.

(Quelle: eigene Berechnung)



6.2 Auswirkungen des digitalen Höhenmodells auf Einzelparzellen und kleine Reliefmerkmale

Wir haben gesehen, dass die modellierten Bodenerosionsraten generell mit steigender Auflösung höher werden. Der folgende Teil versucht, diese Veränderungen im Resultat etwas genauer zu ergründen. Dabei gehe ich vor allem auf die Veränderungen im Gebietsrelief ein. Wie bereits im Resultatteil mit den Gesamtgebietsmodellierungen gesehen, nimmt die Qualität der Auflösung von DHM100 (BFS) zu DTM-AV (swisstopo) drastisch zu. Im Folgenden sind aus allen drei Untersuchungsgebieten Parzellen ausgesucht worden. Die Erosionsgefährdung der Parzellen wird in allen drei Auflösungen präsentiert. Das Relief ist jeweils mit zwei Geländeprofilen dargestellt, welche neben der entsprechenden Modellierung zu sehen sind.

6.2.1 Estavayer – Parzelle 310

Die Parzelle 310 des Untersuchungsgebietes Estavayer ist die in der Modellierung am stärksten gefährdete Parzelle im gesamten Gebiet. Die Mittelwerte für die ganze Parzelle sind in Tabelle 6.4 enthalten. Dabei sind nebst der Erosionsgefährdung A auch die Relieffaktoren L und S aufgeführt.

Tabelle 6.4: Mittelwerte für die Parzelle 310 im Untersuchungsgebiet Estavayer. Angegeben ist für jede Auflösung die Parzellenfläche in Hektaren, die modellierte Bodenerosionsgefährdung A (berechnet mit MUSLE87), der Hanglängenfaktor L und der Hangneigungsfaktor S. (Quelle: eigene Berechnung)

Auflösung	ID	Fläche [ha]	A [$t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]	L [dimensionslos]	S [dimensionslos]
DHM100	310	2	8.08	2.90	1.34
DHM25	310	1.87	22.91	3.41	3.68
DTM-AV	310	1.87	24.45	3.25	4.33

Gut ersichtlich ist, wie mit höher werdender Auflösung kleinere Geländeformen immer deutlicher werden. Im Folgenden die Kommentare zu den Geländeprofilen:

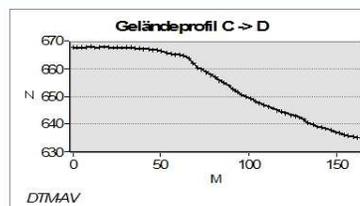
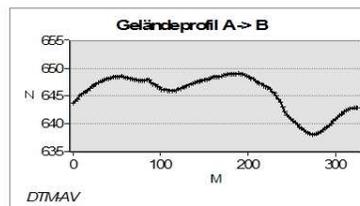
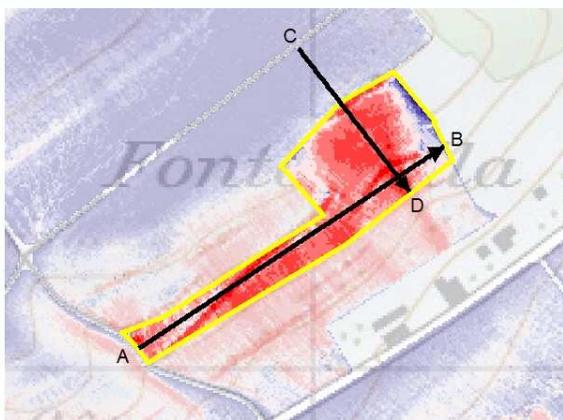
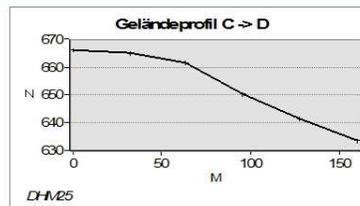
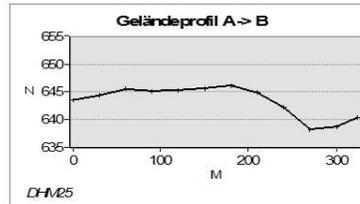
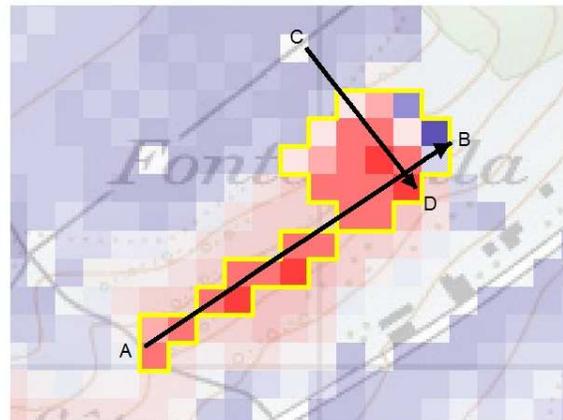
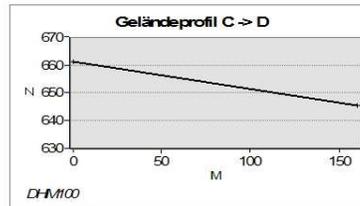
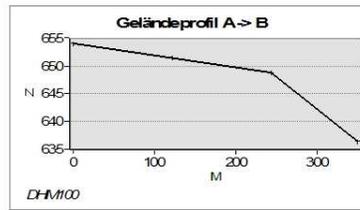
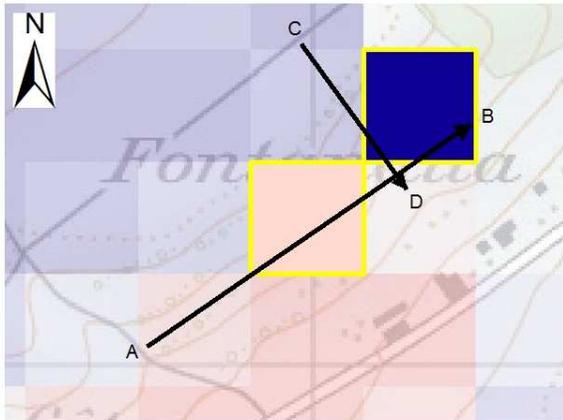
Geländeprofil „A -> B“: Das Geländeprofil liegt quer zur generellen Hangrichtung. In der DHM100-Auflösung ist bloss ein einzelner Hang mit einer Neigungsänderung zu sehen. In der nächst höheren Auflösung DHM25 kommen bereits erste, quer zum Hang ausgerichtete Mulden zum Vorschein. Die DTM-AV Ansicht deckt die Mulden ganz auf, was die Erosionsrate erhöht. Das Aufdecken solcher Geländeperformen hat auch lokal höhere Hangneigungen zur Folge, was einen grossen Teil zur erhöhten Erosionsgefährdung im Modell beiträgt.

Geländeprofil „C -> D“: Dieses Profil liegt in Hangrichtung. Für die Modellierungen mit DHM100 zeigt sich ein gestreckter Hang. In der DHM25 Modellierung wird die grobe Hangform von konvex zu konkav angedeutet. Schaut man sich das Profil der DTM-AV Modellierung an, bestätigt sich das. Zudem kann man zwei Stufen im Gelände erkennen. Diese sind auch in der Karte als zwei rote Striemen abgebildet, eine am oberen Rand der Parzelle und eine ca. 75m weiter hangabwärts.

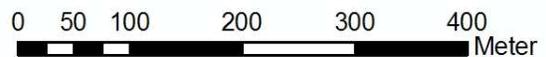
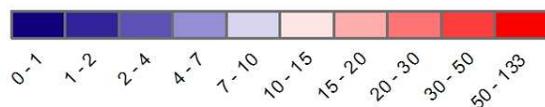
Abbildung 6.1 (nächste Seite): Vergleich von rasterzellenscharfen Bodenerosionsgefährdungsmodellierungen der Parzelle 310 im Untersuchungsgebiet Estavayer.

(Quelle: eigene Darstellung)

Estavayer Parzelle 310 - Vergleich DHM-Abtrag



MUSLE87 Gefährdung [t/(ha*a)]



Grundlagen: Erosionsgefährdung AVErosion (eigene Berechnung), Parzellennetz Gemeinde Murist (AV Fribourg), SwissMap25 (swisstopo)

Layout: Michael Chisholm

6.2.2 Estavayer – Parzelle 80

Die Parzelle 80 des Untersuchungsgebietes Estavayer ist mit einer Fläche von gut 4 Hektaren eine der grössten im Untersuchungsgebiet. Die Mittelwerte für die ganze Parzelle sind in Tabelle 6.5 enthalten. Dabei sind nebst der Erosionsgefährdung A auch die Relieffaktoren L und S aufgeführt

Tabelle 6.5: Mittelwerte für die Parzelle 80 im Untersuchungsgebiet Estavayer. Angegeben ist für jede Auflösung die Parzellenfläche in Hektaren, die modellierte Bodenerosionsgefährdung A (berechnet mit MUSLE87), der Hanglängenfaktor L und der Hangneigungsfaktor S. (Quelle: eigene Berechnung)

Auflösung	ID	Fläche [ha]	A [$t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]	L [dimensionslos]	S [dimensionslos]
DHM100	80	5	1.30	1.89	0.37
DHM25	80	4.25	8.77	4.02	1.27
DTM-AV	80	4.14	4.42	3.05	0.80

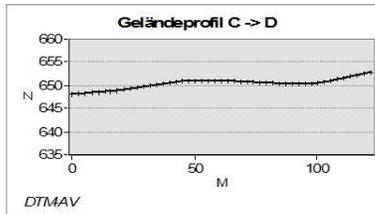
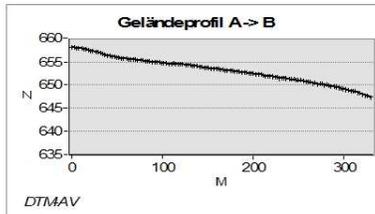
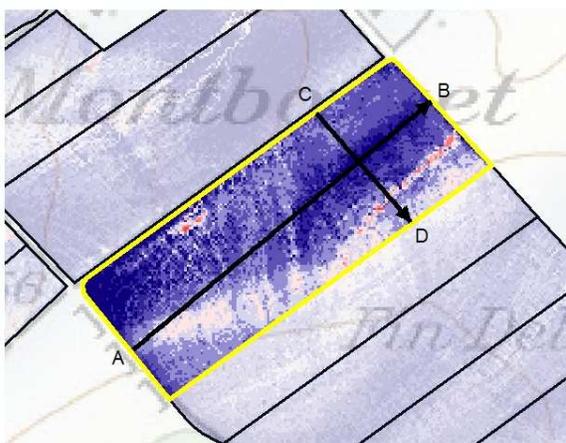
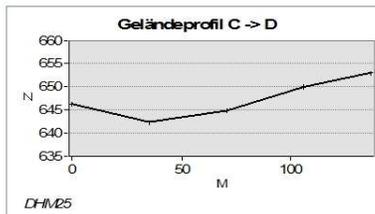
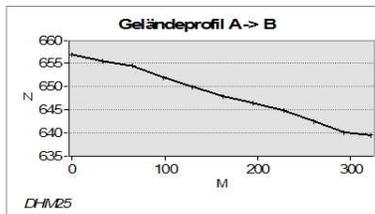
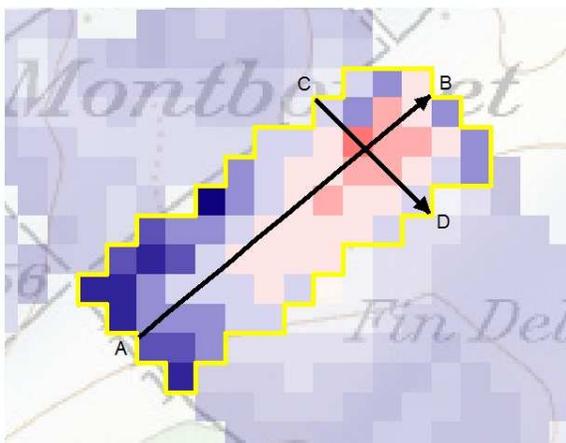
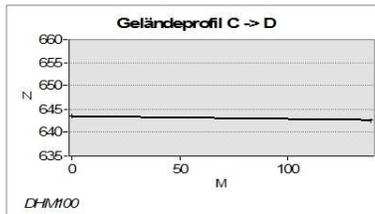
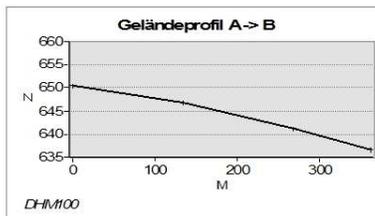
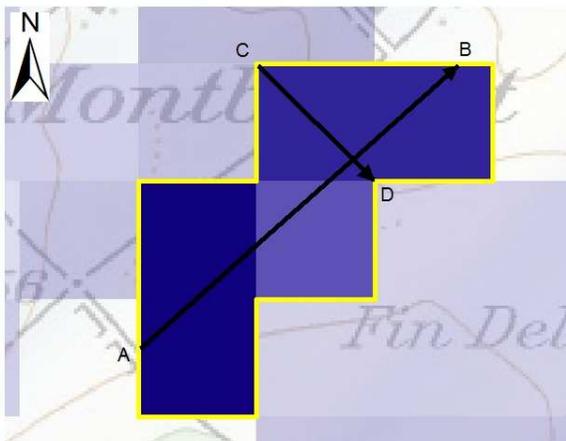
Auffällig ist hier, dass entgegen den Modellierungen für das Gesamtgebiet die DHM25-Modellierung höhere Werte berechnet als die DTM-AV-Modellierung. Auch dies gründet im digitalen Höhenmodell. Im Folgenden die Kommentare zu den einzelnen Geländeprofilen:

Geländeprofil „A -> B“: Das angezeigte Geländeprofil zeigt in diesem Fall keine grösseren Veränderungen mit höher werdender Auflösung auf.

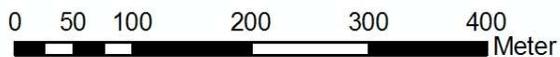
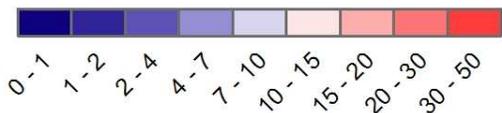
Geländeprofil „C -> D“: Das Profil in der Auflösung DHM100 zeigt ein mehr oder weniger ebenes Gelände an. Dies ist nicht überraschend, da das Profil in dieser Auflösung ein einziges Pixel anzeigt. In der nächst höheren Auflösung DHM25 ist ein Profil mit einer Talsohle zu erkennen. Dies erklärt auch das Anzeigen einer höheren Erosionsgefährdung in dieser Auflösung. Das DHM25 (swisstopo) übersieht einen leichten Gegenhang in der Mitte der Parzelle. Der Gegenhang wird erst vom DTM-AV aufgedeckt und verhindert in diesem Fall eine grössere Erosionsgefährdung.

*Abbildung 6.2 (nächste Seite): Vergleich von rasterzellenscharfen Bodenerosionsgefährdungsmo-
dellierungen der Parzelle 80 im Untersuchungsgebiet Estavayer.
(Quelle: eigene Darstellung)*

Estavayer Parzelle 80 - Vergleich DHM-Abtrag



MUSLE87 Gefährdung [t/(ha*a)]



Grundlagen: Erosionsgefährdung AV Erosion (eigene Berechnung), Parzellennetz Gemeinde Murist (AV Fribourg), SwissMap25 (swisstopo)
Layout: Michael Chisholm

6.2.3 Teilgebiet Oberaargau Nordost

Das Teilgebiet im Nordosten des Untersuchungsgebietes Oberaargau beinhaltet die Parzellen 1830, 1840, 1850, 1870 und 1880. Die Mittelwerte für das Teilgebiet sind in Tabelle 6.6 enthalten. Dabei sind nebst der Erosionsgefährdung A auch die Relief-faktoren L und S aufgeführt

Tabelle 6.6: Mittelwerte für das Teilgebiet Oberaargau Nordost. Angegeben ist für jede Auflösung die Parzellenfläche in Hektaren, die modellierte Bodenerosionsgefährdung A (berechnet mit MUSLE87), der Hanglängenfaktor L und der Hangneigungsfaktor S. (Quelle: eigene Berechnung)

Auflösung	Fläche [ha]	A [$t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]	L [dimensionslos]	S [dimensionslos]
DHM100	7	3.74	2.19	1.36
DHM25	5.37	7.19	2.80	2.11
DTM-AV	5.39	14.96	5.45	2.64

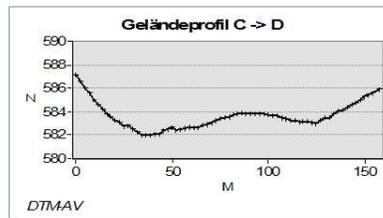
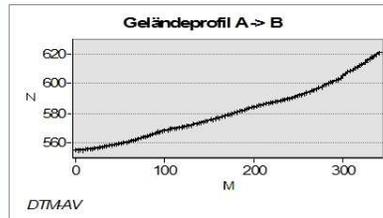
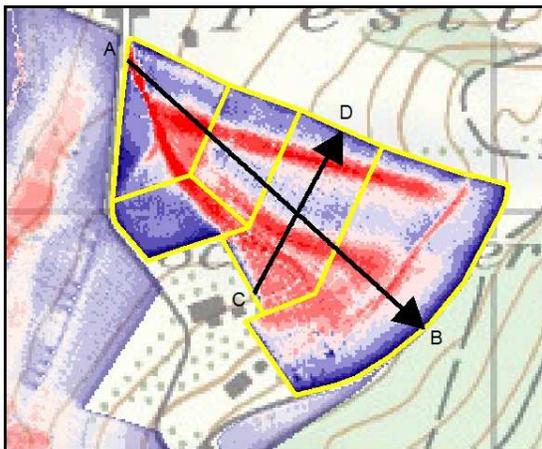
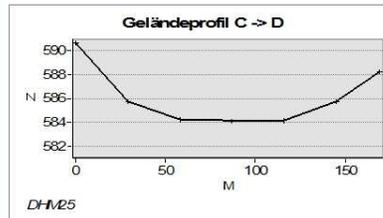
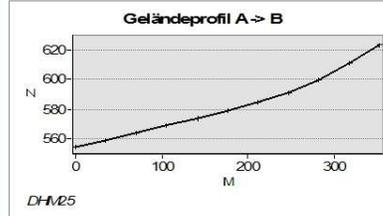
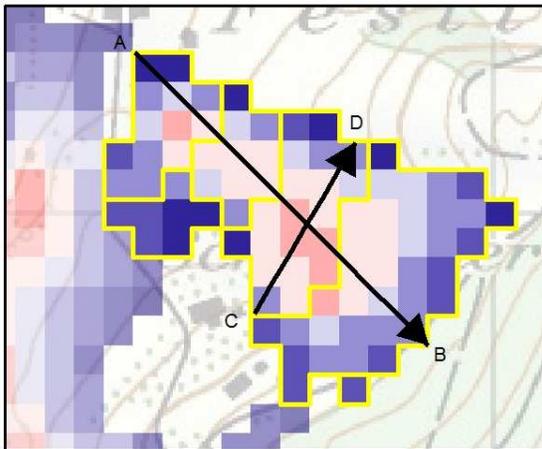
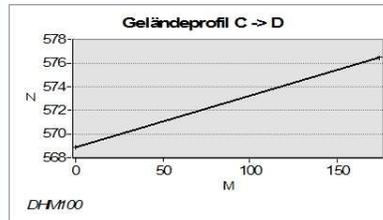
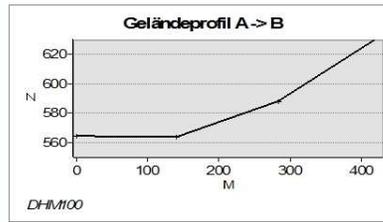
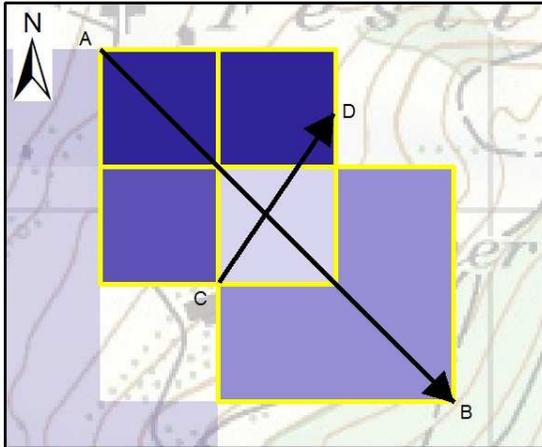
Anhand dieses Gebietes ist gut zu erkennen, wie mit höherer Auflösung der Erosionsgefährdungsmodellierung einzelne Mulden und Kuppen ausgeschieden werden. Erkennbar ist diese Entwicklung vor allem im Geländeprofil „C -> D“. Im Folgenden die Kommentare zu den einzelnen Geländeprofilen:

Geländeprofil „A -> B“: Dieses Profil liegt in der generellen Hangrichtung. Dementsprechend zeigt das Profil zwischen den verschiedenen Auflösungen keine grösseren Veränderungen auf.

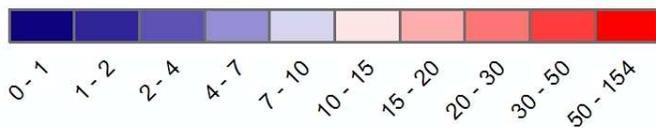
Geländeprofil „C -> D“: Die Differenzen kommen zum Vorschein, wenn man das Profil quer zum Hang betrachtet. Schön zu erkennen ist die Ausbildung von zuerst einer grossen Mulde im DHM25, dann im DTM-AV wird die Depression als eine Anreihung von zwei Mulden identifiziert. Die grossen lokalen Hangneigungen, die in diesen Mulden vorherrschen, erzeugen in diesen Bereichen eine grosse Erosionsgefährdung.

Abbildung 6.3 (nächste Seite): Vergleich von rasterzellenscharfen Bodenerosionsgefährdungsmodellierungen mehrerer Parzellen an einem Einzelhang im Nordosten des Untersuchungsgebietes Oberaargau. (Quelle: eigene Darstellung)

Oberaargau NE - Vergleich DHM-Abtrag



MUSLE87 Erosionsgefährdung [t/(ha*a)]



Grundlagen: SwissMap25 (swisstopo), Parzellennetz Oberaargau (AV Bern), Erosionsgefährdung Oberaargau (Modellierung AVErosion)
Layout: Michael Chisholm

6.3 Verifikation mit Feldfotografien

Bei einer Feldbegehung im Untersuchungsgebiet Estavayer mit Mitarbeitern vom CDE und ART haben wir anhand der hier erstellten Erosionsgefährdungskarten bereits eine visuelle Überprüfung der Resultate anstellen können. Dabei wurde deutlich, dass die rasterzellenscharfe MUSLE87-Modellierung mit DTM-AV (swisstopo) potentiell Erosionsgefährdete Gebiete gut identifiziert hat.

Das DTM-AV (swisstopo) mit seiner extrem hohen Auflösung bildet die Erdoberfläche nahezu in ihrem Originalzustand ab. Wir haben im vorigen Abschnitt gesehen, dass aufgrund dieser Auflösung auch kleine Geländeformen erkannt und ins Modell einbezogen werden. Eine Möglichkeit, die Richtigkeit dieser Geländeformen zu verifizieren, ist der Vergleich mit Fotografien aus den Feldstudien in den Untersuchungsgebieten. Volker Prasuhn vom ART und Thomas Ledermann vom CDE haben mir dafür ausgewählte Fotos mit erfassten Erosionsschäden zur Verfügung gestellt. Die Fotos sind im Rahmen von Erosionsschadenskartierungen aufgenommen worden. Gemäss Angabe der kartierenden Personen konnte auf den abgebildeten Parzellen schon öfter Bodenerosion beobachtet werden.

Mit einer Verifizierung anhand von Fotografien können die absoluten Werte der Modellierung nicht erhärtet werden. Hierzu müssten langjährige Messwerte aus den untersuchten Parzellen vorliegen. Jedoch sollte ersichtlich sein, ob in den im Modell als gefährdet eingestuften Mulden tatsächlich Bodenerosion stattfindet. Insofern soll diese Methode als qualitative Resultatsbewertung dienen. Die Abbildungen auf den folgenden Seiten zeigen jeweils die rasterzellenscharfe MUSLE87-Modellierung in DTM-AV-Auflösung und daneben ein Foto der modellierten Parzelle. Die Pfeilköpfe geben jeweils die Position des Fotografen an.

Wie bei der Feldbegehung in Estavayer beobachtet, stimmen auch hier die im Modell identifizierten Gefahrzonen gut mit den natürlichen Verhältnissen überein. Gerade Geländemulden, welche in den tieferen Auflösungen des DHM100 (BFS) und DHM25 (swisstopo) übersehen werden würden, kommen schön zum Vorschein (vgl. vorangehender Abschnitt 6.2).

Abbildung 6.4: Erosion in einer Geländemulde, Region Frienisberg Mitte. Vergleich einer zellscharfen MUSLE87-Modellierung mit DTM-AV (swisstopo) mit einer Fotografie.

Foto: V. Prasuhn (ART)

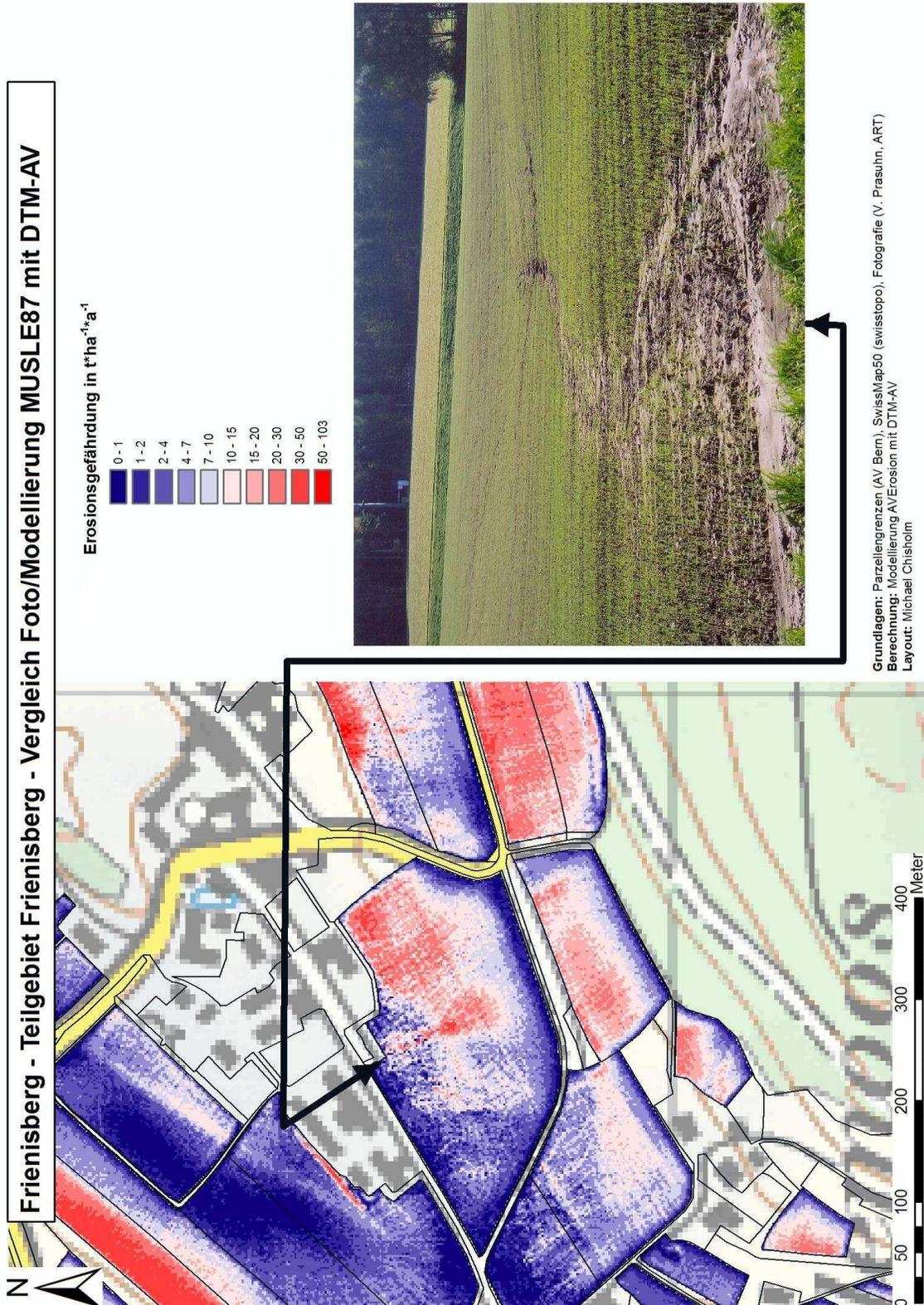


Abbildung 6.5: Geländemulde im Osten der Region Frienisberg. Vergleich einer zellenscharfen MUSLE87-Modellierung mit DTM-AV (swisstopo) mit Fotografie.

Foto: V. Prasuhn (ART)

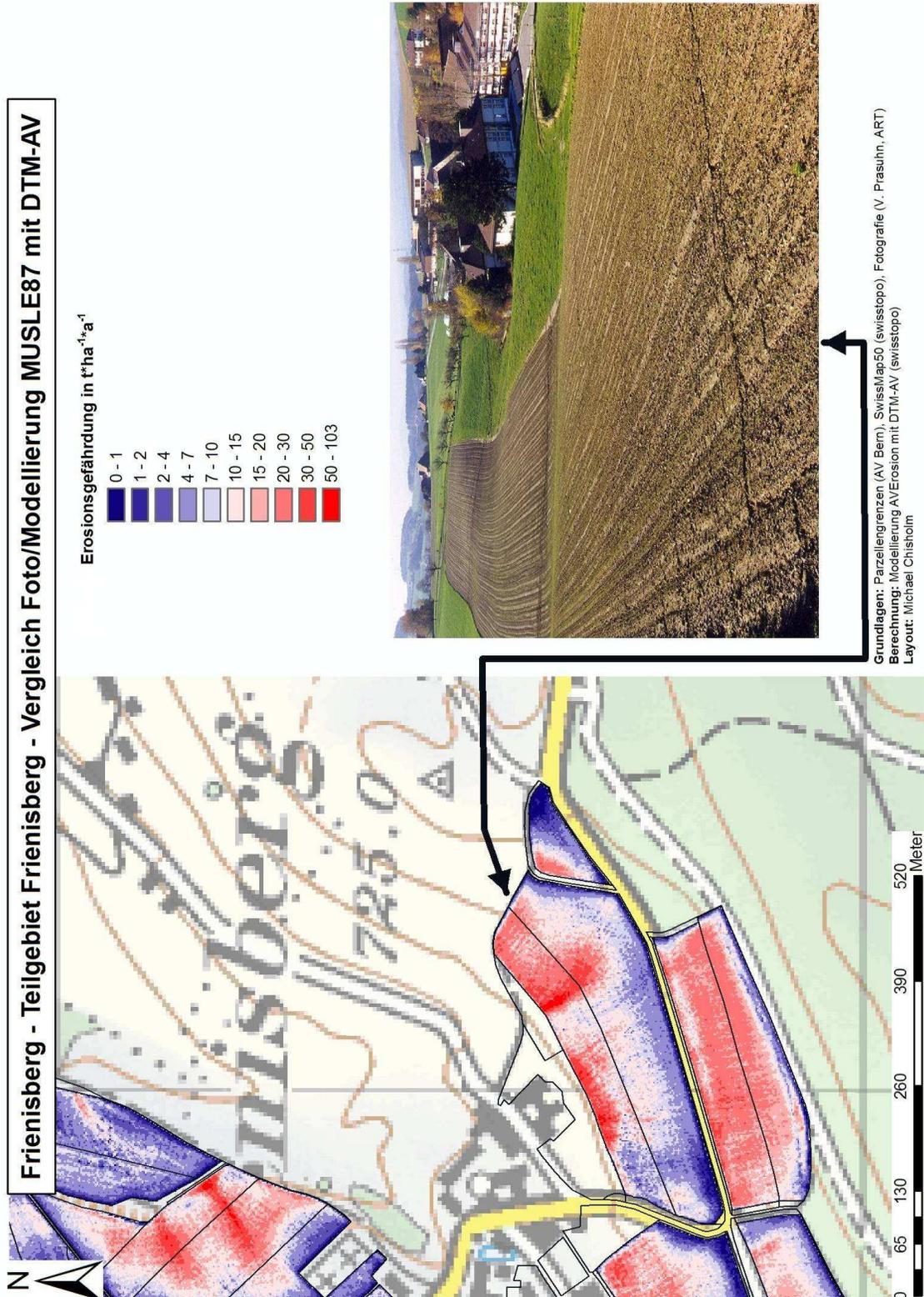
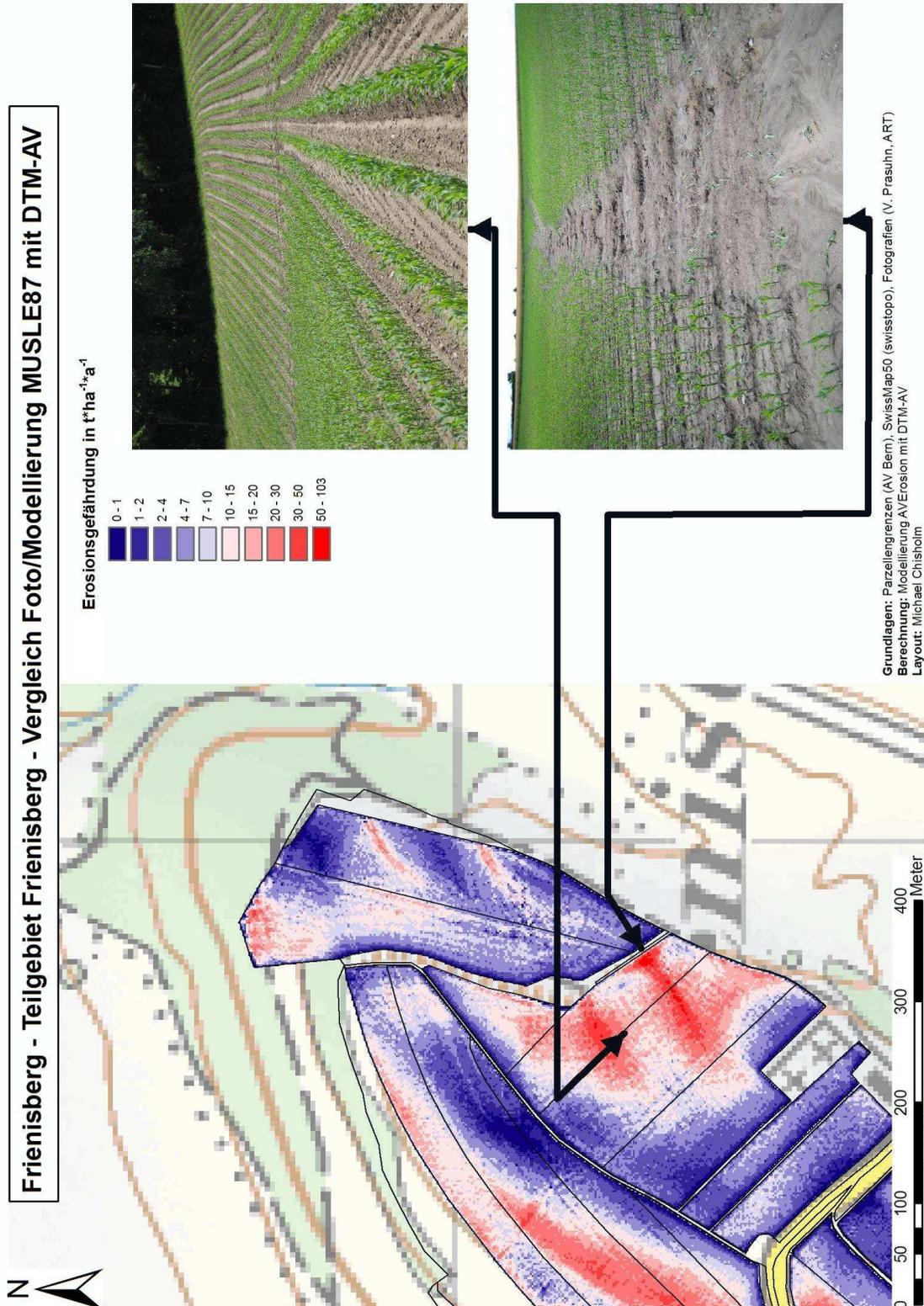


Abbildung 6.6: Geländemulde im Nordosten des Untersuchungsgebietes Frienisberg aus zwei Perspektiven. Vergleich einer zellenscharfen MUSLE87-Modellierung in DTM-AV-Auflösung mit Fotografien.

Fotos: V. Prasuhn (ART)



6. Bewertung der Resultate und des Modells

Abbildung 6.7: Geländemulde im Nordwesten des Untersuchungsgebietes Estavayer. Vergleich einer zellscharfen MUSLE87-Modellierung in DTM-AV-Auflösung mit einer Fotografie.

(Foto: T. Ledermann, CDE)

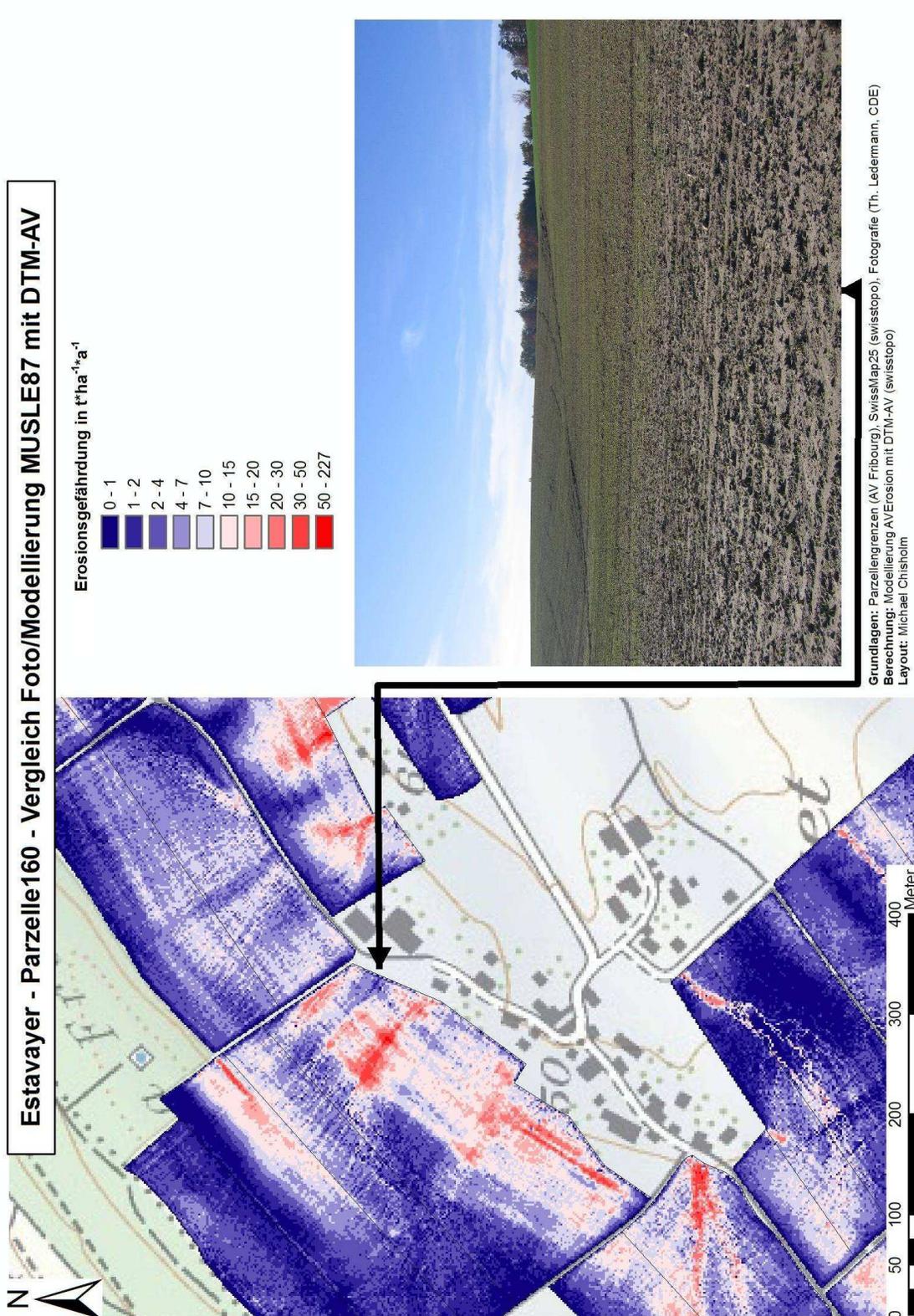
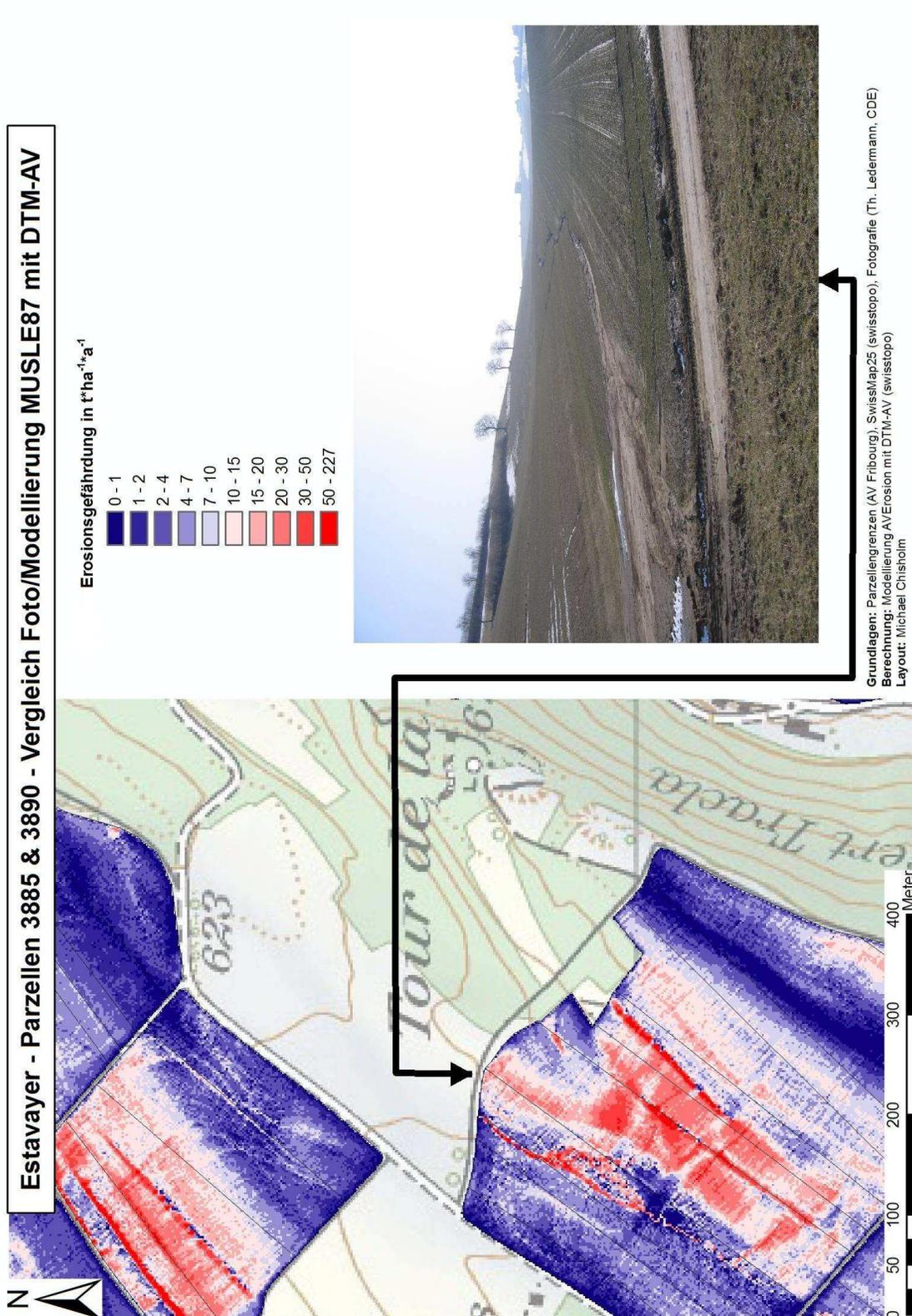


Abbildung 6.8: Erosion mit Ablagerungen auf einer Strasse im Osten des Untersuchungsgebietes Estavayer. Vergleich einer zellscharfen MUSLE87-Modellierung in DTM-AV-Auflösung mit einer Fotografie.

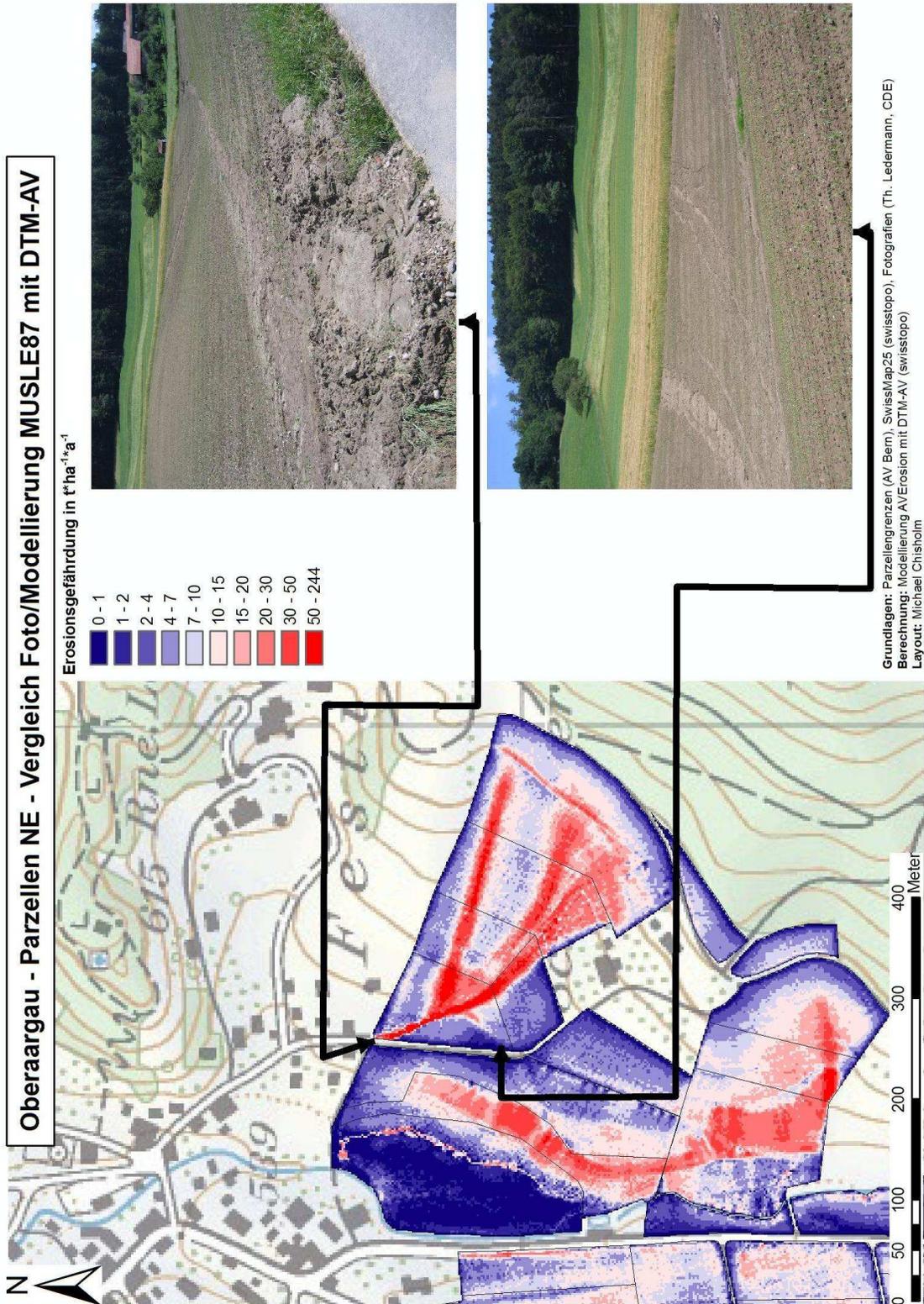
Foto: T. Ledermann (CDE)



6. Bewertung der Resultate und des Modells

Abbildung 6.9: Geländemulden im Nordosten des Untersuchungsgebietes Oberaargau. Vergleich einer zellenscharfen MUSLE87-Modellierung mit Fotografien. Es handelt sich hierbei um denselben Hang wie in Kap. 6.2.3, S. 78-79.

Fotos: T. Ledermann (CDE)



6.4 Resultatsbewertung anhand von Modellberechnungen

Die Möglichkeiten einer Verifikation meiner Berechnungen durch effektiv gemessene Daten oder anderen Modellierungen in kleineren Einzugsgebieten sind beschränkt. Das Modell berechnet nicht ereignisbezogene Werte, sondern ein langjähriges Mittel. Empirische Daten sind daher grundsätzlich nur dann für einen Vergleich sinnvoll, wenn sie über mehrere Jahre entstanden sind. Modellerte Vergleichsdaten stehen für die Untersuchungsgebiete zumindest im Hektarraster in FRIEDLI (2006) zur Verfügung. Modellerte sowie empirische Daten stehen für den Kanton Bern im Gebiet Frienisberg (PRASUHN & GRÜNIG 2001) zur Verfügung.

6.4.1 Vergleich mit Modellberechnungen von FRIEDLI (2006)

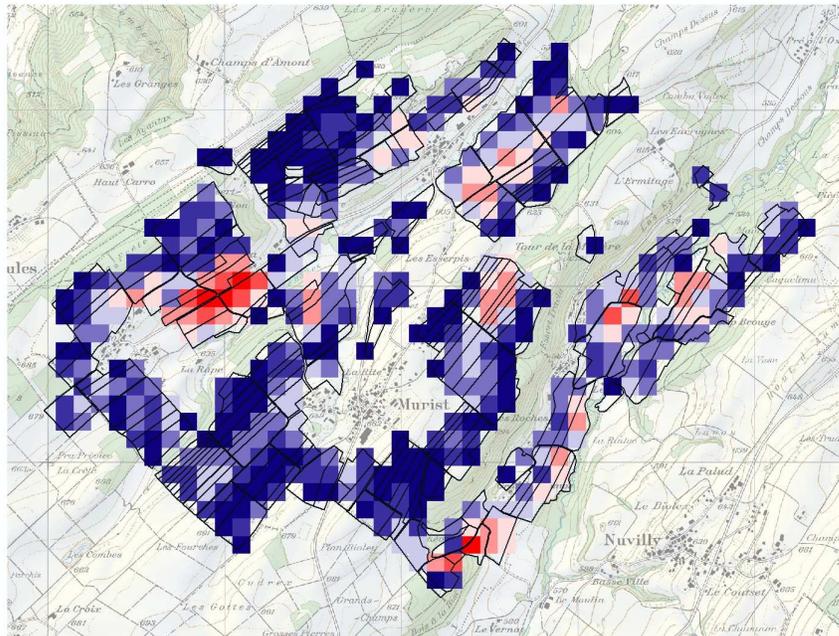
Ein Vergleich mit ebenfalls modellierten Daten kann mit FRIEDLI (2006) gezogen werden. Dazu mussten die digitalisierten Flächen (Hektarraster) mit dem auf Hektarraster aggregierten Parzellennetz des jeweiligen Untersuchungsgebietes verschnitten werden. Auf diese Weise sind beide Datensätze deckungsgleich. Es ist dabei zu beachten, dass die Daten beide über die USLE im Hektarraster bestimmt wurden. Es handelt sich hierbei also um einen Vergleich von Berechnungen, die auf demselben Modell basieren, jedoch zum Teil unterschiedliche Grundlagedaten enthalten. In der Tabelle 6.7 werden die Ergebnisse aus FRIEDLI (2006) mit den in dieser Arbeit modellierten Daten für das Untersuchungsgebiet Estavayer verglichen. Die Vergleichsdaten stammen aus der gesamtschweizer Modellierung der aktuellen Erosion im Hektarraster (FRIEDLI, 2006: 71).

Während für die Faktoren R, K und C in beiden Arbeiten dieselben Daten benutzt worden sind, so sind die in der Tabelle 6.7 aufgeführten Werte im Vergleich zu FRIEDLI (2006) anders erhoben worden und haben entsprechend Einfluss auf die unterschiedlichen Resultate in beiden Modellen.

Abbildung 6.10 (nächste Seite): Vergleich der rasterzellenscharfen USLE-Modellierungen in Hektarrasterauflösung von AVErosion und von FRIEDLI (2006). Oben ist die Modellierung aus dieser Arbeit abgebildet. Bereits hier fällt auf, dass AVErosion zum Teil eine deutlich höhere Erosionsgefährdung modelliert als FRIEDLI (2006), abgebildet durch die roten Bereiche. (Quelle: eigene Darstellung)

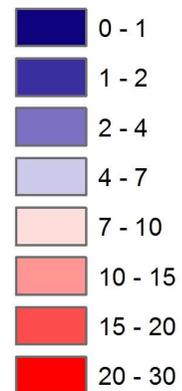
Estavayer - Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$
 Vergleich Modellierung AVErosion mit Modellierung FRIEDLI (2006)

Modell AVErosion (USLE mit DHM100)

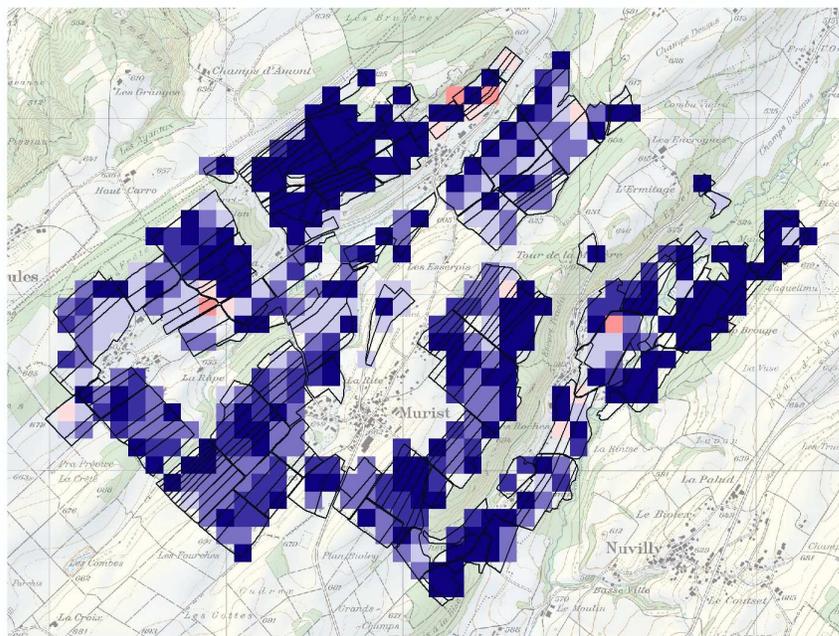


0 0.25 0.5 1 1.5 2 2.5
 Kilometer

Erosionsgefährdung
 $[t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}]$



Modell FRIEDLI



Grundlagen: Parzellennetz Gemeinde Murist (AV Fribourg), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K-Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung AVErosion auf Grundlage von DTM-AV (swisstopo)], aktuelle Erosionsgefährdung (FRIEDLI 2006)
Berechnung: AVErosion mit Modell USLE
Layout: Michael Chisholm

Tabelle 6.7: Vergleich zwischen Berechnungen von FRIEDLI (2006) und den Berechnungen von AVErosion im Untersuchungsgebiet Estavayer.

(Quelle: FRIEDLI 2006, eigene Berechnung)

Untersuchungsgebiet Estavayer				
Einflussfaktoren (USLE), Erosionsgefährdung	Berechnungen (FRIEDLI 2006)		Eigene Berechnungen (AVErosion-Funktion USLE)	
	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich
λ [erosive Hanglänge in m]	100	100 (Standardwert)	188 (Median: 100)	0 bis 1773
LS-Faktor [dimensionslos]	2.70	0.1 bis 15.40	2.02	0.03 bis 14.57
P-Faktor [dimensionslos]	0.88	0.88 (Standardwert)	0.76	0.4 bis 1
Erosionsgefährdung [$t^*ha^{-1}a^{-1}$]	2.02 (Median: 1.26)	0.01 bis 10.85	3.65 (Median: 2.02)	0.05 bis 26.38

Der Vergleich zwischen den berechneten Werten der Bodenerosionsgefährdung dieser Arbeit mit den Daten aus FRIEDLI (2006) zeigt neben dem Wertebereich auch die Mittelwerte und Medianwerte (Tabelle 6.7). Die Mittelwerte unterscheiden sich relativ stark voneinander, wobei sich die Grössenordnung der Abtragsschätzung immer noch im selben Bereich bewegt. Betrachtet man aber den Median, welcher statistisch gesehen stabiler gegenüber Ausreissern ist, so ist eine Annäherung der Werte aneinander zu beobachten. Generell liegen die Berechnungen in der vorliegenden Arbeit etwas höher. Dies kann vor allem mit der anderen Handhabung des Hanglängenfaktors L erklärt werden. Die Grundlage zur Berechnung des LS-Faktors ist beidseits das Submodell von RENARD et al. (1997). Der Hauptunterschied zwischen den Berechnungen liegt in der Beurteilung der erosiven Hanglänge λ . Die Hanglänge wird mit dem in dieser Arbeit eingesetzten Modell differenziert berechnet. Im Gegensatz dazu hat FRIEDLI (2006) eine Standardhanglänge von 100m verwendet. Bei grobmaschigen Reliefdaten und bei Schwierigkeiten der Berücksichtigung von weiteren Faktoren (Wegenetz, Einzelbäume, Hecken usw.) ist der Einsatz von Standardhanglängen geläufig. Die Extension AVErosion lässt eine solche Möglichkeit nicht zu. Dadurch entstehen gerade in gröberen Auflösungen zum Teil sehr grosse Hanglängen (Maximum: >1500m) und somit grosse L-Faktoren. Hierdurch lassen sich die höheren Erosionsschätzungen dieser Arbeit erklären.

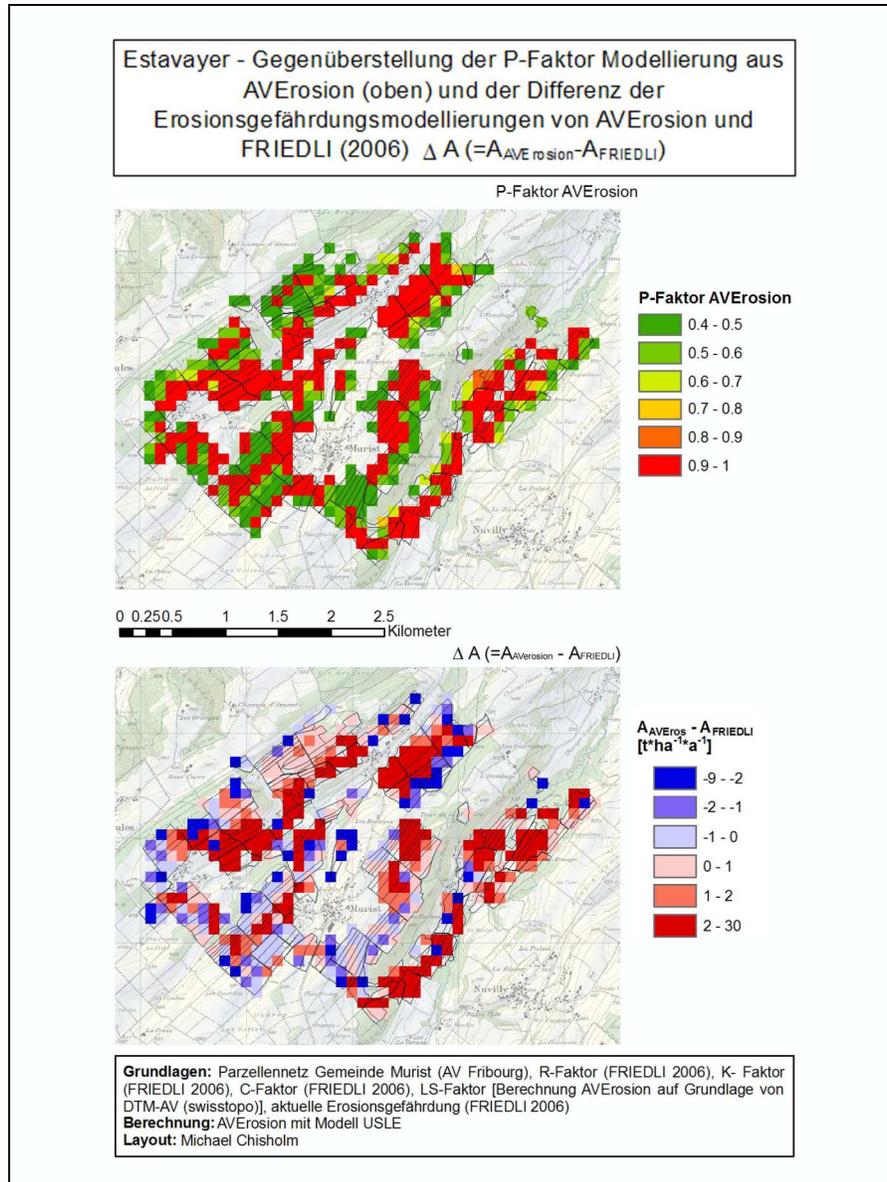
Ein weiterer Grund ist die differenzierte Berechnungsweise des P-Faktors in AVErosion gegenüber dem eingesetzten Standardwert in FRIEDLI (2006). Die Abbildung 6.11 zeigt die räumliche Verteilung der P-Faktoren aus der AVErosion-Modellierung und stellt diese einer Karte gegenüber, wo die räumlichen Differenzen zwischen den

6. Bewertung der Resultate und des Modells

Modellierungen illustriert sind. Schnell wird ersichtlich, dass gerade die Bereiche mit erhöhtem P-Faktor (rote Bereiche in der oberen Karte) auch in einer erhöhten Erosionsgefährdung gegenüber FRIEDLI (2006) resultierten (vgl. Abbildung 6.11).

Abbildung 6.11: Gegenüberstellung einer P-Faktor Modellierung (oben) mit einem Raster, welches die Differenz zwischen der Modellierung von FRIEDLI (2006) und der Modellierung mit AVErosion anzeigt (unten).

(Quelle: eigene Darstellung)



Die obere Darstellung in Abbildung 6.11 zeigt modellierte P-Faktoren aus der AVErosion Berechnung (USLE mit DHM100). Die roten Bereiche sind Zonen mit höheren P-Faktoren als bei FRIEDLI (2006). Die untere Darstellung zeigt die Differenz zwi-

schen der berechneten Erosionsgefährdung von AVErosion und der Erosionsgefährdung von FRIEDLI (2006). Rote Bereiche zeigen Bereiche, wo AVErosion im Vergleich zu FRIEDLI (2006) höhere Werte modelliert hat.

Schaut man sich die Gegenüberstellungen aus den anderen zwei Untersuchungsgebieten an (Tabelle 6.8 und Tabelle 6.9), bestätigen sich die Aussagen aus der Analyse vom Untersuchungsgebiet Estavayer.

Tabelle 6.8: Vergleich zwischen Berechnungen von FRIEDLI (2006) und den Berechnungen von AVErosion im Untersuchungsgebiet Oberaargau.

(Quelle: FRIEDLI 2006, eigene Berechnung)

Untersuchungsgebiet Oberaargau				
Einflussfaktoren (USLE), Erosionsgefährdung	Berechnungen (FRIEDLI 2006)		Eigene Berechnungen (AVErosion-Funktion USLE)	
	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich
λ [erosive Hanglänge in m]	100	100 (Standardwert)	242 (Median: 100)	0 bis 1866
LS-Faktor [dimensionslos]	3.29	0.06 bis 13.58	2.80	0.17 bis 17.24
P-Faktor [dimensionslos]	0.88	0.88 (Standardwert)	0.79	0.43 bis 1.00
Erosionsgefährdung [$t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]	1.87 (Median: 1.41)	0.06 bis 12.60	3.13 (Median: 1.82)	0.19 bis 16.89

Tabelle 6.9: Vergleich zwischen Berechnungen von FRIEDLI (2006) und den Berechnungen von AVErosion im Untersuchungsgebiet Frienisberg.

(Quelle: FRIEDLI 2006, eigene Berechnung)

Untersuchungsgebiet Frienisberg				
Einflussfaktoren (USLE), Erosionsgefährdung	Berechnungen (FRIEDLI 2006)		Eigene Berechnungen (AVErosion-Funktion USLE)	
	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich
λ [erosive Hanglänge in m]	100	100 (Standardwert)	126 (Median: 100)	0 bis 824
LS-Faktor [dimensionslos]	1.80	0.06 bis 11.48	0.91	0.03 bis 9.16
P-Faktor [dimensionslos]	0.88	0.88 (Standardwert)	0.73	0.4 bis 1.00
Erosionsgefährdung [$t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]	1.79 (Median: 1.10)	0.01 bis 14.92	2.21 (Median: 1.30)	0.06 bis 32.22

6.4.2 Vergleich mit Modellierungen von PRASUHN & GRÜNIG (2001)

Eine weitere Grundlage zum Vergleich der berechneten Daten sind die Berechnungen von PRASUHN & GRÜNIG (2001) aus dem Gebiet Frienisberg. Ein Vergleich mit diesen Daten macht insofern Sinn, als dass PRASUHN & GRÜNIG (2001) die besseren Grundlagendaten zur Verfügung standen (Bodenkartierungen, Niederschlagswerte, Fruchtfolgen,...). In der Tabelle 6.10 werden die Ergebnisse aus PRASUHN & GRÜNIG (2001) mit den in dieser Arbeit erhobenen Daten verglichen. Ein räumlicher Vergleich der Daten folgt auf der nächsten Seite (Abbildung 6.12). In PRASUHN & GRÜNIG (2001) wurden die Faktoren und Abtragswerte über Feldmessungen (Niederschlag, Boden, Relief) und Betriebsbefragungen (Fruchtfolgen, Bodenbearbeitung, Schutzmassnahmen) schlagbezogen mit der USLE generiert. Für den Vergleich habe ich hier ebenfalls die schlagbezogene Auflösung gewählt. Das Modell zur Bestimmung der Werte war dabei die MUSLE87 in der Auflösung von 2 Metern des DTM-AV (swisstopo). Hier handelt es sich also um einen Vergleich von Berechnungen, basierend auf einem leicht unterschiedlichen Modell (betrifft Bestimmung des L-Faktors), und mit unterschiedlichen Grundlagendaten.

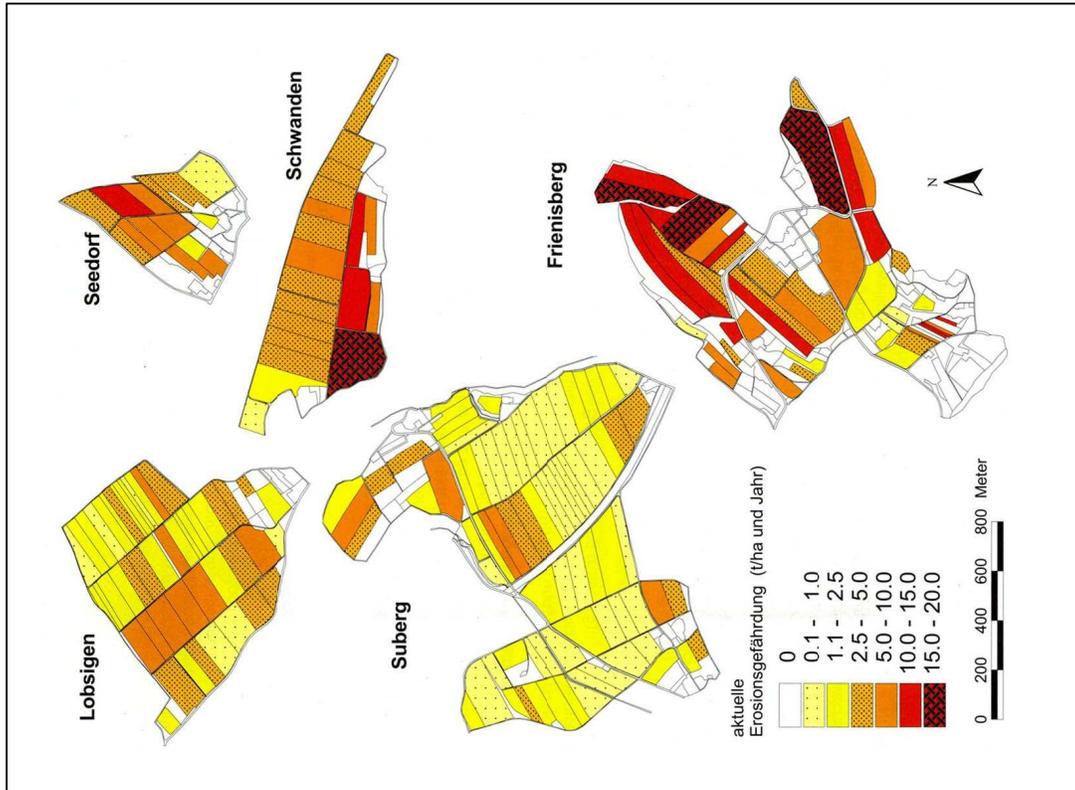
Tabelle 6.10: Vergleich zwischen den Berechnungen von PRASUHN & GRÜNIG (2001) im Gebiet Frienisberg (Seedorf, Lobsigen, Schwanden, Frienisberg, Suberg) und meinen Berechnungen mit AVErosion. Die Werte sind jeweils zusammengesetzt aus den Mittelwerten der Parzellen. (Quelle: PRASUHN & GRÜNIG (2001), eigene Berechnung)

Untersuchungsgebiet Frienisberg				
Einflussfaktoren, Erosionsgefährdung	Berechnungen (PRASUHN & GRÜNIG 2001)		Berechnung (FRIEDLI 2006, Eigene: AVErosion MUSLE87)	
	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich
R-Faktor [$N \cdot h^{-1}$]	83	80 bis 90	88	84 bis 94
K-Faktor [$kg \cdot h \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$]	0.33	0.17 bis 0.42	0.35	0.35 bis 0.45
C-Faktor [dimensionslos]	0.10	0.01 bis >0.20	0.08	0.07 bis 0.11
λ [erosive Hanglänge in m]	155 (Median: 140)	35 bis 500	38 (Median: 30)	5 bis 172
LS-Faktor [dimensionslos]	1.84	0.15 bis 6.60	1.77	0.28 bis 11.49
P-Faktor [dimensionslos]	0.88	0.01 bis 1.00	0.65	0.46 bis 1.00
Erosionsgefährdung [$t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$]	4.00 (Median: 2.45)	0.1 bis 19.9	4.28 (Median: 2.96)	0.6 bis 28.3

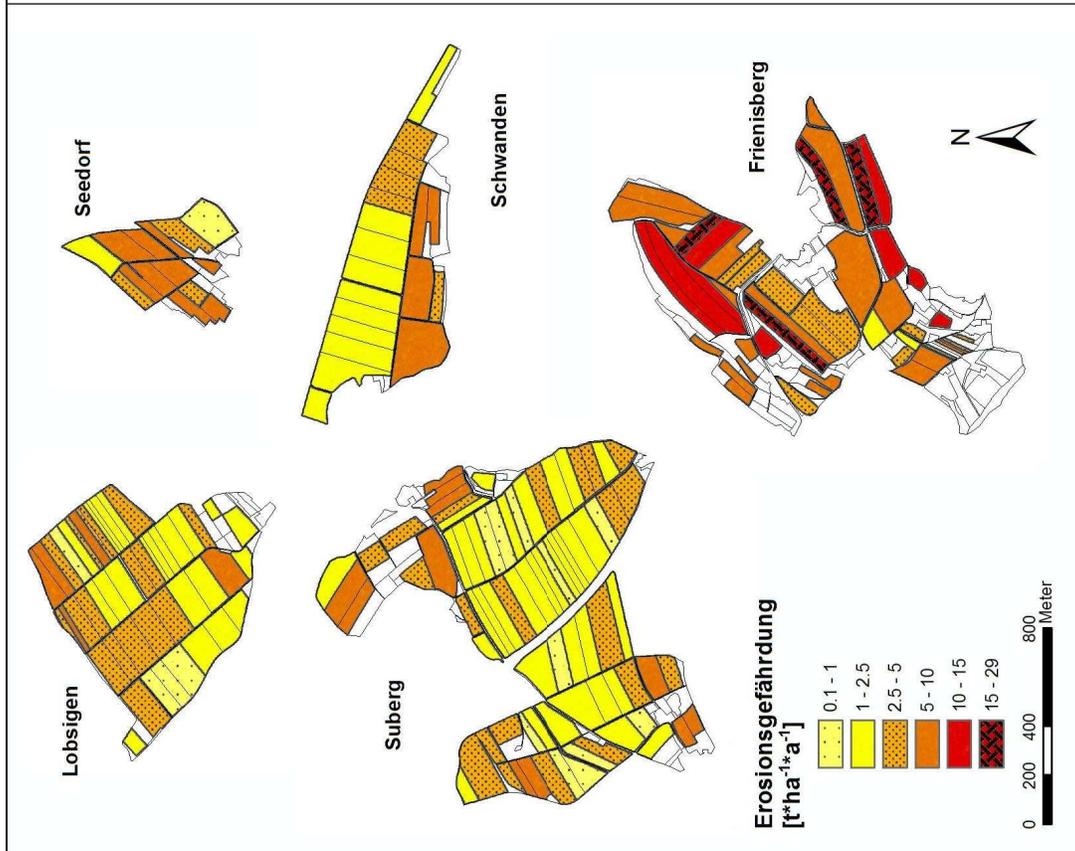
Abbildung 6.12: Gegenüberstellung der Modellierungen der Bodenerosionsgefährdung von AVErosion MUSLE87 und PRASUHN & GRÜNIG (2001).

(Quelle: eigene Darstellung, PRASUHN & GRÜNIG 2001)

Modell PRASUHN & GRÜNIG (2001)



Modell AVErosion (MUSLE87, schlagbezogen)



Wiederum sind die Faktoren R, K und C bei den eigenen Berechnungen (grau) aus FRIEDLI (2006) übernommen und in der Tabelle 6.10 aufgeführt. Was deren Qualität angeht, hat FRIEDLI (2006: 84) folgende Aussagen gemacht:

- *Für den R-Faktor standen gute Daten zur Verfügung. Dementsprechend liegen die Berechnungen sehr nahe beieinander.*
- *Beim K-Faktor sind die Mittelwerte praktisch identisch. Der Wertebereich bei den eigens berechneten K-Faktoren umfasst nur zwei K-Faktorenwerte (0,35 und 0,45) und ist daher im Vergleich zu PRASUHN & GRÜNIG (2001) völlig undifferenzierend.*
- *Der C-Faktor liegt in den eigenen Berechnungen nicht nur im Mittelwert tiefer, sondern im gesamten Wertebereich. Im Gegensatz zu PRASUHN & GRÜNIG (2001) wurden bei der Bestimmung des C-Faktors keine bodenkonservierende Bearbeitungsmethoden berücksichtigt. Dafür wurde aus Betriebszählungen aus 3 aufeinander folgenden Jahren ein prozentualer Anteil an Kunstwiesen mit einbezogen („Carryover-Effekt“)³. Der Einbezug dieses Effekts ist nicht empirisch gesichert. Demzufolge sind die tieferen C-Faktoren mit Vorsicht zu betrachten.*

(FRIEDLI 2006)

Vor allem die Aussage bezüglich des C-Faktors ist hier von grosser Bedeutung. Abgesehen von der Art der Bestimmung des C-Faktors, haben die Berechnungen mit AVErosion nur über einen mehr oder weniger konstanten C-Faktor (gemeindeweise) verfügen können. PRASUHN & GRÜNIG (2001) hingegen haben die C-Faktoren für jeden Schlag einzeln bestimmt. Dies ist ein Grund für die räumliche Differenz zwischen den Berechnungen in Abbildung 6.12.

Der Vergleich zwischen den berechneten Erosionsgefährdungswerten (Tabelle 6.10) dieser Arbeit mit den Daten aus PRASUHN & GRÜNIG (2001) zeigt neben dem Wertebereich die Mittelwerte und die Medianwerte. Der Vergleich der Mittelwerte zeigt kaum Abweichungen, auch die Medianwerte liegen nah beieinander. Generell liegen die Berechnungen in der vorliegenden Arbeit etwas höher, wenn man die Mittelwerte

³ WISCHMEIER & SMITH (1978) und AUERSWALD (2002) weisen darauf hin, dass sich vor allem der mehrjährige Anbau von Kunstwiese positiv auf Folgekulturen bezüglich C-Faktoren auswirkt. „Carryover-Effekt“: mehr Wurzelmasse, mehr organische Rückstände, mehr Bodenlebewesen, Verbesserung der Bodenstruktur.

betrachtet. Dies kann vor allem mit Ausreissern nach oben erklärt werden, welche ihren Ursprung in der Beurteilung des LS-Faktors haben. PRASUHN & GRÜNIG (2001) weisen darauf hin, dass im Durchschnitt ihre modellierten Werte im Vergleich mit gemessenen Daten zu hoch sind.

Betrachtet man den räumlichen Vergleich in Abbildung 6.12, so ist zu erkennen, dass räumlich zum Teil grössere Differenzen vorherrschen, vor allem im Teilgebiet Schwanden. Hier haben PRASUHN & GRÜNIG (2001) eher hohe C-Faktoren erfasst, was die erhöhte Anzahl an gefährdeten Parzellen bei ihrer Berechnung erklärt. Ausserdem werden hier die meisten Parzellen in Gefällsrichtung bearbeitet, was hohe P-Faktoren zur Folge hat (PRASUHN & GRÜNIG 2001).

PRASUHN & GRÜNIG (2001) haben nebst einer Bodenerosionsmodellierung mit der USLE auch Erosionskartierungen durchgeführt. Vergleicht man die Mittelwerte aus den Feldkartierungen von PRASUHN & GRÜNIG (2001) innerhalb des Untersuchungsgebietes Frienisberg zu dem in dieser Arbeit modellierten Mittelwert zeigt sich eine grössere Differenz als zwischen den ausschliesslich modellierten Werten. Der Mittelwert aus kartierten Daten beträgt 0,9 Tonnen pro Hektare und Jahr, der hier modellierte Wert 4,3 Tonnen pro Hektare und Jahr. Diese Überschätzung ist allerdings nicht so gross, wenn man bedenkt, dass bei Messungen der effektive Abtrag eher unterschätzt wird (FRIEDLI 2006).

6.5 Ackerland (*Basiskarte Parzellennetz*)

Für diese Arbeit standen aktuelle Parzellenpläne für die Untersuchungsgebiete zur Verfügung. Bei der Modellierung wurden alle Parzellen gleich behandelt. Das heisst, die Annahme war, dass auf allen Parzellen innerhalb eines Gebietes dieselben Bodenverhältnisse herrschen und dieselbe Bearbeitungsmethode angewandt wird. Angesichts der Tatsache, dass landwirtschaftliche Nutzflächen in verschiedenen Jahren unterschiedliche Kulturen haben, ist dies eine starke Vereinfachung der realen Umstände. Nebst dem Problem der ungenügenden Rücksicht auf Fruchtfolgen sind auch immer häufiger angewandte bodenkonservierende Bearbeitungsmethoden wie Direkt- oder Mulchsaat nicht berücksichtigt.

Die modellierte landwirtschaftliche Nutzfläche passt sich mit höherer Auflösung immer genauer an die realen Verhältnisse an. In der höchsten Auflösung findet man eine nahezu deckungsgleiche Übereinstimmung zwischen dem realen Ausmass ein-

zelter Parzellen und ihren grafischen Repräsentationen im GIS. Ungenauigkeiten entstehen bei der Zählung und, in geringerem Ausmass, der Grösse der modellierten Ackerflächen in tieferen Auflösungen wie bei den in dieser Arbeit eingesetzten Auflösungen 25m und 100m. Gerade bei der Auflösung im Hektarraster zeigt sich eine starke Vergröberung der Realität. Einige kleinere Parzellen gehen in dieser Auflösung verloren. Tabelle 6.11 zeigt diese Entwicklung auf.

Tabelle 6.11: Vergleich zwischen den Parzellenplänen in verschiedenen Auflösungen. Nebst der Anzahl der erfassten Parzellen ist in Klammern jeweils die durchschnittliche Parzellengrösse in Hektaren angegeben. (Quelle: eigene Berechnung)

Gebiet	Anz. Parzellen Polygondaten	Anz. Parzellen DHM100	Anz. Parzellen DHM25	Anz. Parzellen DTM-AV
<i>Estavayer</i>	238 (Ø: 1.9 ha)	205 (Ø: 2.3 ha)	238 (Ø: 1.9 ha)	238 (Ø: 1.9 ha)
<i>Oberaargau</i>	363 (Ø: 0.9 ha)	234 (Ø: 1.3 ha)	363 (Ø: 0.9 ha)	363 (Ø: 0.9 ha)
<i>Frienisberg</i>	209 (Ø: 1.3 ha)	168 (Ø: 1.6 ha)	209 (Ø: 1.3 ha)	209 (Ø: 1.3 ha)

6.6 Sensitivitätsanalyse

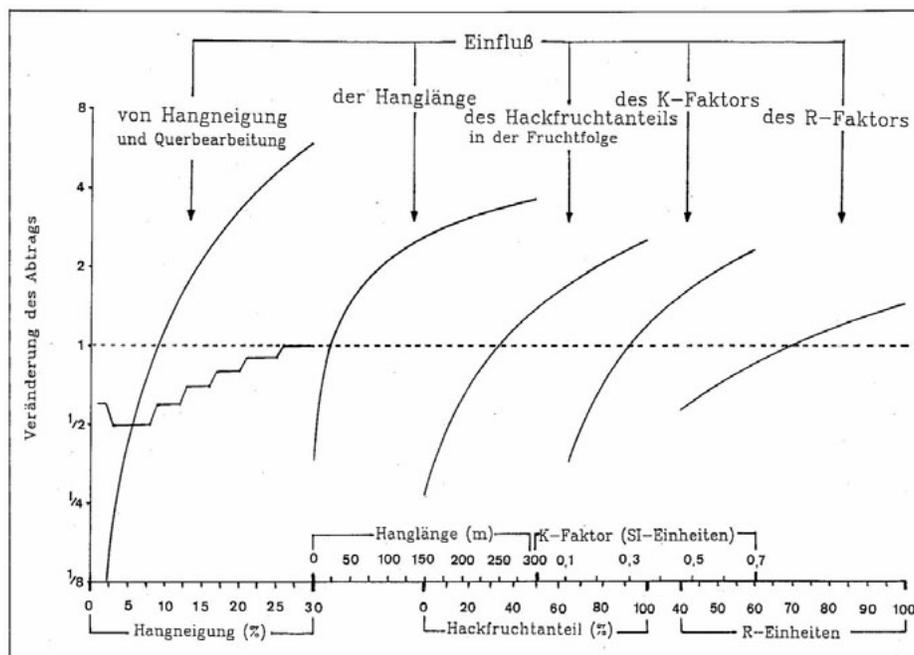
Das Grundmodell USLE wurde im Kapitel 2 ausführlich beschrieben und auf Schwächen und Grenzen ist hingewiesen worden. Die verbreitete Anwendung der USLE hat dazu geführt, nicht nur die Schwächen aufzuzeigen, sondern auch den Einfluss der einzelnen Faktoren besser zu verstehen und zu beschreiben. AUERSWALD (1987) hat sich eingehend mit der Sensitivität der USLE auseinandergesetzt. Die einzelnen Faktoren wirken sich unterschiedlich stark auf das Resultat der Berechnung aus. Die Kurven in Abbildung 6.13 verlaufen in einem bestimmten Wertebereich, der jeweils angegeben ist. Auffällig ist, dass der R-Faktor im Vergleich zu den anderen Faktoren nur geringe Abweichungen zum Standardfall zeigt. Die Einflüsse sind insofern wichtig zu kennen, weil damit beim Bestimmen der einzelnen Faktoren Fehler in der Datengrundlage oder innerhalb der Berechnungsmethode tolerierbar werden, wenn sie nicht gravierende Auswirkungen haben. So führen die schlecht aufgelösten Bodendaten (K-Faktor) nicht generell zu Schwierigkeiten bei der Genauigkeit der Modellierung.

Je steiler die Kurve eines Faktors (siehe Abbildung 6.13), desto stärker beeinflusst sie das Modellergebnis. Relief- und Bewirtschaftungsformen (LS-, und C-Faktoren) bestimmen den Bodenabtrag am stärksten. Besonders die Hangneigung wirkt sich nach AUERSWALD & SCHMIDT (1986) stark auf das Modell aus. Sie sprechen von einem Einfluss, der ca. 300 Mal mehr Gewicht hat als der R-Faktor. Die Hangneigung wirkt sich, wie in der USLE-Formel erkennbar, auf den Hanglängenfaktor aus.

Es ist zu beachten, dass der C-Faktor in AUERSWALD (1987) nicht generell untersucht wurde. In seiner Arbeit werden lediglich der Hackfruchtanteil in der Fruchtfolge und die damit verbundenen Auswirkungen auf das Modell beschrieben. Bei der ganzen Spannweite von möglichen C-Faktoren (0.003 für Wald und Grasland bis 1 für Schwarzbrache) sind die Bodenbedeckung und die Bodenbearbeitung äusserst entscheidend für den aktuellen Bodenabtrag. Der Faktor 0.003 für Wald und Grasland beispielsweise lässt die ganze Abtragschätzung unabhängig von anderen Faktoren gegen den Nullpunkt sinken. Aus diesem Grund wäre eine genaue und hoch auflösende Bestimmung von C-Faktoren, wie beispielsweise die parzellenscharfe Erhebung bei PRASUHN & GRÜNIG (2001), von grosser Bedeutung für eine zuverlässige Abtragschätzung

Abbildung 6.13: Sensitivität der USLE im Bezug auf die Bodenerosionseinflussfaktoren im Ackerbau. Die Veränderungen sind relativ zum Standardfall: 9% Hangneigung, 22m Hanglänge, 33% Hackfruchtanteil an der Fruchtfolge, K-Faktor von 0.3, R-Faktor von 70.

(Quelle: AUERSWALD 1987)



7. Synthese

Im Verlauf dieser Arbeit sind im Zusammenhang mit der Präsentation der Resultate, deren Analyse und Bewertung bereits einige Schlussfolgerungen gezogen worden. Ich versuche daher, hier möglichst auf Wiederholungen zu verzichten. Es geht in diesem Kapitel darum, auf die wesentlichen Punkte des Arbeitsprozesses einzugehen und zu prüfen, ob die formulierten Ziele erreicht werden konnten.

Mit der Erprobung und Validierung der ArcView Extension AVErosion liegt ein Instrument vor, mit der auf einfache Art und Weise die Erosionsgefährdung bestimmt werden kann. Des Weiteren sind hier mit der Erstellung von rasterzellenscharfen Bodenerosionsgefährdungskarten in drei verschiedenen Auflösungen sowie schlagbezogenen Bodenerosionsgefährdungskarten digitale Übersichtskarten bereitgestellt worden, die für weitere Projekte im Bereich des Vollzugs und der Wissenschaft als Hilfsmittel dienen können.

Mit Unterstützung der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART (Zürich) und dem Centre for Development and Environment (CDE, Uni Bern) wurden in dieser Diplomarbeit Grundlagen geschaffen, um weitere Modellierungen mit AVErosion zu erstellen. Des Weiteren konnte ich davon profitieren, das relativ neue DTM-AV (swisstopo) mit der extrem hohen Auflösung von 2 Metern an der ART zu benutzen und ins Modell einfließen zu lassen. Auch wenn die Verifizierung der Abtragsschätzung nicht komplett abgeschlossen ist, zeigen die Karten in der 2m-Auflösung doch die grossen Möglichkeiten auf, die dieses Höhenmodell in Zukunft eröffnen kann, nicht nur im Bereich der Bodenerosionsmodellierung. Gemäss den Zielformulierungen existieren Karten für drei Untersuchungsgebiete in verschiedenen Auflösungen. Für alle Karten wurde die Bodenerosionsgefährdung modelliert. Das heisst, bei der Modellierung mit USLE/MUSLE87 wurden alle Erosionsrelevanten Faktoren berücksichtigt. Die Faktorenkarten wurden einerseits aus FRIEDLI (2006) übernommen, andererseits selber durch die Verwendung von AVErosion generiert.

7.1 Methoden

Im Vordergrund hat die Evaluation von AVErosion gestanden. Die Wahl des Modells war durch die Extension AVErosion vorgegeben. Aus eigener Sicht hatte ich als unerfahrener GIS-User hinsichtlich Benutzerfreundlichkeit erhöhte Anforderungen. Aus diesem Betrachtungswinkel waren die Voraussetzungen gegeben, die Extension in einer ersten Phase auf ihre Benutzerfreundlichkeit hin zu prüfen. Es hat sich gezeigt, dass AVErosion ein unkompliziertes und effizientes Instrument ist, um einfache, langjährige Bodenerosionsschätzungen nach den Modellen USLE und MUSLE87 durchzuführen. Die Anleitung zu AVErosion von SCHÄUBLE (2005) ist gut beschrieben und lässt kaum Fragen zur Anwendung offen. Was fehlt, ist eine Migration von AVErosion zur neueren und nach eigenen Erfahrungen benutzerfreundlicheren Oberfläche von ArcGIS Desktop 9.2. Zwar wurde bereits auf Ende 2006 eine Version für ArcGIS 9.x angekündigt (SCHÄUBLE 2006), jedoch ist sie bis zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit nicht erschienen. Dies ist mir im Verlauf der Arbeit auch vom Urheber bestätigt worden.

Angesichts der Tatsache, dass in dieser Arbeit nur die reliefrelevanten Faktoren (L- und S-Faktoren, P-Faktor⁴) neu berechnet werden mussten, stand der Einfluss des Reliefs im zentralen Fokus bei der Erosionsgefährdungsmodellierung. Die Frage der Notwendigkeit eines Einsatzes von hoch auflösenden Modellen ist nicht nur für Bodenerosionsschätzungen auch eine Frage der Zielforderung. Nebst dem Thema der finanziellen Kosten erfordern räumliche Daten in einer so hohen Auflösung wie beim DTM-AV (swisstopo) eine nicht zu unterschätzende Rechenleistung, ganz unabhängig vom eingesetzten Modell (siehe dazu Abbildung 3.2, S. 28-29).

Die Boden- und Bearbeitungsfaktoren waren im Vergleich zum letztendlich eingesetzten DTM-AV (swisstopo) sehr grob aufgelöst. Dies ist gerade für den sensiblen C-Faktor etwas heikel. Die Forschung im Rahmen des COST-Projektes und die Forschungsbemühungen an der ART können in Zukunft aber hinsichtlich dessen Bestimmung Verbesserungen beitragen.

⁴ Eigentlich gelten nur die L- und S-Faktoren die Reliefaktoren. Der P-Faktor beschreibt die Erosionsschutzmassnahmen, wie zum Beispiel die Bearbeitungsrichtung und müsste somit im Feld oder durch Befragungen erhoben werden. In dieser Arbeit jedoch wird der P-Faktor mit der angewandten Methode hier indirekt über die Hangneigung bestimmt (vgl. DIN 19708: 2003-05). Mit der Annahme, dass immer Erosionsschutzmassnahmen in Gebrauch sind, solange es die Hangneigung zulässt (vgl. Kap. 3.4.6).

7.2 Resultate

Die Berechnungen der Erosionsgefährdung in hoher Auflösung haben gezeigt, dass die Bodenerosion in kleinen Gebieten sehr stark variieren kann. Selbst innerhalb einer Parzelle können sich Abtragsraten sehr stark differenzieren. Die Anwendung mit verschiedenen USLE-Modellvarianten hat gezeigt, dass je nach Auflösung die Relief-faktoren ganz anders erzeugt werden. So sind gerade in der höchsten Auflösung (2 Meter) den Abflussmodellierungen der USLE Grenzen gesetzt. Sie vermag kleine Geländeformen nicht genügend zu interpretieren (Abbildung 2.5, S. 18). Allgemein liefert die MUSLE87-Modellierung plausiblere Resultate. Dies wird auch schon von SCHÄUBLE (2005) in der Anleitung zu AVErosion angedeutet:

„MUSLE87 statt USLE“: Diese Option ist beim Start aktiviert (vom Autor empfohlen)... (SCHÄUBLE, 2005: 6)

Bereits aus der methodisch ähnlichen Arbeit von FRIEDLI (2006) ist hervorgegangen, dass das Ausmass der Erosionsgefährdung vor allem von zwei Faktoren abhängig ist. Einerseits spielt das Relief (insbesondere die Hangneigung) eine entscheidende Rolle, andererseits erweist sich der Einfluss des Menschen über den C-Faktor als sehr entscheidend. In dieser Arbeit wurde vor allem ersteres klar. Mit höheren Auflösungen verändern sich auch die Relieffaktoren. Kurze Hänge mit hohen Neigungen wie die Übergänge zwischen Kuppen und Mulden haben einen grossen Einfluss auf die lokale Erosionsgefährdung. Die in dieser Arbeit untersuchten Gebiete sind alles hügelige Ackerbaugebiete und so spielt das Relief denn auch überall eine grosse Rolle, mit Ausnahme vielleicht von einzelnen Teilgebieten im Untersuchungsgebiet Frienisberg.

Für alle Ackerflächen wurde in dieser Arbeit eine konventionelle Bearbeitung mit Pflug unterstellt. Da teilweise konservierende Bodenbearbeitungsmassnahmen eingesetzt werden, sind die berechneten Werte im Vergleich zur Realität teilweise sicher zu hoch. Bereits aus den Vergleichen zu FRIEDLI (2006) und PRASUHN & GRÜNIG (2001) ist ein Trend zur Überschätzung der Bodenerosionsgefährdung hervorgegangen. Abgesehen von den berechneten Werten liefern die Gefährdungskarten aber visuell wertvolle Hinweise für die Lokalisierung von erosionsgefährdeten Zonen. Das haben insbesondere die Modellierungen mit DTM-AV (rasterzellenscharf sowie auch schlagbezogen) gezeigt, welche gute Übereinstimmungen mit naturräumlichen Begebenheiten liefern.

7.3 Anwendungsempfehlung

Bodenerosionsprognosen bilden die Grundlage für die Evaluation von Erosionsschutzmassnahmen, weil sie zur Analyse und zur Vorbeugung von Erosionsschäden eingesetzt werden können. Eine Erosionskarte liefert wichtige Informationen über gefährdete Standorte und die Notwendigkeit von Schutzmassnahmen.

Grundsätzlich dienen Karten zur Übersicht. Bei den in dieser Arbeit erstellten Karten ist das nicht anders. Es ist nicht zulässig, die punktuellen Abtragswerte als absolut zu betrachten. Dazu ist die Datengrundlage in dieser Arbeit ungenügend. Zum Beispiel findet in der Realität nicht auf allen Parzellen innerhalb eines Gebietes dieselbe Bewirtschaftung statt. Der C-Faktor, der die Bewirtschaftung des Bodens beschreibt, ist in dieser Arbeit für jede Gemeinde einheitlich. In der Realität besitzt jede Parzelle einen eigenen C-Faktor.

Dennoch geben uns Bereiche oder Parzellen mit hohen Abtragsraten einen Hinweis darauf, dass in diesen Bereichen Handlungsbedarf besteht. Im Allgemeinen gibt es zwei unterschiedliche Wege, die Bodenerosion bei Bedarf zu senken (SCHWERTMANN et al. 1990, SCHÄUBLE 1999):

- *Veränderungen im Gelände*
Während die Hangneigung nur in geringem Umfang verändert werden kann, lässt sich die Hanglänge auf ein maximal zulässiges Mass vermindern. Dies kann über direkte Eingriffe im Gelände erreicht werden. Beispiele direkter Eingriffe sind zum Beispiel Terrassierungen, die Pflanzung von Hecken und anderen hydrologischen Barrieren oder eine Neuordnung der Ackerparzellen.
- *Nutzung geeigneter Fruchtfolgen und Anbaumethoden*
Fruchtfolgen und Anbaumethoden sind bezüglich ihrer C-Werte sehr unterschiedlich. Während konventionelle Anbaumethoden mit Pflug den Bodenabtrag im Allgemeinen erhöhen, führen andere Techniken wie Direktsaat oder Mulchsaat zu Verringerungen der Bodenerosion in unterschiedlichem Masse. Ähnliches gilt für die unterschiedlichen Fruchtfolgen (siehe C-Faktorentabelle in Kap. 3, S. 38).

Mit den Untersuchungen von Volker Prasuhn (ART) und Thomas Ledermann (CDE) zum Thema Bodenerosion stehen mit fortlaufender Zeit immer mehr Daten zur Ver-

fügung. So existieren einerseits schon parzellenscharf erhobene Daten zu K-, C-, und P-Faktoren, Daten, die in dieser Untersuchung bloss abgeschätzt worden sind, andererseits sind bereits auch quantitative Angaben zur Bodenerosion auf Einzelparzellen erhoben worden, welche durch langjährige Erosionsschadenskartierungen entstanden sind.

Bezüglich der Aussagen in diesem Abschnitt lässt AVErosion noch Möglichkeiten zur vertieften Analyse der Bodenerosionsgefährdung zu, die in dieser Arbeit nicht angewandt worden sind. Eine Beschreibung der erweiterten Funktionen ist im folgenden Abschnitt zu lesen.

7.4 Ausblick

Nebst der Bodenerosionsgefährdung können in AVErosion auch die Stoffbilanz und die tolerierbaren Nutzungsintensitäten modelliert werden. Die Methodik dieser Analysen wird hier kurz skizziert. Ausführliche Erläuterungen finden sich in SCHÄUBLE (1999, 2005).

Interaktive Ergänzung von hydrologischen Barrieren: Zur Simulation von Bodenschutzmassnahmen (Hecken, Schutzstreifen, Hindernisse o. ä.) kann ein vorhandenes Schlagraster oder Höhenmodell mit zusätzlichen Elementen modifiziert werden. Solche nachträglich eingefügten Elemente gehen als NoData-Zellen in das zu berechnende Raster ein. Pixel mit NoData-Werten wirken bei der Berechnung der Bodenerosion als Hindernisse, welche den Stofftransport vollständig zum Erliegen bringen. Sie simulieren damit die Auswirkungen der genannten Fließbarrieren. Mit Hilfe dieser Funktion in AVErosion können beispielsweise nachträglich Hecken eingetragen werden, die im Grundlagendatensatz fehlen oder vielleicht in Planung sind. Auf diese Weise kann auch der Erosionshemmende Effekt von solchen Hindernissen überprüft werden (SCHÄUBLE 2005).

Stoffbilanz: Im Unterschied zu der in dieser Arbeit berechneten Bodenerosionsgefährdung nach USLE/MUSLE87 zeigt die Stoffbilanz auf, wo und in welchem Masse Erosion stattfindet und sich das erodierte Bodenmaterial ablagert (Kappung des Bodenprofils, Akkumulation). Mit den berechneten Resultaten zur Bodenerosionsgefährdung nach MUSLE87 und einem DHM als Eingabewert wird die Stoffbilanz berechnet. Durch die Stoffbilanzberechnungen können nicht nur Akkumulations- und Erosionszonen prognostiziert werden, darüber hinaus sind auch Abschätzungen des

chemischen Stofftransports möglich. Wo ein effektiver Bodenverlust bzw. –gewinn auftritt, findet gleichzeitig auch ein effektiver Verlust bzw. Gewinn von Nährstoffen und anderen chemischen Substanzen statt. Auf diese Weise lassen sich nebst der Bilanzierung der Bodenmasse auch Verarmungs- und Eutrophierungszonen im Gelände prognostizieren (SCHÄUBLE 2005).

CP_{max}-Szenarien: Mit Hilfe dieser Funktion kann in der Extension AVErosion die maximal zulässige Nutzungsintensität (=CP_{max}-Werte) von landwirtschaftlichen Flächen bestimmt werden, die zur Unterschreitung eines vorgegebenen Bodenabtrags zulässig ist. Die Berechnung von CP_{max}-Szenarien folgt weitgehend der in Kapitel 3 beschriebenen Modellierung der Erosionsgefährdung nach USLE/MUSLE87. Der Unterschied liegt darin, dass anstatt der Eingabe eines C-Faktors ein Toleranzraster verwendet wird. Der Toleranzwert gibt den maximal zulässigen Bodenabtrag in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ an. Als Resultat gibt AVErosion ein Raster aus, welches für jede berechnete Fläche (rasterzellenscharf und schlagbezogen) den maximal zulässigen CP-Wert angibt. So könnten zum Beispiel Empfehlungen zur Feldbewirtschaftung abgegeben werden, für die der nach der Verordnung über Belastung des Bodens (VBBo 1998) zulässige Richtwert nicht überschritten wird (SCHÄUBLE 2005).

Angesichts der noch offenen Möglichkeiten besteht sicher noch Bedarf, sich weiter mit dem Thema der Bodenerosion in der Schweiz zu beschäftigen. Auch sind, wie gesehen, die Möglichkeiten der AVErosion-Extension für ArcView noch nicht ausgeschöpft. Die Möglichkeit des Einsatzes von hoch aufgelösten DHMs war der bestimmende Faktor in dieser Arbeit, und dadurch blieb mir auch keine Zeit, mich mit den eben genannten weiteren Möglichkeiten von AVErosion vertieft auseinanderzusetzen. Ich hoffe sehr, mit dieser Arbeit zukünftige Projekte unterstützen zu können.

Literaturverzeichnis

- AUERSWALD K. (1987); Sensitivität erosionsbestimmender Faktoren; Wasser und Boden 39: 34-38
- AUERSWALD K. (1991); Onsite- und Offsite-Schäden durch Bodenerosion. Aus: Schwertmann, U., Auerswald, K. (Hrsg.); Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit 3. Bodenerosion. Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft 205: 75-82
- AUERSWALD K. (1992); Verfeinerte Bewertung von Erosionsschutzmassnahmen unter deutschen Anbaubedingungen mit dem P-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG); Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung 33; 137-144
- AUERSWALD K. (2002); Schätzung des C-Faktors aus Fruchtartenstatistiken für Ackerflächen in Gebieten mit subkontinentalen bis subatlantischem Klima nördlich der Alpen; Landnutzung und Landentwicklung 43: 269-273
- BODENEIGNUNGSKARTE der Schweiz 1:200'000 (1980); Grundlagen für die Raumplanung; Eidgenössisches Justiz- und Polizeidepartement (EJPD)
- BORK H.R., SCHRÖDER A. (1996); Quantifizierung des Bodenabtrags anhand von Modellen. Handbuch der Bodenkunde, Landsberg/Lech (ecomed): Kap. 6.3.5.
- BUNDESAMT FÜR STATISTIK [Hrsg.] (2000); digitale Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200'000; Servicestelle GEOSTAT
- BUNDESAMT FÜR STATISTIK [Hrsg.] (2005); Landwirtschaftliche Betriebszählung 2005; Servicestelle GEOSTAT
- COST (2006); About COST – European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research; COST Office, Brüssel

- DHM100; Basis SRTM (90%), 10% DHM100 © Bundesamt für Statistik, Service-stelle BFS GEOSTAT
- DHM25 © 2005 Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), Bern
- DTM-AV © 2005 Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), Bern
- DRÄYER D. (1996); GIS-gestützte Bodenerosionsmodellierung im Nordwest-schweizerischen Tafeljura – Erosionsschadenskartierungen und Modellergebnisse; Basler Beiträge zur Physiographie, Band 22
- DIN 19708 (2005): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. – 2005-02; Berlin (Beuth)
- EUROPARAT (1972): Europäische Bodencharta, Brüssel
- FRIEDLI S. (2006); Digitale Bodenerosionsgefährdungskarte der Schweiz im Hektarraster – Unter besonderer Berücksichtigung des Ackerlandes; CDE Uni-versität Bern
- HAUERT C. (2007); Vergleich von Bodeneigenschaften im Direktsaat- und Pflug-system mit Reflexionsspektroskopie und physikalischen Feldmethoden in den Gebieten Frienisberg und Oberaargau; Philosophisch-Naturwissenschaftliche Fa-kultät Universität Bern
- HEBEL B. (2003); Validierung numerischer Erosionsmodelle in Einzelhang- und Einzugsgebiets-Dimension; Beiträge zur Physiographie, Band 32
- HENSEL H., BORK H.-R. (1988); Computer aided Construction of Soil Erosion and Deposition maps; Geologisches Jahrbuch, Reihe A, Jg. 1988, Heft 104: 357-371
- HENSEL H. (1991); Verfahren zur EDV-gestützten Auswertung der Bodenerosi-onsgefährdung von Hängen und Einzugsgebieten; Technische Universität Berlin, Bodenökologie und Boden-genese 2

- HUDSON N. (1995); Soil Conservation, Third Edition; BT Batsford Limited, London
- LEDERMANN T., HERWEG K., LINIGER HPL., SCHNEIDER F., PRASUHN V. (unveröffentlicht); Applying soil erosion damage mapping to assess and quantify off-site effects of soil erosion in Switzerland; Land Degradation and Development, Special Issue
- MOSIMANN T., MAILLARD A., MUSY A., NEYROUD J.-A., RUETTIMANN M., WEISSKOPF P. (1991); Erosionsbekämpfung in Ackerbaugebieten, ein Leitfaden für die Bodenerhaltung; Themenbericht des Nationalen Forschungsprogrammes "Nutzung des Bodens in der Schweiz"; Liebefeld, Bern
- MOSIMANN T. & RUETTIMANN M. (1995); Bodenerosion selber abschätzen; Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater; Volkswirtschafts- und Sanitätsdirektion des Kanton Basel-Land, Liestal
- MOSIMANN T. & RUETTIMANN M. (1996a); Abschätzung der Bodenerosion und Beurteilung der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit; Grundlagen zum Schlüssel für Betriebsleiter und Berater; Amt für Umweltschutz und Energie (AUE), Liestal
- MOSIMANN T. & RUETTIMANN M. (1996b); Erosion, Clé d'appréciation du risque; Sols cultivé de Suisse romande; Service Romand de Vulgarisation Agricole (SRVA); Lau-sanne
- MOSIMANN T. & RUETTIMANN M. (1999); Bodenerosion selber abschätzen; Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater; Ackerbaugebiete des zentralen Mittellandes; Finanzdepartement Aargau, Abteilung Landwirtschaft, Abteilung Umwelt und Landwirtschaft des Kantons Bern. Militär-, Polizei- und Umweltschutzdepartement des Kantons Luzern, Amt für Umweltschutz und Volkswirtschaftsdepartement des Kantons Luzern, Landwirtschaftsamt. Amt für Umweltschutz und Amt für Landwirtschaft des Kantons Solothurn; Aarau, Bern, Luzern, Solothurn

- PETERS, D (2005); System Design Strategies; ESRI Environmental Systems Research Institute Inc.
- PEYER K. u. v. a.; BODENKARTEN (versch. Jahre); Eidgenössische Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau Zürich-Reckenholz, 13 Exemplare
- PRASUHN V. (1991); Bodenerosionsformen und –prozesse auf tonreichen Böden des Basler Tafeljura (Raum Anwill, BL) und ihre Auswirkungen auf den Landschaftshaushalt; Basler Beiträge zur Physiogeographie; Band 16
- PRASUHN V., GRÜNIG K. (2001); Evaluation der Ökomassnahmen – Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Bodenerosion; Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Zürich-Reckenholz (FAL), Schriftenreihe der FAL 37
- PRASUHN V., MOHNI R. (2003); Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Zürich-Reckenholz (FAL); GIS-gestützte Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern; interner Bericht Agroscope FAL Reckenholz
- RENARD K.G., FOSTER G.R., WEESIES G.A., McCOOL D.K., YODER D.C. (1997); Predicting Soil Erosion by Water – A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE); U.S. Dept. Of Agriculture; Agriculture Handbook Number 703
- ROGLER H. & SCHWERTMANN U. (1981); Erosivität der Niederschläge und Isoerodentkarte Bayerns.- Zeitung für Kulturtechnik und Flurbereinigung 22: S. 99-112
- RUETTIMANN M. (2005); Kulturkalender und kulturspezifische Teil-C-Faktoren (Saat bis Ernte) für ausgewählte Hauptfrüchte im zentralen Mittelland (Standardtermine); unveröffentlicht

- SCHAUB D. (1989); Die Bodenerosion im Lössgebiet des Hochrheinlandes (Möhliner Feld/Schweiz) als Faktor des Landschaftshaushaltes und der Landwirtschaft; Basler Beiträge zur Physiogeographie, Band 13
- SCHÄUBLE H. (1999); Erosionsprognosen mit GIS und EDV, ein Vergleich verschiedener Bewertungskonzepte am Beispiel einer Gäulandschaft; Tübingen
- SCHÄUBLE H. (2005): AVErosion 1.0 für ArcView – Berechnung von Bodenerosion und –akkumulation nach den Modellen RUSLE und MUSLE87. – http://www.terracs.de/ArcView_3_x/AVErosion/averosion.html
- SCHÄUBLE H. (2006); Vorbeugender Boden- und Gewässerschutz; arcaktuell 2/2006: 15, ESRI Geoinformatik GmbH, Kranzberg (http://www.esri-germany.de/downloads/arcaktuell/aa_2_2006.pdf)
- SCHEFFER F., SCHACHTSCHABEL P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. F. Enke Verlag, Stuttgart
- SCHUEPP M. (1975); Klimatologie der Schweiz; Niederschlag - Zahl der Tage $\geq 0,3$ mm und ihre Veränderlichkeit, Zahl der Tage mit Schneefall und prozentualer Schneeanteil; Beiheft zu den Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt; Zürich
- SCHWERTMANN U., VOGL W., KAINZ M (1987); Bodenerosion durch Wasser - Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen, Ulmer, Stuttgart, 2end ed.
- SCHWERTMANN U., VOGL W., KAINZ M. (1990); Bodenerosion durch Wasser, Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmassnahmen; Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart
- SONNEVELD B.G.J.S., NEARING M.A. (2003); A nonparametric/parametric analysis of the Universal Soil Loss Equation; Catena 52: 9-21
- SR 814.12: Verordnung über Belastung des Bodens (VBBo) vom 1.7.1998, Art. 6, Anhang 3

- SwissMap 25 © 2000 Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), Bern
- SwissMap 50 © 2003 Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), Bern
- TLL (2004); Entwurf zur DIN 19708: 2003-05 (Abschnitt zur Ermittlung des P-Faktors)
- TOY T., FOSTER G., RENARD K. (2002); Soil Erosion, Processes, Prediction, Measurement and Control; J. Wiley & Sons, New York
- WISCHMEIER W.H., SMITH D. D. (1978); Predicting Rainfall Erosions Losses – A Guide to Conservation Planning; U.S. Dep. Of Agriculture Handbook no. 537; Washington

Internet (Stand Februar 2008)

- *Bodenerosion mit GIS und EDV - Ein Vergleich verschiedener Bewertungskonzepte am Beispiel einer Gäulandschaft*
(http://www.terracs.de/GIS_Projekte/Diplomarbeit/diplomarbeit.html)
- BFS GEOSTAT
(<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/dienstleistungen/geostat.html>)
- Arealstatistik 1992/97
(http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/infothek/erhebungen__quellen/blank/blank/arealstatistik/02/02_01.html)
- Amt für Geoinformation Bern (<http://www.bve.be.ch/site/agi/>)
- Kantonales Amt für Vermessung und Geoinformatik Fribourg
(<http://appl.fr.ch/sccg/de/mensuration/default.htm>)
- Prognose von Bodenerosion
(<http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/mzb04/>)

- VERSTOLA-Projekt (<http://www.tll.de/verstola/content/home.html>)
- Erosionsgefährdung in Thüringen Ermittlung und Anwendungsmöglichkeit (http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/boden_geologie/downloads/10_Bischoff.pdf)
- Europäische Bodencharta (1972)
(<http://hypersoil.uni-muenster.de/0/02/03/03/01.htm>)
- Physikalische Ursachen und Formen der Erosion durch Wasser und Wind
(http://www2.tu-berlin.de/fb7/ile/fg_wasserkult/Fachgebiet/PJ/Spainien/22/kap222a.htm)
- COST 634 „On- and Off-Site Environmental Impacts of Runoff and Erosion“
(<http://www.soilerosion.net/cost634/>)
- COST in der Schweiz
(http://www.sbf.admin.ch/htm/dokumentation/publikationen/international/cost/cd2006/html/d_dokumente.htm)
- <http://w210.ub.uni-tuebingen.de/dbt/volltexte/2005/1904/>
- http://www.art.admin.ch/themen/00544/00813/index.html?lang=de#sprungmarke0_115
- http://www.geo.unizh.ch/gia/teaching/courses/gis2/ws0405/programm/fohlen/Folien_U6+7.pdf

Anhang

Digitale Karten

100m-Raster:

- Bodenerosionsgefährdung USLE/MUSLE87 Oberaargau
- Bodenerosionsgefährdung USLE Frienisberg

25m-Raster:

- Bodenerosionsgefährdung USLE/MUSLE87 Oberaargau
- Bodenerosionsgefährdung USLE/MUSLE87 Oberaargau schlagbezogen

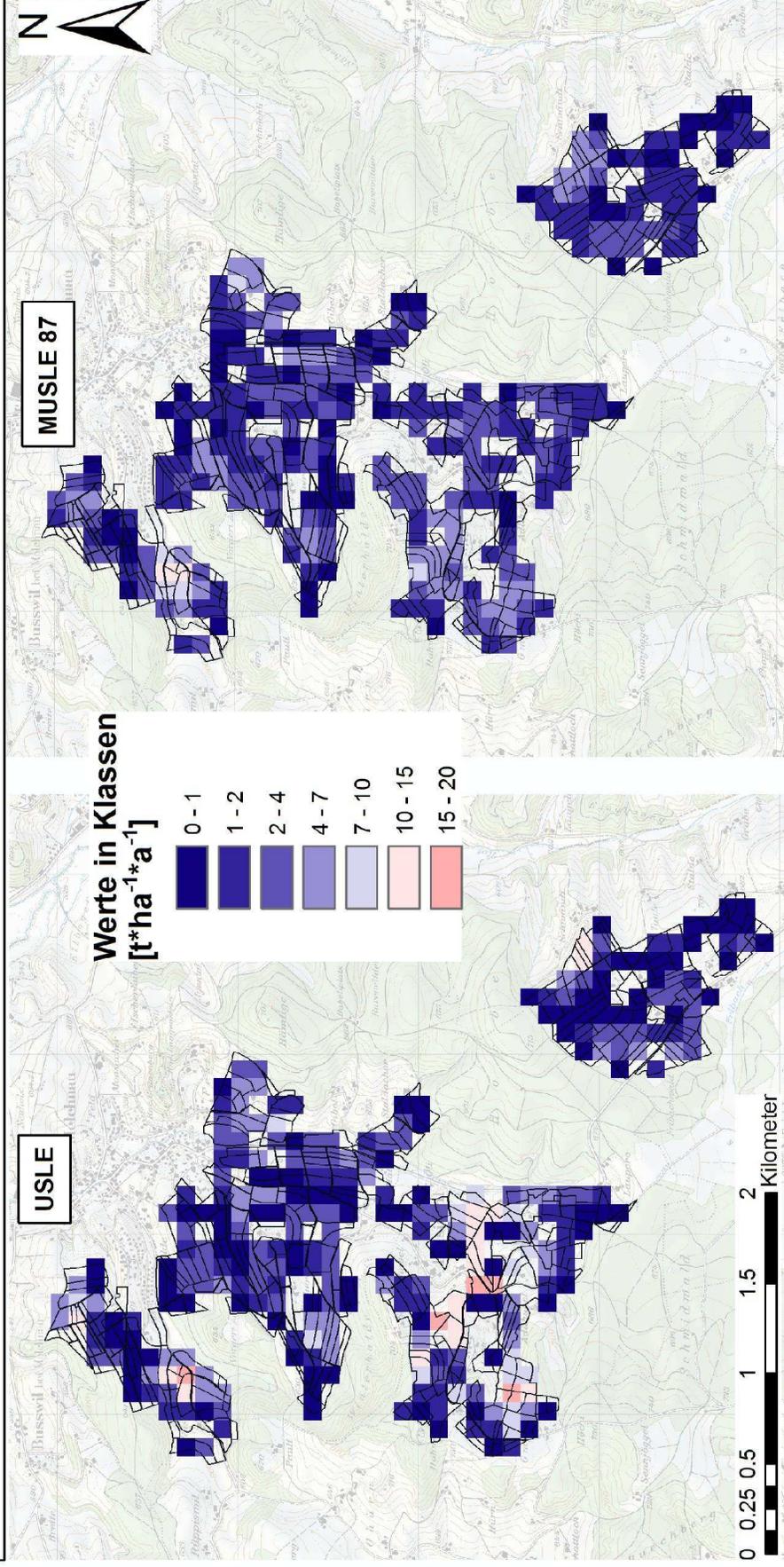
- Bodenerosionsgefährdung MUSLE87 Frienisberg
- Bodenerosionsgefährdung MUSLE87 Frienisberg schlagbezogen

2m-Raster:

- Bodenerosionsgefährdung USLE/MUSLE87 Oberaargau
- Bodenerosionsgefährdung USLE/MUSLE87 Oberaargau schlagbezogen

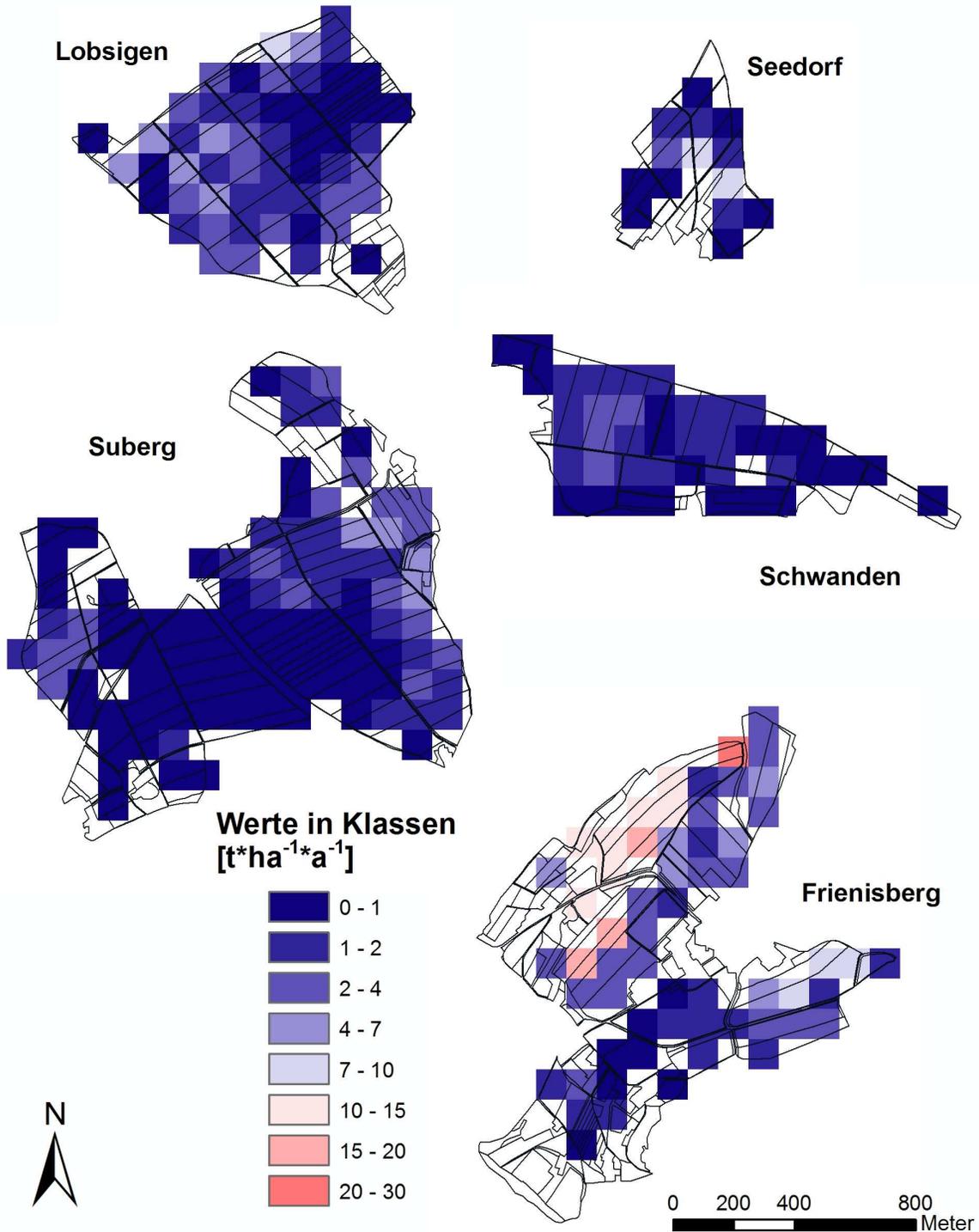
- Bodenerosionsgefährdung MUSLE87 Frienisberg
- Bodenerosionsgefährdung MUSLE87 Frienisberg schlagbezogen

**Oberaargau - AVErosion Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$
auf Grundlage von DHM100**



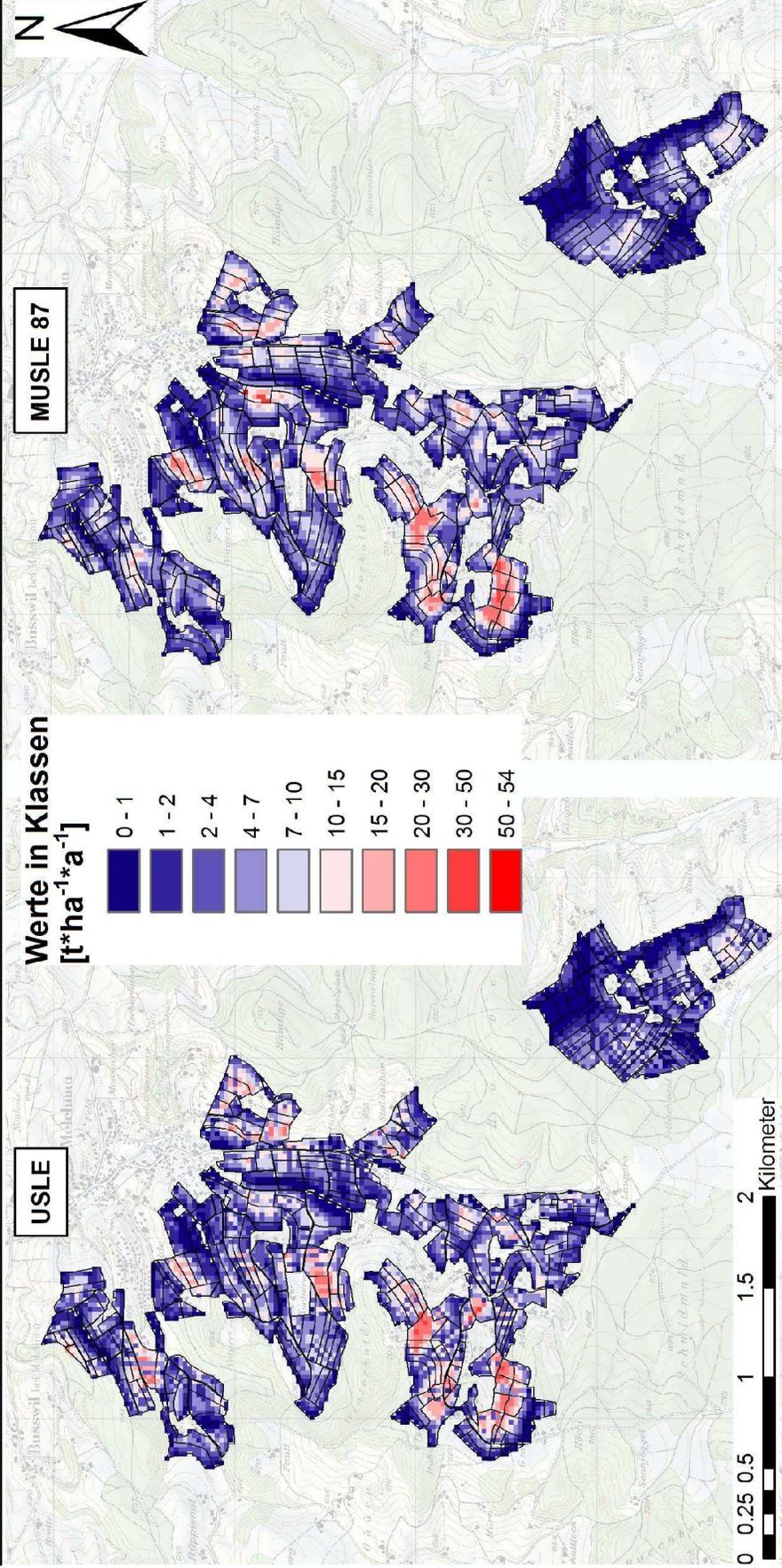
Grundlagen: SwissMap 25 (swisstopo), Parzellennetz Oberaargau (AV Bern), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K-Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung AVErosion auf Grundlage von DHM100 (BFS)]
Berechnung: AVErosion mit Modellen USLE/MUSLE87
Layout: Michael Chisholm

Frienisberg - USLE Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ auf Grundlage von DHM100



Grundlagen: Parzellengrenzen (PRASUHN 2001), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K-Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung auf Grundlage von DHM100 (BFS)]
Berechnung: AVErosion mit Modell MUSLE87
Layout: Michael Chisholm

Oberraargau - AVErosion Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ auf Grundlage von DHM25

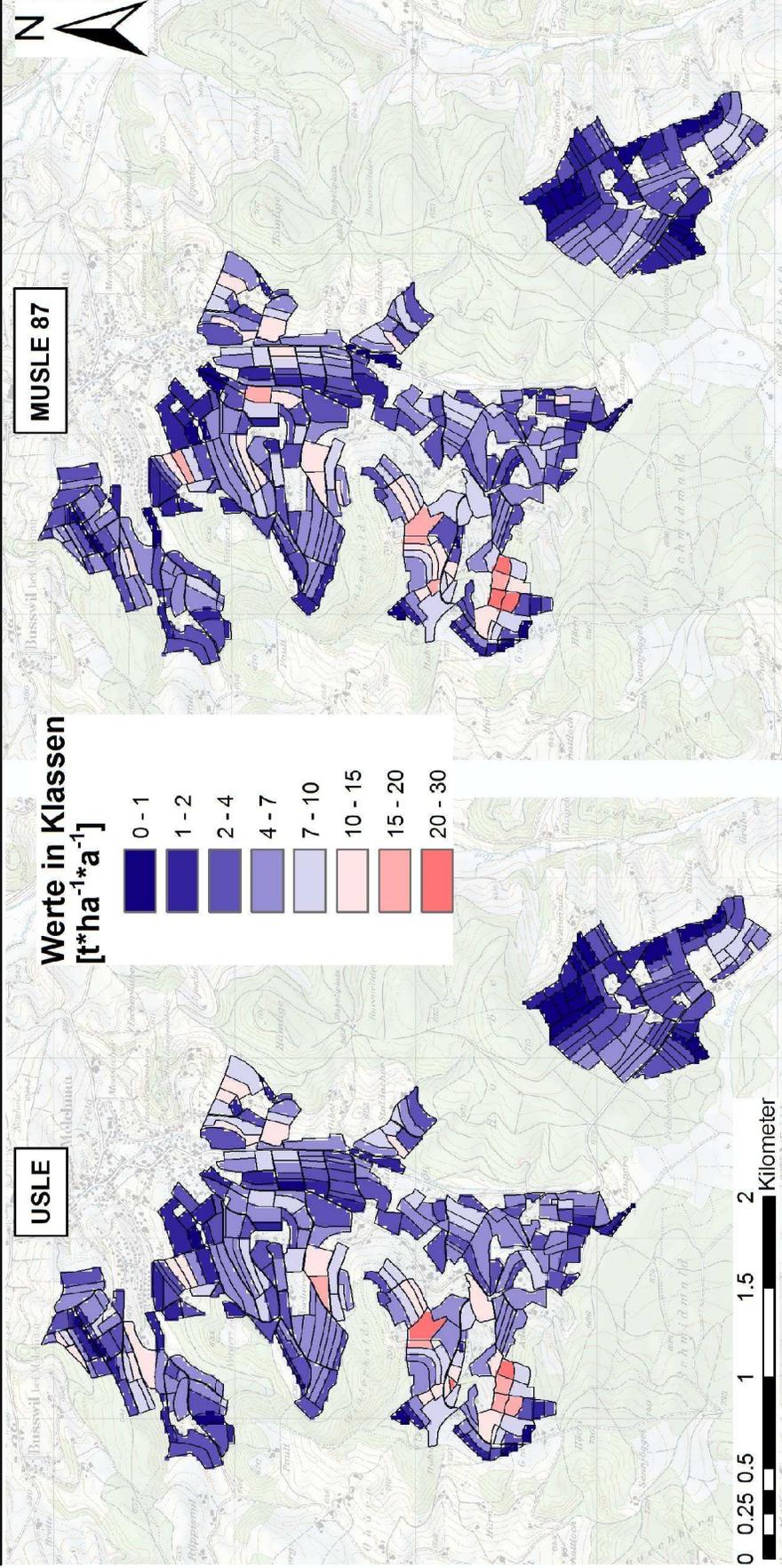


Grundlagen: SwissMap 25 (swisstopo), Parzellennetz Oberraargau (AV Bern), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K-Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung AVErosion auf Grundlage von DHM25 (swisstopo)]

Berechnung: AVErosion mit Modellen USLE/MUSLE87

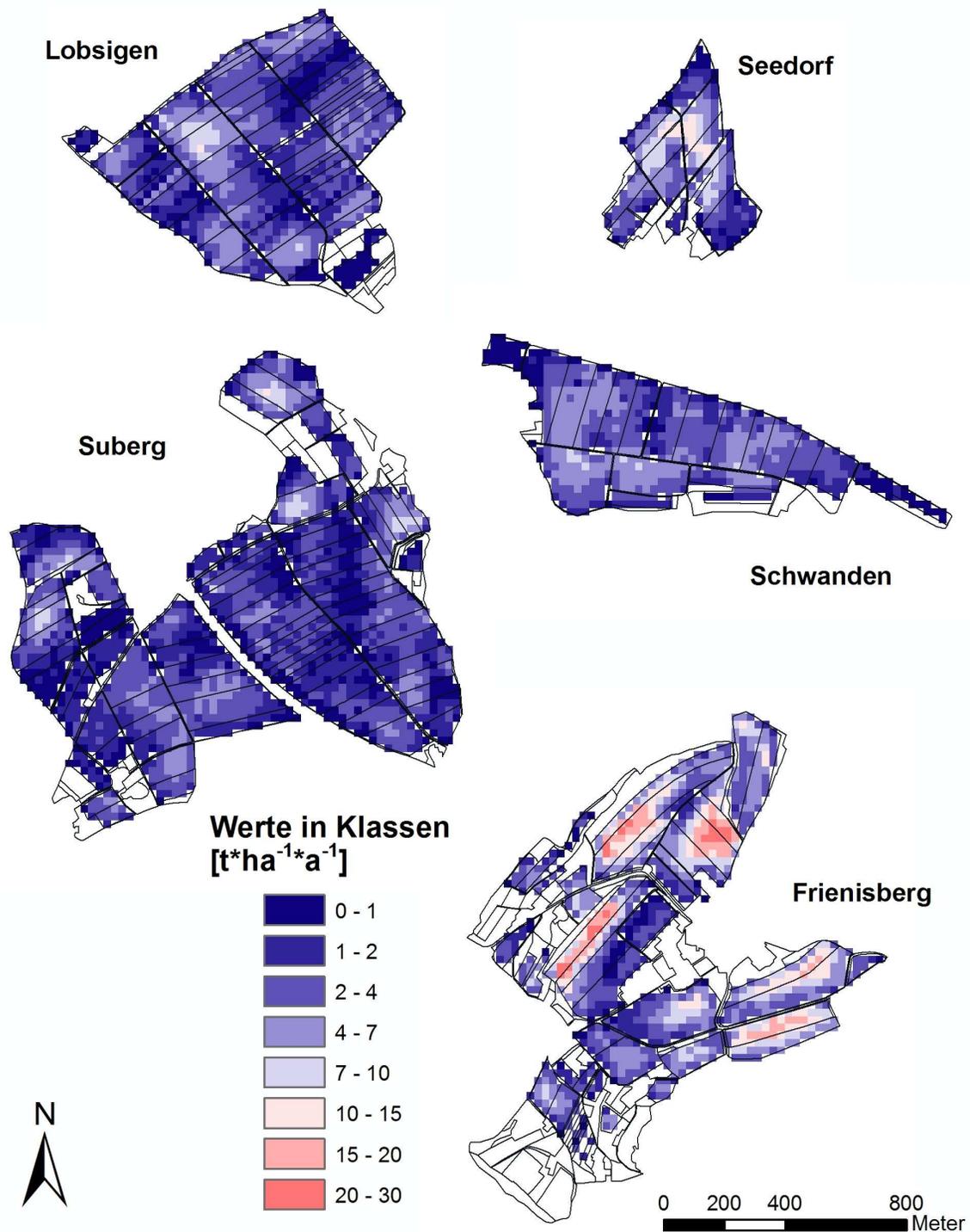
Layout: Michael Chisholm

Oberaargau - AVErosion Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ auf Grundlage von DHM25 schlagbezogen



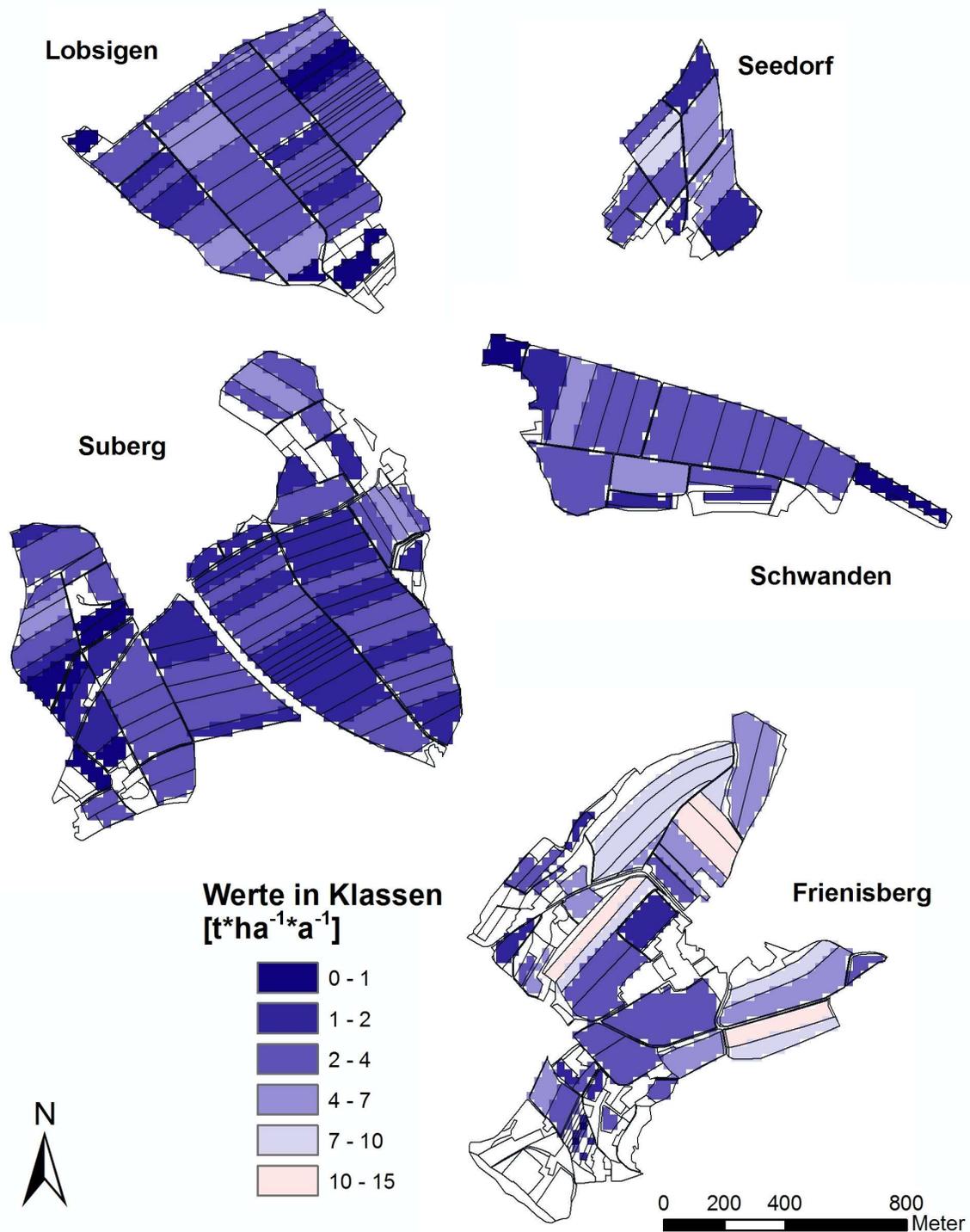
Grundlagen: SwissMap 25 (swisstopo), Parzellennetz Oberaargau (AV Bern), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K-Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung AVErosion auf Grundlage von DHM25 (swisstopo)]
Berechnung: AVErosion mit Modellen USLE/MUSLE87
Layout: Michael Chisholm

Frienisberg - MUSLE87 Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ auf Grundlage von DHM25



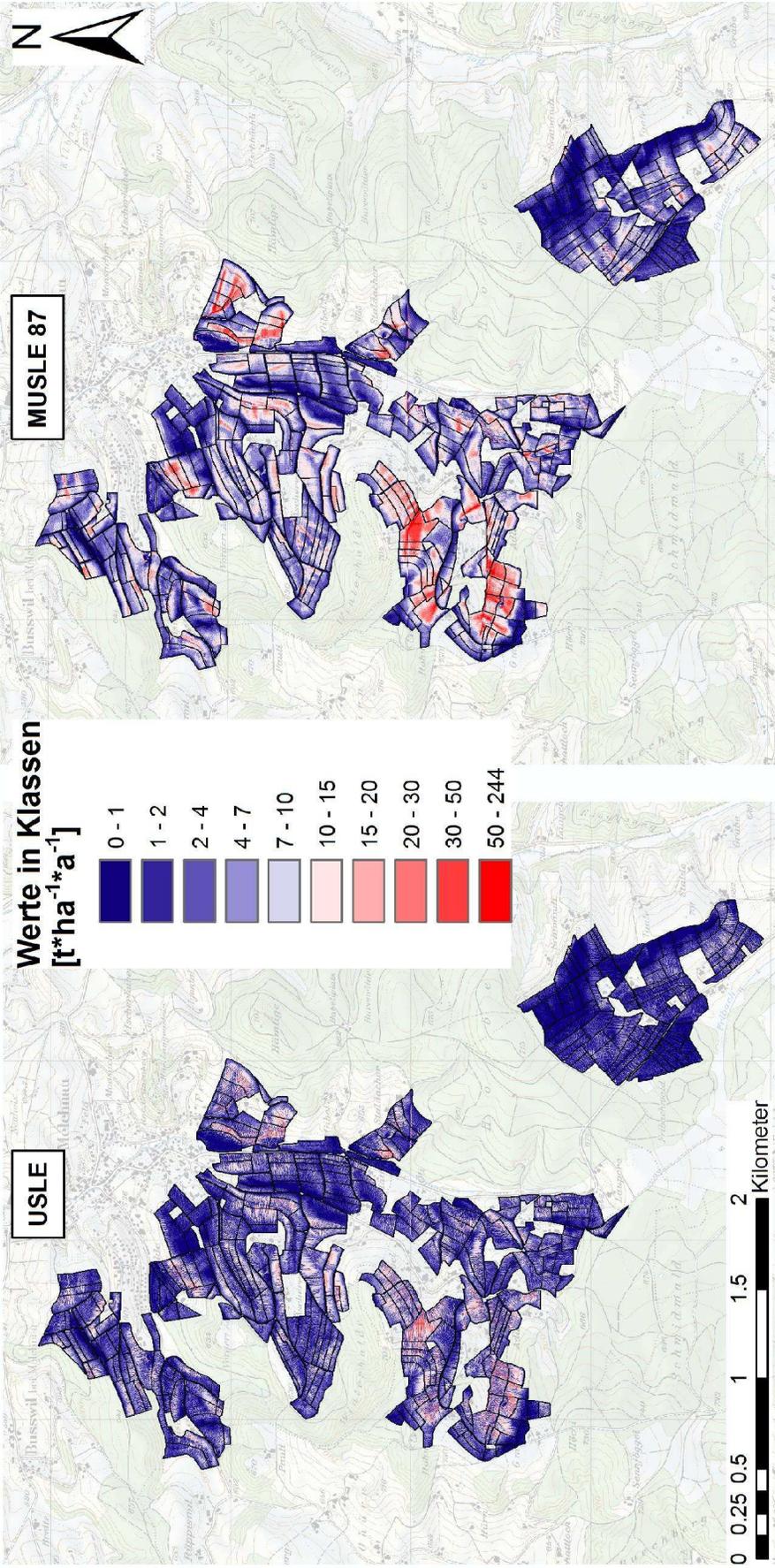
Grundlagen: Parzellengrenzen (PRASUHN 2001), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K-Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung auf Grundlage von DHM25 (swisstopo)]
Berechnung: AVErosion mit Modell MUSLE87
Layout: Michael Chisholm

Frienisberg - MUSLE87 Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ auf Grundlage von DHM25 - schlagbezogen



Grundlagen: Parzellengrenzen (PRASUHN 2001), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K-Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung auf Grundlage von DHM25 (swisstopo)]
Berechnung: AVErosion mit Modell MUSLE87
Layout: Michael Chisholm

Oberaargau - AVErosion Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ auf Grundlage von DTM-AV

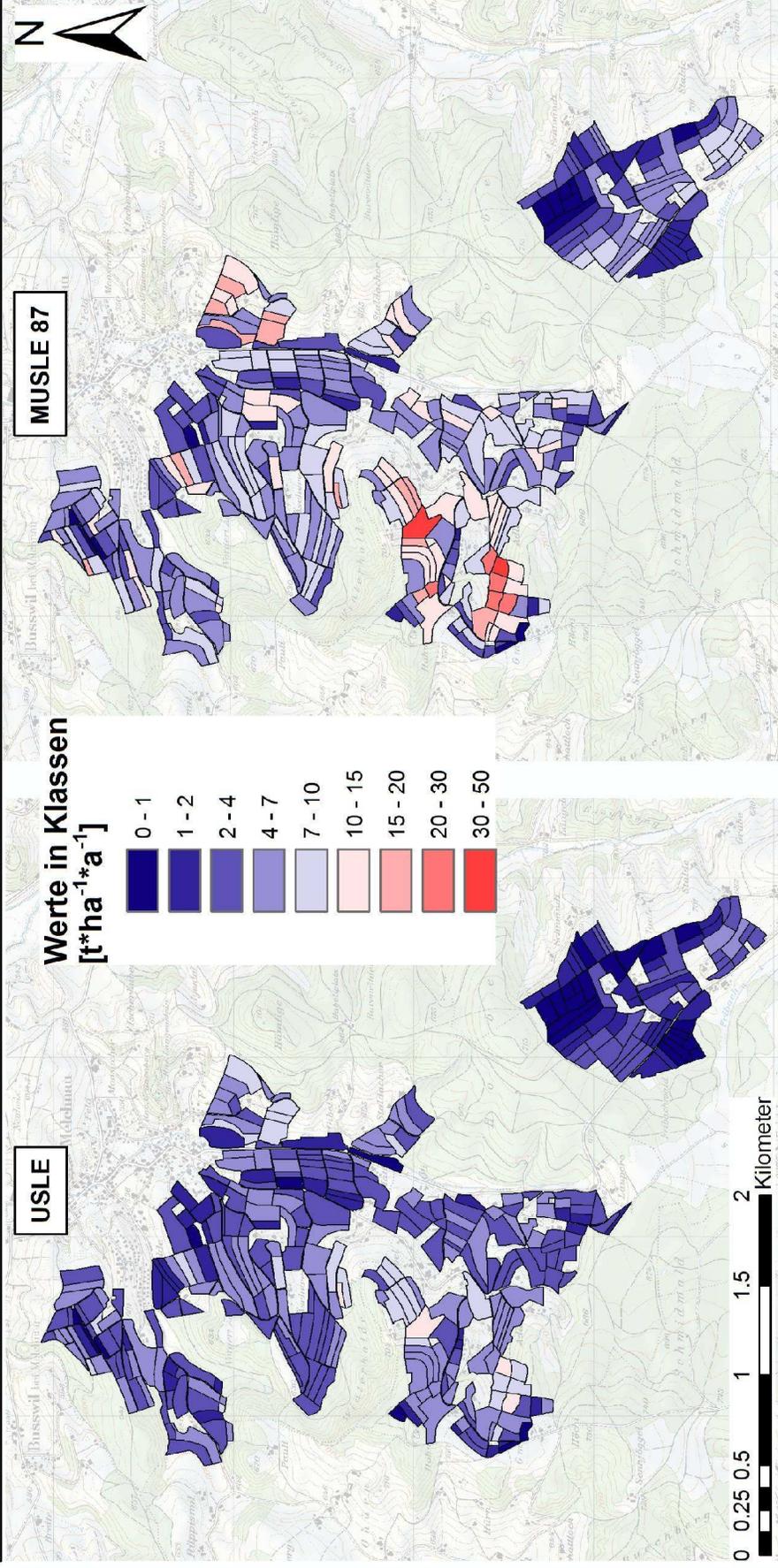


Grundlagen: SwissMap 25 (swisstopo), Parzellennetz Oberaargau (AV Bern), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K-Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung AVErosion auf Grundlage von DTM-AV (swisstopo)]

Berechnung: AVErosion mit Modellen USLE/MUSLE87

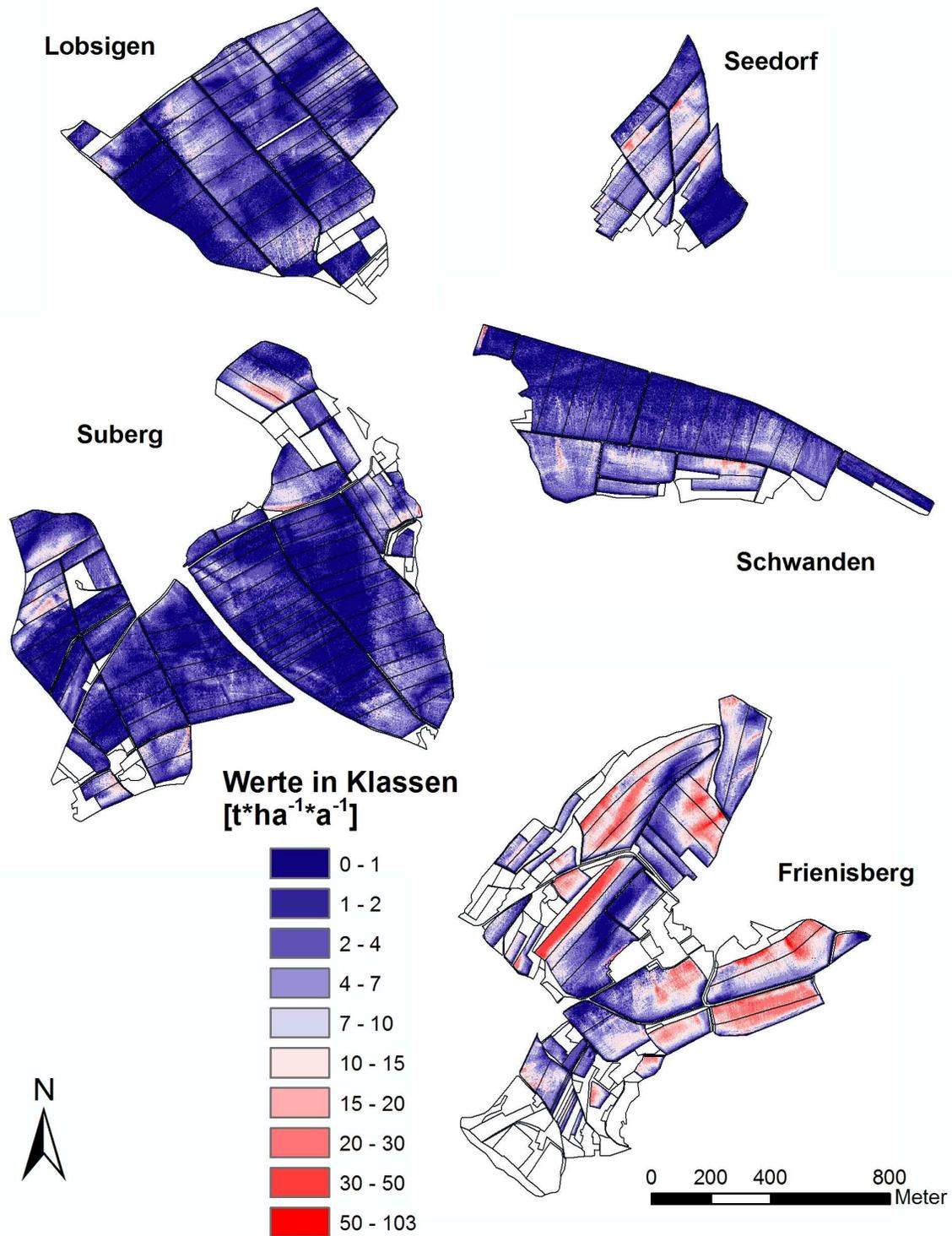
Layout: Michael Chisholm

**Oberaargau - AVErosion Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ auf Grundlage von DTM-AV
schlagbezogen**



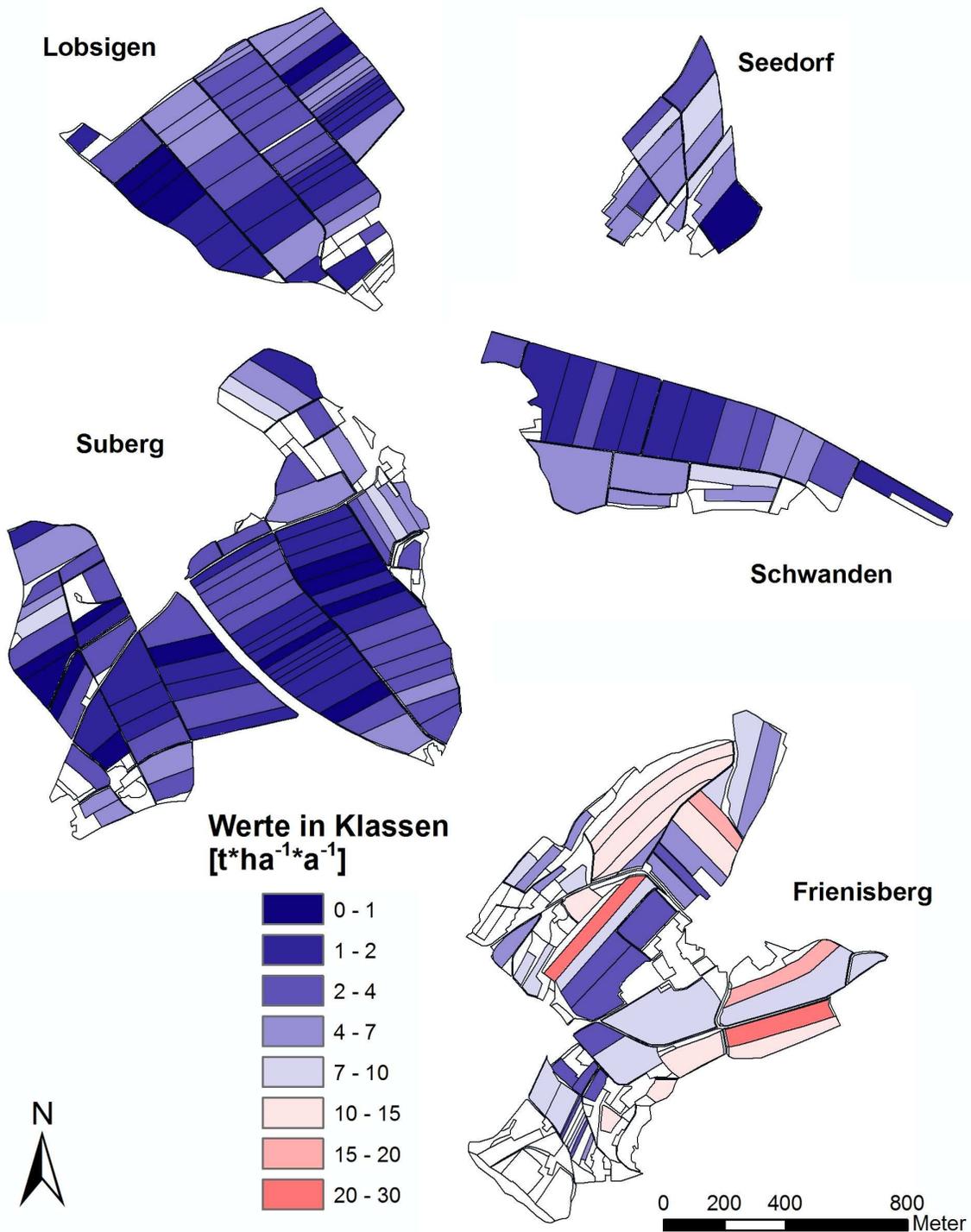
Grundlagen: SwissMap 25 (swisstopo), Parzellennetz Oberaargau (AV Bern), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K-Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung AVErosion auf Grundlage von DTM-AV (swisstopo)]
Berechnung: AVErosion mit Modellen USLE/MUSLE87
Layout: Michael Chisholm

Frienisberg - MUSLE87 Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ auf Grundlage von DTM-AV



Grundlagen: Parzellengrenzen (PRASUHN 2001), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K-Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung auf Grundlage von DTM-AV (swisstopo)]
Berechnung: AVErosion mit Modell MUSLE87
Layout: Michael Chisholm

Frienisberg - MUSLE87 Bodenerosionsgefährdung in $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ auf Grundlage von DTM-AV - schlagbezogen



Grundlagen: Parzellengrenzen (PRASUHN 2001), R-Faktor (FRIEDLI 2006), K-Faktor (FRIEDLI 2006), C-Faktor (FRIEDLI 2006), LS-Faktor [Berechnung auf Grundlage von DTM-AV (swisstopo)]
Berechnung: AVErosion mit Modell MUSLE87
Layout: Michael Chisholm