Erosionsabschätzung und Massnahmenplanung mit der ArcView Extension AVErosion im Gebiet Frienisberg

---

Auswirkungen von parzellenscharfen Faktordaten

Masterarbeit

der Philosophisch-naturwisschenschaftlichen Fakultät

der Universität Bern

vorgelegt von

Simon Gisler

2009

Leiter der Arbeit
Prof. Dr. Hans Hurni
Dr. Hanspeter Liniger

Betreuung: Dr. Hanspeter Liniger (Geographisches Institut, Centre for Development and Environment (CDE))

Dr. Volker Prasuhn (Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART)

Thomas Ledermann (Geographisches Institut, Centre for Development and Environment (CDE))

Prof. Dr. Hans Hurni (Geographisches Institut, Centre for Development and Environment (CDE))

ABSTRACT

This Thesis deals with estimations of soil erosion on agricultural crop land in the area of Frienisberg, Switzerland. The estimations were made with the GIS-Tool AVErosion for ArcView 3.x. This software was developed by SCHÄUBLE (1999, 2005) for the agricultural administration of Thüringen, Germany. This thesis is a follow-up project of the study from CHISHOLM (2008).

AVErosion is based upon the Universl Soil Loss Equation (USLE) from WISCHMEIER & SMITH (1978). Alternative there is the model of the MUSLE87 by BORK & HENSEL (1988), which is a modification of the USLE. The estimations of soil erosion in this thesis were built with the MUSLE87. Both models require the same input data. The models multiply six factors to calculate a long-time average soil erosion risk in tones per hectare and year (t/(ha*a). The six factors are precipitation (R), soil type (K), crop system and management (C), topography (L and S) and a support practice factor (P). For the AVErosion-Extension the R-, K- and C-Factor is needed as grid data, additional a grid layer with the agricultural plots is needed and a digital elevation model (DEM). The DEM is used for calculation of the L-, S- and P-Factor and its resolution is responsible for the resolution of the whole result. Two DEMs were used in this study, a 25x25 m DHM25 (swisstopo 2005) and a 2x2 m DTM-AV (swisstopo 2005).

For the input data required, there were several datasets available. The R-, C- and K-factor were available from FRIEDLI (2006), which made estimations for these factors in a 100x100m resolution. Additional there was more detailed data for the C- and K-Factor from PRASUHN (2008), in this study. For these two factors there were individual values for each of the 204 plots in Frienisberg available. This was the most crucial difference to the thesis of CHISHOLM (2008). He could only use the data from FRIEDLI (2006), which was less detailed then the data used in this thesis.

The first goal was to compare the results of CHISHOLM (2008) with those optimized results with more detailed datasets. This should give a clue, which input data is most important and sensitive and where more detailed data is meaningful. Additional the influence of the different factors for soil erosion was analyzed and reported.
The results showed that the K-factor is not that important for the results of soil erosion estimations. The less detailed data from FRIEDLI (2006) was pretty meaningful and lead to almost the same results as the more accurate data of this thesis. The K-factors variation is not that big, in Frienisberg the values were between 0.17 and 0.42. That is the reason why the influence of the K-factor on the soil erosion risk is not that big. The variation of the C-factor was much bigger. The values for C varied between 0.01 and 0.25, which is a factor 25 from lowest to highest value. The C-factors can change from plot to plot, because the only one who

is responsible for it is the farmer. He decides which crop he will plant and which machines and techniques he uses on his plots. Like that he defines the value of the C-factor. With the big spectrum of this factor the influence on soil erosion rises.
Correlations between different factors, combination of factors and the resulting erosion risk showed, that the S- & L-factor together with the C-factor are most important for the erosion risk. Correlation coefficient between the multiplication of these three factors and the resulting erosion was 0.985. This underlines also the importance of the C-factor compared to the K-factor.

In the second part of the thesis AVErosion was used to model intervention scenarios for conservation planning on some plots. The tool offers an application called CPmax-Scenario, to support this planning. CPmax-Scenario calculates a maximum allowable value for the C-factor, for a given threshold value. After some trials, one has to find out, that the output of these calculation where not useful for the application we were looking for. So another solution has to be found. Based on the original estimated soil erosion and the C-factor, a calculation method was created, which combined the soil erosion and the used C-factor with the given threshold, to find a new C-factor. These method lead to good results and was used for further interventions. A further aim was to eliminate some critical areas, that still had higher erosion risk. This was achieved by modification of the crop system and management and for some of the plots, some additional "linear elements" were introduced. These elements could have been hedges, fruit trees, or grassed waterways for example. At the end some maps with estimations of the soil erosion with the planned interventions were realized.

A first evaluation of the results of the soil erosion estimation compared to mapped erosion over 10 years showed, that the results with AVErosion are too high. This was also pointed out by CHISHOLM (2008). The positive remark is, that areas with high erosion potential were also those where high erosion damage was recorded through field monitoring. So the estimations are more of a relative then a absolute character, but the way to do such estimations with AVErosion is pretty easy and does not need many input data. Finally one can say, AVErosion is a good tool to give an overview of the distribution of soil erosion risk. Further more, the outstanding importance of the C-factor should be emphasized, which has a crucial influence on the soil erosion and on the other hand has a high potential when it comes to intervention planning.

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Erosionsabschätzungen auf Ackerfeldern im Gebiet Frienisberg (BE). Die Abschätzungen erfolgten mit dem Programm AVErosion, welches eine Extension für das geographische Informationssystem (GIS) ArcView 3.x ist. Die Software wurde für die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) durch SCHÄUBLE (1999, 2005) entwickelt. Diese Arbeit ist eine Weiterführung und Ergänzung der Arbeit von CHISHOLM (2008), welcher sich ebenfalls mit Erosionsabschätzungen mittels der AVErosion-Extension befasste.

AVErosion basiert auf dem Modell der Universal Soil Loss Equation (USLE) von WISCHMEIER & SMITH (1978). Alternativ kann auch ein modifiziertes Modell gewählt werden, die MUSLE87, welche von HENSEL & BORK (1988) auf der Grundlage der USLE leicht abgeändert wurde. Die Resultate dieser Arbeit beruhen auf dem Modell der MUSLE87, da bei den Analysen durch CHISHOLM (2008) dieses Modell bessere Resultate, vor allem im hoch aufgelösten Bereich, lieferte. Beide Modelle verlangen die gleichen Eingangsdaten für eine Berechnung eines langjährigen mittleren jährlichen Bodenabtrags. Benötigt werden ein Niederschlagsraster (R-Faktor), ein Rasterdatensatz mit Angaben zur Anfälligkeit des Bodens für Erosion (K-Faktor), Daten über die Bodenbedeckung und –bearbeitung (C-Faktor), ein Parzellenplan, welcher die Berechnung von schlagbezogenen Werten erlaubt, sowie ein digitales Höhenmodell (DHM). Aus dem DHM werden die Relieffaktoren (S- und L-Faktor) und auch der P-Faktor, welcher getroffene Erosionsschutzmassnahmen repräsentiert, berechnet. Die Auflösung des DHMs bestimmt zusätzlich die Auflösung der Resultate. Für diese Arbeit stand ein auf 25x25 Meter aufgelöstes DHM (swisstopo 2005) sowie ein auf 2x2 Meter aufgelöstes und sehr detailliertes digitales Höhenmodell, das DTM-AV (swisstopo 2005) zur Verfügung.

Neben den im Hektarraster verfügbaren Daten für den R-, C- und K-Faktor von FRIEDLI (2006), standen zusätzlich noch parzellenscharfe Daten für den C- und K-Faktor aus Feldkartierungen von PRASUHN (2008) zur Verfügung. Für diese zwei Faktoren waren für alle 204 Parzellen von Frienisberg individuelle Werte vorhanden. Dies ist der grosse Unterschied zur Arbeit von CHISHOLM (2008), welcher nur die Hektarrasterdatensätze von FRIEDLI (2006) verwendete. So ging es im ersten Teil der Arbeit darum, die Resultate dieser Arbeit mit jenen von CHISHOLM (2008) zu vergleichen. Daraus sollte einerseits die Verwendbarkeit der abgeschätzten Daten von FRIEDLI (2006) getestet werden und andererseits auch herausgefunden werden, welchen Einfluss solche parzellenscharfen Faktordaten auf die Erosionsabschätzung haben und welche Faktoren bei der Bodenabtragsabschätzung entscheidend sind.
Beim Vergleich der Resultate stellte sich heraus, dass der K-Faktor durch FRIEDLI (2006) sehr gut abgeschätzt und hergeleitet wurde. Der K-Faktor hat ein kleines Wertespektrum, variiert er im Gebiet Frienisberg doch nur von 0.17-0.42. Somit ist auch sein Einfluss auf die Höhe der Erosionsabschätzung gering. Der C-Faktor hingegen, welcher im untersuchten Gebiet von 0.01 – 0.25 variiert, bietet mit einem Faktor 25 zwischen tiefstem und höchstem

Wert einen wesentlich grösseren Spielraum. Dies wirkt sich entsprechend auf die Höhe des Bodenabtrags aus. Da der C-Faktor von Parzelle zu Parzelle sehr starke Unterschiede haben kann, da er nur vom Landwirten und dessen Praktiken abhängig ist, wird eine Abschätzung dieses Faktors sehr problematisch, wenn man einzelne Parzellen anschauen möchte. Beim Einfluss der verschiedenen Faktoren auf die Erosion hat sich gezeigt, dass der Relieffaktor (S- und L-Faktor) zusammen mit dem C-Faktor die bestimmenden Faktoren sind. Diese drei Faktoren zusammen wiesen einen Korrelationskoeffizienten von 0.985 auf, verglichen mit den resultierenden Bodenabträgen. Somit ist auch die Dominanz des C-Faktors gegenüber dem ebenfalls parzellenscharf eingesetzten K-Faktor klar ersichtlich.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde der Einsatz von AVErosion für die Massnahmenplanung getestet. In der AVErosion-Extension steht ein CPmax-Szenario zur Verfügung, welches maximale Nutzungsintensitäten bei vorgegebenem tolerierbarem Bodenabtrag berechnet. Dieses Szenario sollte als Grundlage für eine Massnahmenplanung verwendet werden. Es stellte sich aber heraus, dass dies für die hier gebrauchten Zwecke nicht funktioniert und das Programm die CPmax-Werte für ganze Parzellen durch eine Mittelung grossen Teils unbrauchbar machte. Es wurde dann mittels einer Dreisatzrechnung ein geeigneter Weg gefunden, diese Lücke zu füllen. Ursprünglicher Bodenabtrag und C-Wert wurden mit dem tolerierbaren Bodenabtrag so in Verbindung gebracht, dass daraus neue C-Werte ermittelt werden konnten, welche die Bedingungen der Toleranzschwelle erfüllten. Ausgehend von den neu berechneten Bodenabträgen wurde im letzten Teil für ausgewählte Parzellen noch eine gezielte Massnahmenplanung erarbeitet.
Hier ging es darum, die übrig gebliebenen, kleinräumigen, stark von Erosion betroffenen Gebiete innerhalb der Parzellen durch geeignete Eingriffe einzudämmen. Dabei kamen Änderungen bei der Bewirtschaftung der Parzelle zum tragen, aber auch lineare Elemente, welche in AVErosion im Parzellenraster eingefügt wurden. Abschliessend wurden für ausgewählte Parzellen Bodenabtragsabschätzungen mit den modellierten Massnahmen berechnet.
Bei einer Evaluierung der modellierten Bodenabträge mit kartierten Erosionsabschätzungen aus dem Gebiet Frienisberg stellte sich heraus, dass die mit AVErosion berechnete Erosion tendenziell zu hoch ist. Die betroffenen Gebiete werden aber sehr gut abgebildet und durch die parzellenscharfen C-Faktoren können Unterschiede von einzelnen Parzellen gut wiedergegeben werden. Das führt zum Schluss, dass AVErosion ein gutes Werkzeug ist, um schnell und mit geringem Aufwand Bodenabträge abzuschätzen, dass die absoluten Zahlen aber mit Vorsicht betrachtet werden müssen. Weiter wurde die grosse Bedeutung des C-Faktors für die Erosion aufgezeigt und das Potenzial dieses Faktors, bei der Massnahmenplanung.

INHALTSVERZEICHNIS

ABSTRACT ..... **I**

ZUSAMMENFASSUNG ..... **III**

INHALTSVERZEICHNIS ..... **V**

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS ..... **VII**

VORWORT ..... **VIII**

1. EINLEITUNG **1**
1.1 PROBLEMSTELLUNG 2
1.2 MOTIVATION 3
1.3 RELEVANZ DER ARBEIT 4
1.4 ZIELSETZUNGEN 5
1.4.1 Auswirkungen von parzellenscharfen Faktordaten *5*
1.4.2 Massnahmenplanung mit der Extension AVErosion *6*
1.5 AUFBAU 8

2. GRUNDLAGEN UND METHODIK **9**
2.1 BODENEROSION – DEFINITIONEN UND GRUNDBEGRIFFE 9
2.1.1 Anthropogene Einflüsse *9*
2.1.2 Erosion durch Wasser und Wind *9*
2.1.3 Prozesse des Bodenabtrags *10*
2.1.4 Erosionsformen *10*
2.2 MODELLIERUNG DER BODENEROSION 12
2.3 EROSIONSABSCHÄTZUNGSMODELLE – USLE UND MUSLE 87 13
2.3.1 USLE – Universal Soil Loss Equation (WISCHMEIER & SMITH 1978) *13*
2.3.2 MUSLE87 – Modified Universal Soil Loss Equation 1987 (HENSEL & BORK 1988) *15*
2.4 DATENSTRUKTUR 17

3. MODELLIERUNG MIT AVEROSION 1.0 ..... **19**
3.1 BERECHNUNG DER BRUTTOEROSION 19
3.1.1 Vorarbeiten *21*
3.1.2 Resultate *22*
3.2 CPMAX-SZENARIEN 22
3.2.1 Ausgangsdaten *22*
3.2.2 Resultate *23*
3.3 FAKTORDATEN 23
3.3.1 Der R-Faktor – Erosive Kraft des Niederschlages [$N*h^{-1}$] *23*
3.3.2 K-Faktor – Bodenerodierbarkeitsfaktor [$kg*h*N^{-1}*m^{-2}$] *25*
3.3.3 C-Faktor– Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor [dimensionslos] *29*
3.3.4 Der L-Faktor – Einzugsgebietsgrösse [dimensionslos] *34*
3.3.5 Der S-Faktor – Hangneigungsfaktor [dimensionslos] *35*
3.3.6 Der P-Faktor – Schutzmassnahmen [dimensionslos] *36*

4. GEBIETSBESCHREIBUNG – FRIENISBERG **39**

5. RESULTATE UND INTERPRETATION DES VERGLEICHS MIT CHISHOLM 2008 ..... **43**
5.1 AUSWIRKUNGEN VON PARZELLENSCHARFEN FAKTORDATEN – ERLÄUTERUNGEN ZUM VORGEHEN 43
5.2 VARIANTE 1 – VERWENDUNG VON PARZELLENSCHARFEN C-FAKTOREN 45
5.2.1 Resultate und Interpretation *45*
5.2.2 Fazit der Variante 1 ..... *52*
5.3 VARIANTE 2 – VERWENDUNG VON PARZELLENSCHARFEN K-FAKTOREN 53
5.3.1 Resultate und Interpretation *53*
5.3.2 Fazit der Variante 2 ..... *57*

5.4 VARIANTE 3 – VERWENDUNG VON PARZELLENSCHARFEN C- UND K-FAKTOREN 58
5.4.1 Resultate und Interpretation *58*
5.4.2 Fazit der Variante 3 ..... *65*
5.5 FAZIT ALLER VARIANTEN 66
5.5.1 Auswirkungen der parzellenscharfen Faktordaten *66*
5.5.2 Die Bedeutung der einzelnen Faktoren auf den Bodenabtrag *67*
5.6 EVALUATION DER BERECHNETEN BODENABTRAGSABSCHÄTZUNGEN 68

6. MASSNAHMENPLANUNG MIT DER EXTENSION AVEROSION 73
6.1 CPMAX-SZENARIEN 73
6.1.1 Funktionsweise und Datengrundlage der CPmax-Szenarien *73*
6.1.2 Toleranzwert *74*
6.1.3 Basis für Massnahmenplanung *74*
6.1.4 Die Szenarien *76*
6.2 SZENARIO 1 78
6.2.1 Grundlagen für Szenario 1 ..... *78*
6.2.2 Resultate und Interpretation - Szenario 1 ..... *79*
6.3 SZENARIO 2 81
6.3.1 Grundlagen für Szenario 2 ..... *81*
6.3.2 Resultate und Interpretation – Szenario 2 ..... *81*
6.4 SZENARIO 3 84
6.4.1 Grundlagen für Szenario 3 ..... *84*
6.4.2 Resultate und Interpretation - Szenario 3 ..... *84*
6.5 SZENARIO 4 85
6.5.1 Grundlagen für Szenario 4 ..... *85*
6.5.2 Resultate und Interpretation – Szenario 4 ..... *86*
6.6 MASSNAHMENPLANUNG FÜR EINZELNE PARZELLEN 88
6.7 MASSNAHMEN 90
6.7.1 Projekt 743 ..... *90*
6.7.2 Projekt 679 ..... *93*
6.7.3 Projekt 235 ..... *96*
6.8 ON- UND OFF-SITE-SCHÄDEN 99
6.9 PROBLEME BEI DER MODELLIERUNG DER CPMAX-SZENARIEN UND DER GETESTETEN MASSNAHMEN 101
6.9.1 Lineare Elemente *101*
6.9.2 Übertragungseffekte *102*

7. DISKUSSION UND SYNTHESE 105
7.1 PARZELLENSCHARFE FAKTORDATEN UND BODENABTRAGSABSCHÄTZUNGEN 106
7.2 TOLERANZWERT 107
7.3 MASSNAHMENPLANUNG 108
7.4 ANWENDUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR DIE MASSNAHMENPLANUNG MIT AVEROSION 109
7.5 AUSBLICK 110

8. LITERATURVERZEICHNIS 113

9. ANHANG 117

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung
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
DHM25	Digitales Höhenmodell mit einer Auflösung von 25x25 m
DTM-AV	Digitales Terrainmodell der Amtlichen Vermessung
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EUREKA	European Research Coordination Agency
FAL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz
GIS	Geographisches Informationssystem
HADES	Hydrologischer Atlas der Schweiz
MUSLE87	Modified Universal Soil Loss Equation 1987
RBA	Relative Bodenabträge
USLE	Universal Soil Loss Equation
WOCAT	World Overview of Conservation Approaches and Technologies

VORWORT

Nun sitze ich nach über einem Jahr arbeit vor meiner fertigen Masterarbeit, ein Heftchen mit etwas mehr als über 100 Seiten. Wenn ich zurückblicke waren die Zeiten geprägt von Hoch und Tiefs. Immer wieder gab es neben tristen Tagen auch Lichtblicke am Horizont, gute Gespräche mit den Betreuern, welche mich sehr gut unterstützt haben und andere gute Momente neben der Uni, welche mich immer wieder anspornten, die Masterarbeit voran zu treiben. Während diesem Jahr konnte ich einige interessante Dinge über Ackerfeldbau, Fruchtfolgen, Erosionsprozesse und GIS-Anwendungen lernen. Somit hat mich die Arbeit nicht nur meinem Abschluss des Studiums näher gebracht, sondern hat mich auch um einige Erfahrungen und wissenswerte Fakten reicher gemacht. Nun neigt sich das Studium dem Ende zu, ein Augenblick vor dem ich vor nicht all zu langer Zeit noch Angst hatte. Was nun? Wohin? Was tun? Dank der Masterarbeit und dem Einsatz meiner Betreuer Hanspeter Liniger und Volker Prasuhn, welchen ich hiermit meinen herzlichsten Dank entsende, werde ich im Verlaufe des nächsten Jahres für das BLW an einem Projekt mitarbeiten können und somit erste Berufserfahrungen sammeln. Der Austritt aus dem Universitätsalltag hat also viel reibungsloser geklappt, als ich mir das vorgestellt habe. Diese Erfahrung hat mir wieder einmal vorgehalten, dass man nie den Kopf hängen lassen sollte und sich immer irgendwo Chancen ergeben.

So bleibt mir hier noch allen Leuten Danke zu sagen, welche mich während diesem Jahr unterstützt haben und mir teilweise auch Mut gemacht haben. Dies sind vorne weg die zwei Betreuer Hanspeter Liniger und Volker Prasuhn, welche mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen und Thomas Ledermann, welcher sich am Anfang der Arbeit immer wieder Zeit für mich nahm. Hans Hurni und Hans Kienholz gebührt Dank für die Abnahme des Mastervortrags („Arrivederci Hans"). Ebenfalls Danken möchte ich den Leuten im Assistenz-Raum am CDE, welche das Arbeiten immer sehr angenehm gestalteten und für lustige Momente während den harten Tagen sorgten. Abschliessend möchte ich noch Martina Cantieni, Stefan Zgraggen und allen Mitgliedern von WOETI danken, sie haben mir neben dem Studium und der Arbeit immer wieder ein offenes Ohr für (Motivations-) Probleme geliehen und mich vom Alltag abgelenkt....Thanks a lot guys!!!

Das war's...viel Spass beim lesen der Arbeit.

1. EINLEITUNG

Böden bilden den obersten Teil der Erdkruste des Festlandes (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998). Sie sind Grundlage und Lebensort für unzählige Lebensformen, sei es tierischer oder pflanzlicher Natur, und nicht zu letzt bilden Böden auch die Lebensgrundlage für die Menschen. Wir beziehen einen Grossteil unserer Nahrung von den Böden, genauer gesagt von Produkten, welche auf ihnen gedeihen, oder sich auch von solchen Produkten ernähren. Somit darf behauptet werden, dass Böden für das menschliche Leben existentiell sind. Neben der Nahrungsgrundlage werden Böden auch als Standorte von Niederlassungen, Abbau und Gewinnung von Ressourcen und anderer Aktivitäten genutzt. Angesichts dieser ernormen Bedeutung der Böden für unser aller Existenz, darf der Aussage der Bodencharta des Europarates aus dem Jahre 1972, dass Böden zu den kostbarsten Gütern der Menschheit, die es zu schützen gilt, zählen, ohne Widerspruch zugestimmt werden.

Aus den verschiedenen Nutzungsformen und Ansprüchen an Böden entstehen auch immer wieder Konflikte zwischen Ökologie, Ökonomie und sozio-kulturellem Verständnis von Böden. Spätestens seit der Mensch sesshaft wurde, nahm er den Boden für sich und seine Bedürfnisse in Anspruch und veränderte ihn dementsprechend. Mit der Zeit entwickelte sich ein intensiver Ackerbau, der für die Nahrungssicherung der Menschen durch die steigenden Bevölkerungszahlen immer mehr an Bedeutung gewann. Diese Intensivierung der Beanspruchung der Böden war ein massiver Eingriff in die natürlichen Gegebenheiten. Die natürlichen Pflanzen wurden durch ausgewählte Kulturen ersetzt, der Boden wurde bearbeitet und der Druck auf die Ressource Boden stieg weiter. In Abbildung 1.1 sieht man deutlich die Diskrepanz zwischen der Entwicklung der Bevölkerung, welche stets einen starken Zuwachs verzeichnet und der Entwicklung der Ackerfläche, welche von 1990 an mehr oder weniger stetig sank, obwohl die Getreideernte stieg. Dies führt zum Schluss, dass die Bearbeitung der Böden mit der Zeit immer noch intensiver wurde und dass die Ressource Boden ein begrenztes Gut ist. Auch aus dieser Sicht muss die Aussage der Bodencharta des Europarates 1972 bestätigt werden.

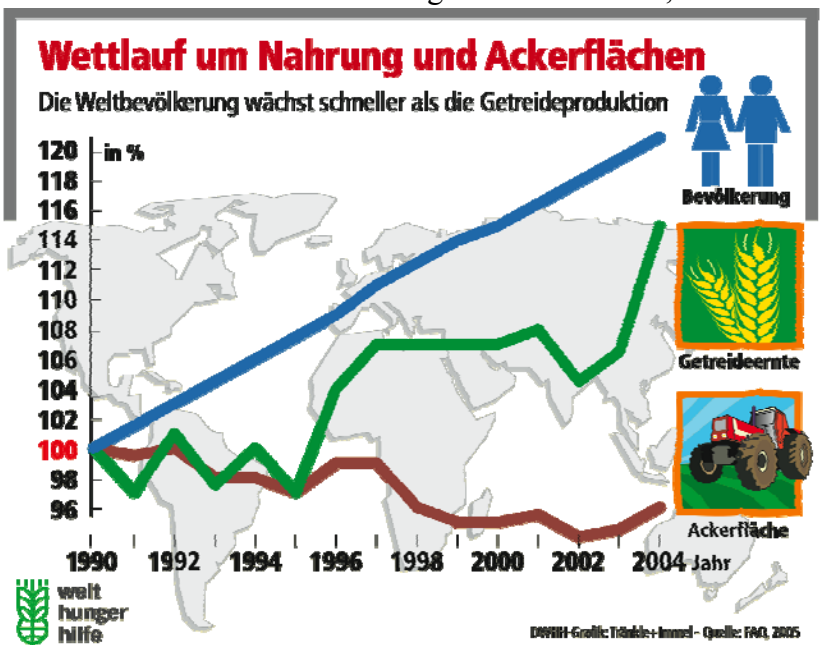


Abbildung 1.1: Die Entwicklung der Bevölkerung, der Getreideernte und der Ackerfläche seit 1990 bis 2004. Die Abbildung stammt von der Welt Hunger Hilfe, als Quelle dienten Daten der FAO 2005.

Die intensivere Bewirtschaftung führt immer wieder zu Schäden auf Ackerböden. Denn im Gegensatz zu natürlich bewachsenen Böden, weisen Ackerflächen meist Perioden ohne Bewuchs, also brach liegende Flächen, auf. Diese sind für Erosion durch Wasser stark gefährdet. Durch den Bodenabtrag gehen wichtige Nährstoffe und Mikroorganismen verloren. Dadurch wird die Fruchtbarkeit des Bodens reduziert und zusätzlich gelangen auch Schadstoffe, wie Düngerrückstände oder Pestizide, in Flüsse, Seen und ins Grundwasser. Da Bodendegradierungen in grossem Ausmass auf längere Sicht negative Folgen auf die Nahrungssicherheit haben können, sollten solche Prozesse wo möglich verhindert werden.

Erosionskartierungen und das Modellieren von Bodenabträgen mittels geeigneter Software können helfen, Entscheidungsgrundlagen für allfällige Massnahmen zur Minimierung von Erosionsprozessen zu erarbeiten. In betroffenen Gebieten kann so gezielt eingegriffen werden. Erosionskartierungen von Hand sind eine sehr zeit- und kostenaufwändige Sache, deshalb wird heute vermehrt auch mit digitalen Mitteln gearbeitet. Es gibt viele verschiedene Ansätze, Modelle und Programme, welche sich mit diesen Modellierungen beschäftigen.
Für solche Arbeiten müssen aber auch immer entsprechende Datengrundlagen bestehen. Diese wurden über die Jahre immer detaillierter und halfen, die Resultate der Abschätzungen zu verfeinern. Denn die Auflösung der Grunddaten ist entscheidend für die Genauigkeit der digitalen Bodenabtragsabschätzungen. So können vermehrt genauere Abschätzungen über grössere Räume erarbeitet werden - und dies mit geringerem zeitlichen und finanziellem Aufwand.

1.1 Problemstellung

Erosionsgefährdungskarten zu erstellen braucht viel Zeit und ist mit Kosten verbunden. Im digitalen Zeitalter sind deshalb vermehrt EDV-gestützte Arbeiten zu diesem Thema entstanden. Sie erlauben mit geringerem zeitlichen Aufwand und meist auch kleineren Ausgaben, eine detaillierte Bodenabtragsabschätzung zu gewährleisten. Einerseits wurden die verwendeten Modelle an die GIS-gestützten Programme angepasst, andererseits wurden auch die zu verwendenden Daten immer genauer und somit auch die erzielten Resultate. Zwei Arbeiten, welche GIS-gestützte Programme verwendeten, hatten grossen Einfluss auf die vorliegende Arbeit. Dies war zum einen die Arbeit von FRIEDLI (2006), welcher digitale Bodenabtragsabschätzungen im Hektarraster für die ganze Schweiz erarbeitete. Hier wurden auch viele der auch in dieser Arbeit verwendeten Grundlagendaten zusammengestellt. Erosionsabschätzungen im Hektarraster bieten aber nur eine grobe Übersicht und kleinere Erosionsformen können hier nicht erfasst werden.
Eine weitere Arbeit war jene von CHISHOLM (2008). Sie war die Grundlage dieser Arbeit. CHISHOLM verwendete die Extension AVErosion für ArcView 3.x, wie sie auch in dieser Arbeit zum Einsatz kommt. Er versuchte mit höher aufgelösten digitalen Höhenmodellen noch genauere Resultate zu erzielen, als dies bei FRIEDLI (2006) der Fall war. Die meisten Grundlagendaten bei CHISHOLM (2008) wurden aber ebenfalls von FRIEDLI (2006) übernommen.

Die hier verwendete Extension AVErosion für ArcView 3.x, bietet mit dem Grundlagenmodell der USLE (Universal Soil Loss Equation (WISCHMEIER & SMITH 1978) eines der weltweit am weitesten verbreiteten Modelle zur Abschätzung von Bodenabträgen an. Die USLE entspricht der ABAG (allgemeine Bodenabtragsgleichung). Diese wurde von SCHWERTMANN et al. (1990) an mitteleuropäische Verhältnisse angepasst. Eine Modifikation dieses Modells ist die Grundlage für die vorliegende Arbeit, die MUSLE87 (BORK & HENSEL 1988). Sie beinhaltet einige Änderungen und Anpassungen gegenüber der USLE, basiert aber sonst auf den selben Parametern.
Der Hauptunterschied zwischen der Arbeit von CHISHOLM (2008) und dieser Arbeit besteht in der Verfügbarkeit einiger Inputdaten. Während CHISHOLM die gemittelten Daten von FRIEDLI (2006) übernommen hat, standen für diese Arbeit für zwei Faktoren (C und K) der MUSLE87 hochaufgelöste Daten zur Verfügung. Diese sind parzellenscharf vorhanden. Das heisst im Untersuchungsgebiet Frienisberg stehen individuelle Werte für jede einzelne Parzelle für die zwei Faktoren zur Verfügung. Durch diese genauen Daten erhofft man sich weitere Aufschlüsse über die Erosionsgefährdung und auch über die Funktionsweise des verwendeten Programms und das Abschätzen der Datengrundlagen.

1.2 Motivation

Da mich die GIS-Veranstaltungen im Verlauf des Geographiestudiums an der Universität Bern immer sehr interessiert hatten und ich diesen Bereich als sehr nützlich für die spätere Praxis im Berufsalltag ansehe, war für mich klar, dass meine Masterarbeit etwas mit diesem Gebiet zu tun haben sollte. Ich informierte mich dann über verschiedene Themen am CDE, welche GIS als Bestandteil der Arbeit integrierten. Nach einigen Gesprächen mit meinem Betreuer Dr. Hanspeter Liniger kamen wir auf das Thema dieser Arbeit. Ich möchte mich an dieser Stelle bei Hanspeter Liniger für die beratende Teilnahme bei der Themenwahl bedanken. Die Thematik von Erosionsabschätzungen auf Ackerfeldern hat mich auch neben den GIS-Anwendungen sehr interessiert. Einerseits galt es für mich den Ackerbau einwenig mehr zu entdecken, da ich aus einem Gebiet stamme, wo vorwiegend Viehzucht und Milchproduktion vorherrschen. Andererseits hatte ich dadurch die Möglichkeit, mich über einen Zeitraum eines Jahres mit GIS-Anwendungen auseinanderzusetzen und einige neue Techniken dazu zu lernen.

Diese Punkte waren schliesslich ausschlaggebend für die Entscheidung dieses Thema zu wählen. Ein weiterer Punkt, der die Motivation während der Arbeit steigen liess, war die Tatsache, dass von anderer Seite her Interesse an meiner Arbeit angemeldet wurde. Einige Personen vom Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) wurden mit meinen bis dahin erarbeiteten Daten konfrontiert und befanden diese als äusserst nützlich. Dies brachte mir zusätzlichen Aufschwung, da ich sah, dass meine Arbeit auch ausserhalb der Universität als nützlich angesehen wurde. Denn für mich war es entscheidend, nicht nur eine Arbeit zu Verfassen, um den Abschluss zu erlangen, sondern es sollte auch ein Nutzen dabei entstehen. Dies war somit auch gegeben und deshalb war die Entscheidung für dieses Thema für mich die richtige Wahl.

1.3 Relevanz der Arbeit

Nach den Arbeiten von FRIEDLI (2006) und vor allem von CHISHOLM (2008), der mit dem selben Programm, der AVErosion Extension (in der Folge auch „Tool“ oder Programm genannt), gearbeitet hat, versucht diese Arbeit, die erzielten Resultate dieser Arbeiten aufzugreifen und weiterzuführen. Die Konzentration liegt hier vor allem auf der Weiterführung von CHISHOLM's Arbeit und zwar mit ergänzenden Faktordaten. CHISHOLM (2008) hat die AVErosion als erster in der Schweiz getestet und angewandt. Bei ihm ging es in erster Linie darum, die Funktionsweise des Programms unter verschiedenen Bedingungen zu untersuchen. Er verwendete verschiedene Auflösungen und testete die zwei zur Verfügung stehenden Modelle (USLE und MUSLE87) und verglich die erzielten Resultate. Gestützt auf seinen Resultaten konnte man sich in dieser Arbeit mit der Verwendung von einem Modell begnügen, welches von CHISHOLM (2008) als geeigneter erachtet wurde (MUSLE87). Die Hauptpunkte dieser Arbeit bestanden nun einerseits darin, die von CHISHOLM erarbeiteten Resultate mit jenen der vorliegenden Arbeit zu vergleichen. Dabei sollten vor allem die hier parzellenscharf vorhandenen Faktordaten (C- und K-Faktor) und ihre Auswirkungen erörtert werden. Zum anderen wurde hier eine neue Möglichkeit des Programms ausprobiert und die Funktionsweise getestet. Dabei handelt es sich um die CPmax-Szenarien, welche maximale Nutzungsintensitäten beschreiben und somit einen Beitrag zur Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft leisten können. CHISHOLM (2008) verwendete nur eine Berechnungsmethode der AVErosion-Extension und zwar die Bruttoerosion. Diese berechnet auf der Grundlage der eingegebenen Daten über das Relief, die Bodenbeschaffenheit und die Bewirtschaftung der Ackerflächen, einen langjährigen mittleren Bodenabtrag in t/(ha*a). Diese Anwendung wurde auch in der vorliegenden Arbeit benützt. Bei AVErosion steht zusätzlich die oben erwähnte CPmax-Berechnung zur Verfügung und eine Methode um die Stoffbilanz zu berechnen. Letztere findet aber in dieser Arbeit, aus thematischen und zeitlichen Gründen, keinen Platz mehr. Die drei Berechnungsmöglichkeiten werden in Kapitel 2 noch genauer erklärt.

In einem grösseren Rahmen war die Arbeit in das COST Programm eingelagert. COST (Europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wissenschaftlichen und technischen Forschung) bildet in der Schweiz zusammen mit EUREKA und den EU-Rahmenprogrammen die Basis für die Forschungszusammenarbeit mit Europa (CHISHOLM 2008). Es gibt verschiedene sogenannte COST-Aktionen. Diese Arbeit ist bei der COST-Aktion 634 „On- and Off-Site Environmental Impacts of Runoff and Erosion“ (http://www.soilerosion.net/cost634/) anzusiedeln. Das CDE in Bern (Centre for Development and Environment) und die Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) sind zwei der Akteure, welche bei dieser COST-Aktion aktiv sind. Dies zeigt sich auch bei der Zusammensetzung meiner Betreuer für die Arbeit. Zum einen ist dies Dr. Hanspeter Liniger[1],

[1] Dr. Hanspeter Liniger ist Leiter der COST-Projekt 634 – On- and Off-Site Environmental Impacts of Runoff and Erosion

(Programme Coordinator WOCAT - World Overview of Conservation Approaches and Technologies) vom CDE und zum andern Dr. Volker Prasuhn[2] (Leitung Bereich Gewässerschutz) von der ART.

Volker Prasuhn kartiert seit über 10 Jahren im Gebiet Frienisberg (BE) Erosionsereignisse und hat vielfältige Daten über dieses Gebiet gesammelt. Teile dieser Daten fanden auch Verwendung in dieser Arbeit. Dies war auch der ausschlaggebende Punkt, dass die Erosionsabschätzungen mit AVErosion in Frienisberg (BE) stattfanden, da dort die Datengrundlagen schlagbezogen (individuelle Faktordaten für jede einzelne Parzelle) vorhanden waren. Ausserdem fanden seit 2005 noch zwei Doktorarbeiten für die COST-Aktion 634 unter anderem in diesem Gebiet statt. 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“.

1.4 Zielsetzungen

Grundlage dieser Arbeit ist die Extension AVErosion für ArcView 3.x und das Modell MUSLE87. Dieses wurde in der Arbeit von CHISHOLM (2008) für Erosionsabschätzungen vor allem mit höher aufgelösten Daten als besser geeignet befunden und hier nicht mehr weiter in Frage gestellt. Diese Arbeit soll eine Weiterführung und Ergänzung der Arbeit von CHISHOLM (2008) bieten.

1.4.1 Auswirkungen von parzellenscharfen Faktordaten

Hauptziel: Die Auswirkungen von parzellenscharfen Faktordaten sollen geklärt und aufgezeigt werden.

- Welche Unterschiede in Bezug auf den berechneten Bodenabtrag zeigen sich bei den Erosionsabschätzungen mit den parzellenscharfen Faktordaten gegenüber den Resultaten mit gebietsspezifischen Faktoren?

- Wo sind diese Unterschiede festzustellen und welche Kombinationen von Faktoren führen dazu?

[2] Dr. Volker Prasuhn ist schweizerischer Delegierter und Koordinator für das COST- Projekt 634

Unterziel 1: Die Verwendbarkeit und Qualität der gemittelten Faktordaten soll geklärt werden.

- Wie sind die gebietsspezifischen und abgeschätzten Faktoren gegenüber den parzellenscharfen Faktordaten zu bewerten?

- Welche Faktoren sollten wenn möglich parzellenscharf vorhanden sein, welche können unter Umständen grob abgeschätzt werden?

Die Bedeutung der einzelnen Faktoren auf den Bodenabtrag

Unterziel 2: Die bestimmenden Faktoren für die Bodenabtragsabschätzungen sollen herausgefiltert werden.

- Welche Faktoren und Faktorkombinationen haben grossen Einfluss auf die Höhe der Bodenabtragsabschätzung?
- Gibt es einzelne Faktoren, welche gegenüber anderen dominant sind?

Das methodische Ziel ist abzuklären, welche Faktordaten wie zu Erheben sind, um zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten. Weiter liegen mit den erarbeiteten Karten weiterführende Erkenntnisse zur Erosionssituation im Gebiet Frienisberg vor. Diese dienen Volker Prasuhn als Grundlage für einen Vergleich von kartierten und modellierten Daten. Eine erste Übersicht dieses Vergleiches wird in dieser Arbeit auch besprochen.

1.4.2 Massnahmenplanung mit der Extension AVErosion

Der zweite Teil der Arbeit ist unabhängig von der Arbeit von CHISHOLM (2008). Hierbei handelt es sich um erste Versuche, die CPmax-Szenarien von AVErosion anzuwenden und die Anwendung und den Gebrauch der Ergebnisse zu untersuchen. Neben der Berechnung der Bruttoerosion und der Stoffbilanz sind die CPmax-Szenarien, die dritte Berechnungsmöglichkeit mit diesem Tool. Dabei geht es um die Bestimmung von maximal zulässigen Nutzungsintensitäten für Ackerfelder.

CPmax-Szenarien

Hauptziele:

- ❖ Die Verwendung der CPmax-Szenarien soll getestet werden.
- ❖ Für einige betroffene Parzellen im Gebiet Frienisberg, sollen mittels CPmax-Szenarien die Datengrundlage für eine Massnahmenplanung berechnet werden.

Die Fragen, welche hier geklärt werden sollen:

- Wie ist die Funktionsweise und die Handhabung der CPmax-Szenarien?
- Wie sind die Resultate zu bewerten?
- Gibt es Schwierigkeiten bei der Anwendung des Programms oder der Verwendung der Daten?

Massnahmenplanung für einzelne Parzellen

Im letzten Teil der Arbeit werden die berechneten maximalen Nutzungsintensitäten, für eine gezielte Massnahmenplanung für ausgewählte Parzellen verwendet. Das CPmax-Szenario soll also die Grundlage für die Umgestaltung der Parzellen zur Reduktion des Bodenabtrags bilden. Für die ausgewählten Parzellen sollen Massnahmen vorgeschlagen werden, um die Erosion unter einen bestimmten tolerierbaren Wert zu bringen.

Hauptziel: Es soll eine gezielte Massnahmenplanung für ausgewählte Parzellen auf der Grundlage der CPmax-Szenarien erarbeitet werden.

Fragen, die zu beantworten sind:

- Können die Resultate der CPmax-Szenarien für eine gezielte Massnahmenplanung verwendet werden?
- Welche Massnahmen können ergriffen werden?
- Wie sehen diese Massnahmen konkret aus?
- Welche Auswirkungen haben die Massnahmen und wie lassen sie sich im Programm modellieren?
- Ist das Tool AVErosion für eine Massnahmeplanung geeignet?

Auf diese Weise wird auch aufgezeigt, wie die Erarbeitung von Massnahmen mit dem Programm AVErosion von der Erhebung der Daten, über die Modellierung von „aktuellen“ Erosionsabschätzungen, zu Berechnungen von maximalen Nutzungsintensitäten, bis hin zu gezielten Massnahmen angegangen werden kann.

Praktische Ziele

Hier sind persönliche Ziele mit dem Umgang der GIS-Software gemeint. Für den Vergleich der Resultate von CHISHOLM (2008) und dieser Arbeit (in der Folge auch GISLER 2009 oder kurz GISLER genannt) müssen verschiedene Karten und Berechnungen mit der Software durchgeführt werden. Diese Erfahrungen mit der GIS-Software und das Erlernen neuer Tools und Anwendungen zählen zu den Zielen die ich mir persönlich gesetzt habe. Weiter wollte ich auch Erkenntnisse über den Ackerbau gewinnen. Was für Möglichkeiten können überhaupt im Ackerbau ergriffen werden um die Erosion einzudämmen? Wie sehen Fruchtfolgen im Ackerbau aus? Welche Veränderungen sind dort möglich? Solche und weitere Fragen werden im Laufe der Arbeit geklärt.

1.5 Aufbau

Im **ersten** der sieben Kapitel wird eine Übersicht über das Thema und die Zielsetzungen gegeben, während in **Kapitel 2** die Grundlagen und Methodik der Arbeit erläutert werden. Hier werden die Grundbegriffe von Bodenerosion durch Wasser und deren Formen erläutert und die Modelle zur Abschätzung erklärt. In **Kapitel 3** wird Bezug zum Programm AVErosion und zu den verwendeten Grundlagendaten genommen. Die einzelnen Faktoren werden beschrieben und die Funktionsweise des Programms erklärt. **Kapitel 4** bietet einen kurzen Überblick des behandelten Gebietes, Frienisberg (BE). In **Kapitel 5** werden die Resultate und Interpretationen zum Vergleich der parzellenscharfen und der gemittelten Daten besprochen. Dies geschieht anhand der modellierten Karten und zusammengestellten Tabellen. **Kapitel 6** zeigt wie die Massnahmenplanung mit AVErosion angegangen werden kann. Hierbei geht es um die Verwendung der CPmax-Szenarien für eine gezielte Massnahmenplanung, mögliche Ansatzpunkte für Massnahmen zur Senkung der Bodenerosion und die Evaluation von Problemen mit dem Programm, welche dabei entstanden sind. In **Kapitel 7** wird eine Synthese und Diskussion der vorangegangenen Resultatteile versucht. Hier werden die Aussagen gebündelt und die Verwendung von AVErosion für Bodenabtragsabschätzungen und Massnahmenplanung behandelt.

2. GRUNDLAGEN UND METHODIK

Bodenerosion findet an jedem Hang statt, aber in unterschiedlicher Ausprägung (BLUME 2004). Verschieden Faktoren wirken sich auf die Erosionseigenschaften eines Bodens aus und führen zu verschiedenen Formen von Erosion. Im folgenden Abschnitt werden die Grundbegriffe der Bodenerosion und ihre verschiedenen Formen erläutert und erklärt.

2.1 Bodenerosion – Definitionen und Grundbegriffe

„Bodenerosion ist die Ablösung, der Transport und die Ablagerung von Bodenpartikeln und wird durch Eingriffe des Menschen ermöglicht und durch Wasser (oder Wind) ausgelöst."
(PRASUHN & GRÜNIG 2001)

In diesem Zitat werden nebst der Definition noch zwei weitere wichtige Bereiche der Erosion angesprochen. Einerseits werden die zwei massgeblich an Erosion beteiligten Vorgänge genannt, nämlich Wasser und Wind. Zum Anderen wird auch die Rolle des Menschen miteinbezogen.

2.1.1 Anthropogene Einflüsse

Der Mensch verändert durch das Bewirtschaften von Ackerfeldern die Eigenschaften und die Disposition der vorhandenen Böden. Ein natürlicher Boden wird, vorausgesetzt die natürlichen Bedingungen erlauben dies, nie unbedeckt sein und somit über das ganze Jahr eine schützende Vegetationsdecke aufweisen. Durch Bearbeiten und Bewirtschaften von Ackerland greift der Mensch in diesen natürlichen Zustand ein und verändert ihn. Bei fast allen Bearbeitungsmethoden in der heutigen Landwirtschaft finden sich Phasen beim Ackerbau, in welchen der Boden kurzfristig brach liegt und somit ohne schützende Vegetation dem Niederschlag ausgesetzt ist. Eine Ausnahme bilden hier die Mulch- und Direktsaat, welche gezielt versuchen einen ganzjährigen Bodenschutz zu gewährleisten. Aus diesen Ausführungen ist zu entnehmen, dass auf geneigten Ackerflächen eigentlich immer mit Erosion zu rechnen ist. Die anthropogenen Einflüsse sind vor allem bei der Wahl der Bodenbearbeitungsmethode und der angepflanzten Kultur zu sehen, welche die Höhe des Bodenabtrags massgeblich beeinflussen können.

2.1.2 Erosion durch Wasser und Wind

Im obenstehenden Zitat ist der Ausdruck Wind in Klammern gesetzt. Dies zeigt die Verhältnisse der zwei Erosionsprozesse auf. Im globalen Ausmass spielt die Winderosion eine untergeordnete Rolle. Damit nennenswerte Winderosion auftreten kann, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein. Zum einen darf der jährliche Niederschlag 250-300 mm nicht übersteigen und zum anderen müssen Winde vorhanden sein, welche genügend stark sind, um Bodenpartikel mitzutragen (vgl. HUDSON 1995 und CHISHOLM 2008). Daraus ergibt sich,

dass diese Form der Erosion in der Schweiz keine grosse Rolle spielt. Die Erosion durch Wasser hingegen hängt von der Menge und der Intensität des fallenden Niederschlags ab, welcher in der Schweiz reichlich vorhanden ist. Im Folgenden wird ausschliesslich der durch Wasser ausgelöste Prozess der Bodenerosion behandelt.

2.1.3 Prozesse des Bodenabtrags

Der Auslöser für Bodenabtrag durch Wasser ist meistens Regen (SCHWERTMANN et al. 1990). Der Niederschlag fällt auf den Boden und zerschlägt durch seine kinetische Energie ($^1/_2$ mv^2) die Aggregate des Bodens in einzelne Partikel („Splash-Effekt"). Diese Energie nimmt mit zunehmender Tropfengrösse und Fallgeschwindigkeit zu. Die kleinen abgeschlagenen Teilchen verstopfen die Poren und hindern das Wasser am infiltrieren in den Boden. Dabei bildet sich eine rund 1mm dicke Verschlämmungsschicht. Das nachkommende Regenwasser kann nun nicht in den Boden infiltrieren und fliesst oberflächig ab, womit die zweite Phase der Erosion durch Wasser beginnt. Das abfliessende Wasser löst mit seinen mitgeschwemmten Teilchen noch weitere Bodenpartikel. Die Energie des fliessenden Wassers ist grundsätzlich kleiner als die der Regentropfen, da es aber über grössere Flächen wirkt und länger andauert, wirkt es trotzdem stark auf den Boden ein. Das Wasser kann sich in Rinnen sammeln und dort seine erosive Wirkung noch mehr entfalten (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998).

2.1.4 Erosionsformen

Es werden grundsätzlich zwei Formen von Erosion durch Wasser unterschieden. Zum Einen ist dies die flächenhafte Erosion und zum Andern eine lineare Form, welche nach Art und Ausmass noch in Rillen, Rinnen und Gräben unterteilt wird.

Nach PRASUHN & GRÜNIG (2001) werden die verschiedenen Formen wie folgt unterschieden:

Flächenhafte Erosion:

- **Oberflächenverschlämmung**: Sie ist das sichtbare Zeichen von Regentropfenerosion (Splash-Effekt) und gilt als das Initialstadium der Bodenerosion.
- **Flächenspülung**: Durch flächenhaften Oberflächenabfluss wird Bodenmaterial der obersten Bodenschicht transportiert, ohne dass grössere (>2cm Tiefe) Eintiefungen entstehen. Resultierende Erosionsformen sind sichtbare Verspülungen.

Lineare Erosion:

- **Rillenerosion**: Durch konzentrierten Oberflächenabfluss oder grosse Abflussmengen können sichtbare Eintiefungen in die Bodenoberfläche von 2-10 cm Tiefe entstehen, die als Rillen bezeichnet werden. Abgrenzungskriterium gegenüber den Rinnen ist einzig die Tiefe. So können auch Rillen von >1m Breite auftreten (sogenannte Talwege).
- **Rinnenerosion**: Als Rinnen werden lineare Erosionsformen von 10-40 cm Tiefe bezeichnet.
- **Gräben**: Gräben sind lineare Erosionsformen mit einer Tiefe >40 cm.
- **Flächenhafte lineare Erosion**: Flächenhaft lineare Erosionsformen sind überwiegend lineare Erosionsformen, die auf einer Fläche häufig und mehr oder weniger regelmässig verteilt vorkommen und dicht beieinander liegen oder ein Netzwerk von verflochtenen Rillen bilden.

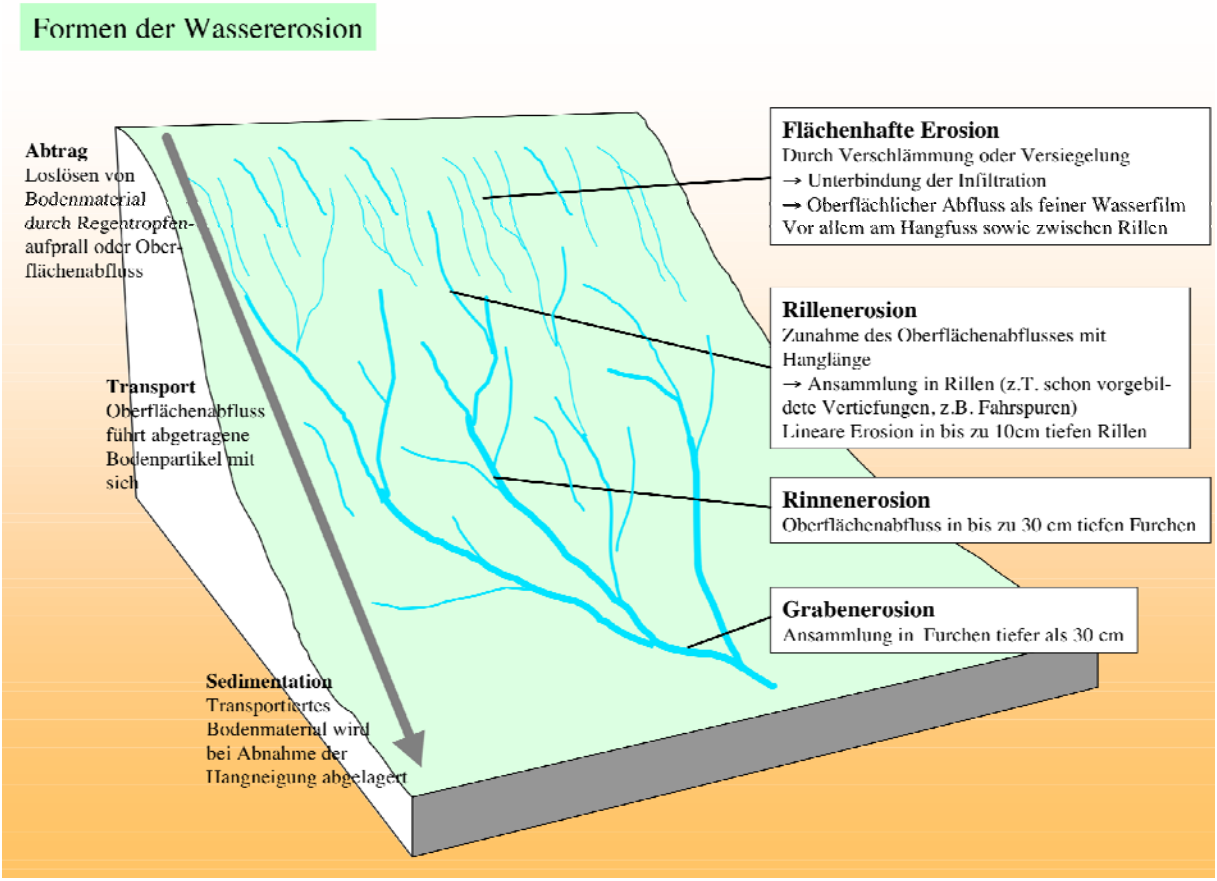


Abbildung 2.1: Formen der Wassererosion. Die Angaben der Zahlenwerte können leicht von den Definitionen von oben abweichen. (Quelle: http://www.baselland.ch/fileadmin/baselland/files/docs/bud/boden/fotos/erosion/formen-wassererosion.pdf. Zugriff: 27. Mai 2009.)

2.2 Modellierung der Bodenerosion

Gemessen an anderen Regionen der Erde wie z.B. Südostasien oder tropischen Gebieten Afrikas und Südamerikas, wo der mittlere jährliche Bodenabtrag zum Teil bis 100 t/(ha*a) und mehr beträgt, sind die Bodenabträge in den gemässigten Breiten relativ klein (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998). Deshalb stellt sich die Frage nach dem Nutzen und der Notwendigkeit von Bodenabtragsmodellierungen. Da man aber auch in Mitteleuropa und auch in der Schweiz immer wieder Erosionsformen, sei es flächenhafter oder linearer Art, vorfindet, sieht man, dass das Problem der Erosion auch vor Gebieten mit vermeintlich stabilen Böden nicht halt macht. Auch in der Schweiz gibt es Gebiete mit mittleren jährlichen Bodenabträgen von über 10 t/(ha*a).

Die Gewichtung des Schutzes von Böden und des Ergreifens von Gegenmassnahmen liegt in der Inwertsetzung der Ressource Boden und auch darin, wie bedeutend man die mit der Bodenerosion verbundenen Prozesse einstuft. Dies ist von Land zu Land unterschiedlich und hängt auch mit dem jeweiligen Verständnis von ökologischer Nachhaltigkeit zusammen. So gibt es in der Schweiz seit 1. Juli 1998 eine „Verordnung über Belastung des Bodens“ (VBBo 1998). In dieser Verordnung werden unter anderem Schwellenwerte für Bodenabträge festgesetzt, welche nicht übertreten werden dürfen, ansonsten müssen auf betroffenen Feldern Massnahmen ergriffen werden. Dies zeigt, dass die Schweiz ein Interesse daran hat, den Boden zu bewahren und zu schützen und weiterreichende Prozesse der Erosion einzudämmen, von denen man negative Folgen erwartet. Denn neben den Schäden, welche auf dem Feld entstehen können, gibt es auch Folgeschäden, welche über die Parzellengrenze hinausgehen. Die Schäden von Bodenerosion werden grundsätzlich in zwei Kategorien eingeteilt, On-Site-Schäden und Off-Site-Schäden.

On-Site-Schäden:

Dies sind Schäden, welche auf dem betroffenen Feld durch die Erosion entstehen.

- erschwerte Bearbeitung durch Rillen und Gräben
- Nährstoffverlust
- Sinkende Bodengründigkeit
- Verlust von fruchtbarem Oberboden
- Verringerte Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität
- u.a.m.

Off-Site-Schäden:

Dies sind Schäden, welche Auswirkungen über die Parzellengrenze hinaus haben.

- Verschmutzung und Schäden an Wegen und Häusern
- Verlandung von Gewässern
- Eintrag von Nährstoffen, Pestiziden und Schwermetallen in Gewässer und benachbarte Ökosysteme
- u.a.m. (vgl. dazu SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998)

Auf Grund dieser Beurteilung von Schäden und der Verordnung über die Belastung von Böden, macht es Sinn, eine Bodenabtragsmodellierung zu erstellen. Obwohl man die Resultate der Modelle immer mit Vorsicht betrachten muss und die absoluten Zahlen nicht direkt mit gemessenen Daten vergleichen darf, geben solche Modellberechnungen trotzdem Aufschluss darüber, wo gefährdete Parzellen auftauchen und Massnahmen geplant werden sollten.

2.3 Erosionsabschätzungsmodelle – USLE und MUSLE 87

Bei der Verwendung der AVErosion Extension stehen zwei Erosionsabschätzungsmodelle zur Auswahl. Dies sind die USLE (Universal Soil Loss Equation), entwickelt von WISCHMEIER & SMITH (1978) und die MUSLE 87 (Modified Universal Soil Loss Equation 1987), welche von HENSEL & BORK (1988) auf Grundlage der USLE leicht abgeändert wurde. Im nachfolgenden Teil wird auf diese zwei Modelle kurz Bezug genommen.

2.3.1 USLE – Universal Soil Loss Equation (WISCHMEIER & SMITH 1978)

Die USLE (Universal Soil Loss Equation) wurde in den 30er bis 50er Jahren des letzten Jahrhunderts in den USA von WISCHMEIER & SMITH entwickelt. In verschiedenen Weiterentwicklungen in dieser Zeit entstand am Ende das am weitesten verbreitete Erosionsabschätzungsmodell der Welt.

Mit Tests an Standardhängen, die 72.6 ft (22m) lang waren, eine Neigung von 9 % besassen, brach lagen und hangauf und –abwärts gepflügt wurden, versuchte man Zusammenhänge zu finden, welche für eine Abschätzung des Bodenabtrags verwendet werden konnten. Aus über 20 Jahre langen Felduntersuchungen auf solchen genormten Parzellen und anderen Hängen, welche zum Vergleich dienten, wurden schliesslich 6 Parameter herauskristallisiert, welche für die Abschätzung eines mittleren jährlichen Bodenabtrags hinreichend sind. Dabei handelt es sich um folgende Einflussgrössen:

- die Charakteristik des Regengeschehens (R-Faktor)
- die Eigenschaften des Bodens (K-Faktor)
- die Länge des Hanges (L-Faktor)
- die Neigung des Hanges (S-Faktor)
- die Bedeckung und Bearbeitung des Bodens (C-Faktor)
- die Art der Erosionsschutzmassnahmen (P-Faktor)

  (vgl. WISCHMEIER & SMITH 1978 und SCHWERTMANN et al. 1990)

Diese sechs Faktoren wurden durch Multiplikation in eine Gleichung eingebettet und ergeben als Resultat den mittleren jährlichen Bodenabtrag A in t/(ha*a). Die Formel der USLE, im deutschen Sprachraum ABAG (Allgemeine Bodenabtragsgleichung), lautet somit:

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

Mit:

A	=	Langjähriger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag in t/(ha*a)
R	=	Regen- und Oberflächenabflussfaktor, Niederschlagserosivität
K	=	Bodenerodierbarkeitsfaktor
L	=	Hanglängenfaktor / Grösse des Einzugsgebietes
S	=	Hangneigungsfaktor
C	=	Bedeckungs- und Bearbeitungsfakor
P	=	Erosiosschutzfaktor

Auf die einzelnen Faktoren wird in Kapitel 3 genauer eingegangen. In dieser Arbeit wurde aber nicht die USLE als Modell verwendet, sondern die MUSLE87. Dies ist das andere Modell, welches in der AVErosions-Extension zur Auswahl steht. CHISHOLM (2008) hat bei seinem Vergleich der beiden Modelle unter Verwendung von verschiedenen Auflösungen gezeigt, dass die MUSLE87 bei hochaufgelösten Daten bessere Resultate liefert. Deshalb wurde auf die Anwendung der USLE verzichtet und alle Berechnungen nur mit der MUSLE87 durchgeführt.

2.3.2 MUSLE87 – Modified Universal Soil Loss Equation 1987 (HENSEL & BORK 1988)

Das zweite Modell, welches im Tool AVErosion zur Verfügung steht, ist die MUSLE87. Dieses Erosionsabschätzungsmodell beruht auf den Grundlagen der USLE, hat aber ein paar Änderungen vorzuweisen. Da die USLE an gestreckten Hängen ermittelt wurde, weist sie in Gebieten mit stärkerem Relief gewisse Nachteile auf. SCHÄUBLE (1999) beschreibt unter Anderem folgende Einschränkungen:

- Der Bodenabtrag wird unter der Annahme eines gestreckten Hangs prognostiziert. Die genaue Hangmorphologie, mit konvexen und konkaven Abschnitten und dem daraus entstehenden Einfluss auf den Bodenabtrag, wird übergangen.

- Es wird nur ein zweidimensionaler Hang und kein dreidimensionales Einzugsgebiet betrachtet

- u.a.m.

Das Hauptproblem der USLE liegt darin, dass sie mit einem komplexen Relief überfordert ist und keine naturnahen hydrologischen Ergebnisse liefern kann. Diesem Problem sind HENSEL & BORK (1988) auf die Spur gegangen und haben eine Lösung gefunden. Diese Lösung findet sich in einer Änderung beim L-Faktor. Die restlichen Parameter sind wie bei der USLE beibehalten worden.

Der Unterschied der beiden Modelle beim L-Faktor lässt sich schon anhand des Namens erkennen. Bei der USLE heisst der Faktor Hanglängenfaktor, während er bei der MUSLE87 als Einzugsgebietsgrösse benannt wird. Der Hauptunterschied liegt darin, dass bei der USLE nur eine Fliesstrecke (Single-Flow) berechnet wird und das Wasser von einem Punkt aus nur immer einen möglichen Fliessweg ergreifen kann (Abbildung 2.2, Single-Flow Algorithmen). Der L-Faktor ist die Länge dieser Fliesstrecke, bis zu dem Punkt, an dem man sie berechnen möchte.

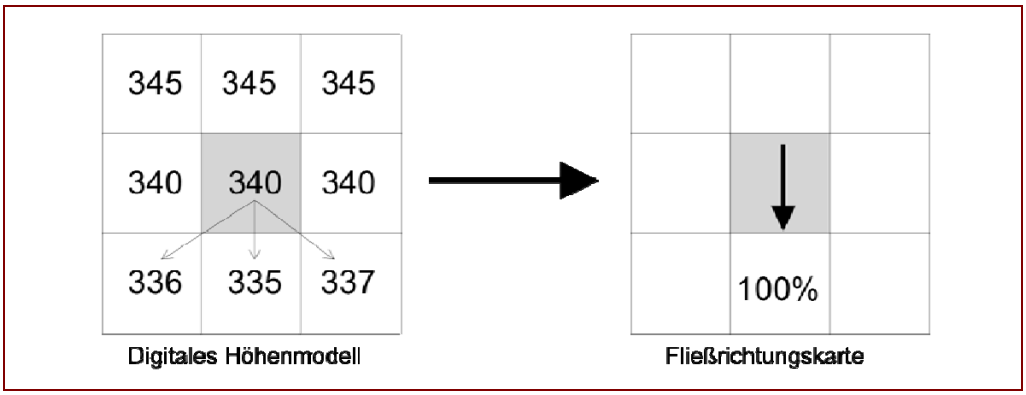


Abbildung 2.2: Fliesswege bei der USLE mit der Single-Flow Berechnung (Quelle: SCHÄUBLE 1999)

Bei der MUSLE87 kommt der sogenannte Multiple-Flow Algorithmus zum Einsatz (Abbildung 2.3). Hier hat das Wasser immer mehrer Möglichkeiten abzufliessen und zwar verhältnismässig zum Gefälle der jeweiligen Ausgangszelle zu den tiefer liegenden Zellen. Der Anteil an Wasser, welcher nun in die tieferen Zellen fliesst, wird auf Grund der unterschiedlichen Gefälle berechnet. Somit erhält jede Zelle die Menge an Wasser, die ihr durch ihre Lage im Gelände zusteht (CHISHOLM 2008).

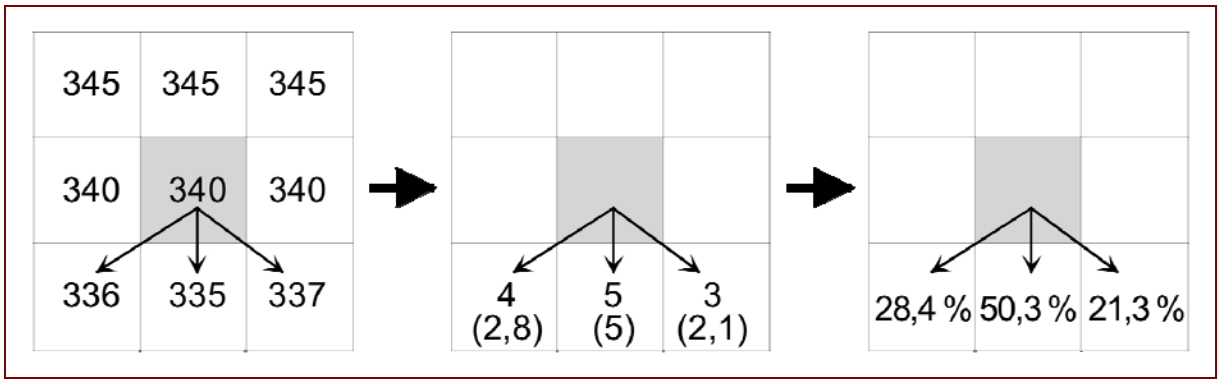


Abbildung 2.3: Fliesswege bei der MUSLE87 mit der Multiple-Flow Berechung. (Quelle: SCHÄUBLE 1999)

Das Multiple-Flow Verfahren der MUSLE87 liefert vor allem bei hochaufgelösten Daten sehr viel realistischere hydrologische Daten, als das Single-Flow Modell der USLE. Da in dieser Arbeit nicht der Vergleich der beiden Modelle im Vordergrund steht, wird hier nicht mehr weiter auf die Unterschiede eingegangen. Eine ausführlichere Beschreibung der Unterschiede findet sich in CHISHOLM (2008 : 14-21).

Im Programm AVErosion verwenden beide Modelle (USLE, MUSLE87) die von SCHWERTMANN et al. (1990) an die Verhältnisse von Mitteleuropa angepasste Form der USLE. Das heisst, die Berechnungen der einzelnen Faktoren weichen von jenen von WISCHMEIER & SMITH (1978) ab, um sie an die hier vorherrschenden Bedingungen anzugleichen. Die Grundlage bleibt aber die ursprüngliche Formel von WISCHMEIER & SMITH (1978).

2.4 Datenstruktur

Bei der Modellierung von Bodenabtragsabschätzungen mit der AVErosions-Extension fliessen sechs Parameter in die Berechnung mit ein. Um aufzuzeigen, von wo die Daten stammen und in welcher Auflösung sie in die Auswertung gelangen, hat CHISHOLM (2008) eine Übersichtstabelle mit diesen Parametern zusammengestellt. Da diese Arbeit sich, vor allem im ersten Teil, stark an die Arbeit von CHISHOLM (2008) angliedert, wurde die untenstehende Tabelle (Tabelle 2.1) von ihm übernommen und mit den in dieser Arbeit verwendeten Daten ergänzt. Dies soll einen direkten Vergleich über den Unterschied der Ausgangsdaten der beiden Arbeiten ermöglichen.

Die grau markierten Daten des C-, K- und R-Faktors stammen bei CHISHOLM (2008), wie auch bei dieser Arbeit, von FRIEDLI (2006). Die grün markierten C- und K-Faktoren finden sich nur in dieser Arbeit. Dies sind die parzellenscharfen Informationen über die Bodenerodierbarkeit (K-Faktor) und den Bearbeitungs- und Bedeckungsfaktor (C-Faktor). Diese Daten wurden von PRASUHN (2008) zur Verfügung gestellt.
Die L-, S- und P-Faktoren werden bei beiden Arbeiten aus dem digitalen Höhenmodell, welches in die AVErosion-Extension eingespeist werden muss, berechnet. In der vorliegenden Arbeit werden zwei verschiedene digitale Höhenmodelle verwendet. Zur Verfügung standen ein auf 25x25m aufgelöstes digitales Höhenmodell (DHM 25 – swisstopo 2005), welches am CDE benutzt werden konnte und weiter ein auf 2x2m aufgelöstes DTM-AV (swisstopo 2005), welches an der ART in Zürich für die Arbeit bereitgestellt wurde.

USLE-Faktor	Datensatz	Typ	Auflösung	Quelle
R	Niederschlagskarten - Mittlere jährliche korr. Niederschläge - Extreme Punktregen	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 (100m)	BFS GEOSTAT (1992/97), FRIEDLI (2006)
C	Landwirtschaftliche Kulturen	Digital	Betrieb/Gemeinde	BFS GEOSTAT (2003), FRIEDLI (2006)
L/S/P	Topographie	Digital	Rasterdaten (25m) Rasterdaten (2m)	DHM25 (swisstopo) DTM-AV (swisstopo)
L/S/P	Parzellenpläne	Digital	Polygone	Amtliche Vermessung (AV) Bern
C	Bewirtschaftung der Parzellen	Digital	Parzellenscharf	PRASUHN (2008)
K	Laboranalysen, Fühlproben	Digital	Parzellenscharf	PRASUHN & GRÜNIG (2001)

Tabelle 2.1: Zusammenfassung der Verwendeten Daten für die Erosionsgefährdungsmodellierung mit AVErosion. Die grau hinterlegten Datensätze wurden bereits von FRIEDLI (2006) und CHISHOLM (2008) verwendet und werden unverändert übernommen. Die grün hinterlegten Daten sind zusätzliche Daten, welche von PRASUHN (2008) stammen. (Quelle: veränderte Darstellung nach CHISHOLM 2008 : 22)

3. MODELLIERUNG MIT AVEROSION 1.0

Das verwendete Programm AVErosion 1.0 ist eine Erweiterung für die GIS-Software ArcView 3.x und somit für die ältere Version der ESRI Software. Das Programm dient der Analyse der Bodenerosion nach den Modellen USLE und MUSLE87. Es können drei verschiedene Berechnungen gemacht werden. Zum einen die Bruttoerosion, bei welcher nur das abgetragene Bodenmaterial berechnet wird, zum andern eine Stoffbilanz (Nettoerosion), bei welcher die Akkumulation von Bodenmaterial und die Verkürzung von Hängen miteinbezogen wird. Weiter kann noch eine tolerierbare Nutzungsintensität berechnet werden, welche einen maximalen CP_{max}-Wert ausgibt. Das Programm wurde für die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) durch Dr. rer. nat. Holger Schäuble entwickelt. (SCHÄUBLE 2005)

In dieser Arbeit werden die erste und die dritte Berechnungsart verwendet. Die Bestimmung der Stoffbilanz findet hier keine Anwendung. Alle Berechnungen dieser Arbeit wurden nur mit dem Modelle MUSLE87 berechnet.

3.1 Berechnung der Bruttoerosion

Da CHISHOLM (2008) schon eine detaillierte Beschreibung des Programms liefert, wird man sich hier auf das Wesentlichste beschränken. Das Programm AVErosion läuft unter ArcView 3.x, da diese Software eine ältere Version der ESRI-Software darstellt und weniger benutzerfreundlich ist, als die neue Version, wurden alle Vor- und Nacharbeiten mit der Software ArcGIS 9.3 gemacht.

Um die Berechnungen der Bruttoerosion durchzuführen verlangt AVErosion fünf Eingabelayer im Rasterformat:

- Parzellenplan
- Digitales Höhenmodell (DHM)
- Raster mit den R-Faktordaten
- Raster mit den K-Faktordaten
- Raster mit den C-Faktordaten

Parzellenplan

Der Parzellenplan dient dazu, die Berechnungen auf einzelne Schläge aufgelöst zu präsentieren. Seine Grenzen setzen die Anfänge der Berechnung fest. Das heisst, No-Data Pixel im Parzellenplan werden z.B. bei der Berechnung der Einzugsgebietsgrösse (L-Faktor) als hydrologische Barrieren aufgenommen, und die Berechnung startet von dort aus neu. In den vorhandenen Parzellenplänen sind Strassen und Wege zwischen den Parzellen als No-Data Pixel ausgewiesen. Da im Gebiet Frienisberg ein COST-Projekt läuft, sind dort aktuelle Parzellenpläne vorhanden, welche von PRASUHN (2008) für diese Arbeit zur Verfügung gestellt wurden.

Digitales Höhenmodell

Das digitale Höhenmodell dient dazu, die Werte des S-, L- und P-Faktors zu berechnen und gibt mit seiner Auflösung auch die maximal erzielbare Auflösung der Berechnung vor. Das DHM bildet somit einen sehr wichtigen Teil für die Berechnung mit AVErosion. Es wird vor der Berechnung einer Prüfung unterzogen, ob es hydrologisch korrekt ist, also keine abflusslosen Senken beinhaltet. Falls dies zutreffen würde, korrigiert die Software die betroffenen Stellen, in dem es ein minimales Gefälle einsetzt. Diese Korrekturen sind wichtig, um die Fliesswege des Wassers optimal berechnen zu können.
Für die Arbeit wurden zwei verschiedene digitale Höhenmodelle benutzt, welche auch schon in der Arbeit von CHISHOLM (2008) verwendet wurden.

- **DHM25**: Dieses digitale Höhenmodell weist eine Auflösung von 25x25 m auf und wurde von Swisstopo aus den Höhenlinien der 1:25'000er Landeskarten generiert. Es weist einen mittleren Fehler von ± 1,5 m auf (vgl. CHISHOLM 2008:27).

- **DTM-AV**: Dieses digitale Höhenmodell weist eine Auflösung von 2x2 m auf und wurde von der Amtlichen Vermessung mittels Laserscans aus Überflügen mit Flugzeugen erstellt. Es bildet die nackte Oberfläche der Landschaft bis zu einer Höhe von 2000 m.ü.M ab und ist mit einem mittleren Fehler von ± 50 cm behaftet (swisstopo 2005), (vgl. CHISHOLM 2008:28).

Um die hohe Genauigkeit, die durch das DTM-AV entsteht, zu verdeutlichen, wird nachfolgend eine Gegenüberstellung von Ausschnitten zweier erarbeiteter Karten mit dem DHM25 und dem DTM-AV gezeigt. Vor allem in der zellgenauen Darstellung bieten die Daten des DTM-AV die Möglichkeit, Anrissgebiete oder mögliche Quellen- und Ausgangsgebiete von Erosionsprozessen zu lokalisieren und so gezielt Massnahmen zu planen und einzuleiten (siehe Abbildung 3.1).

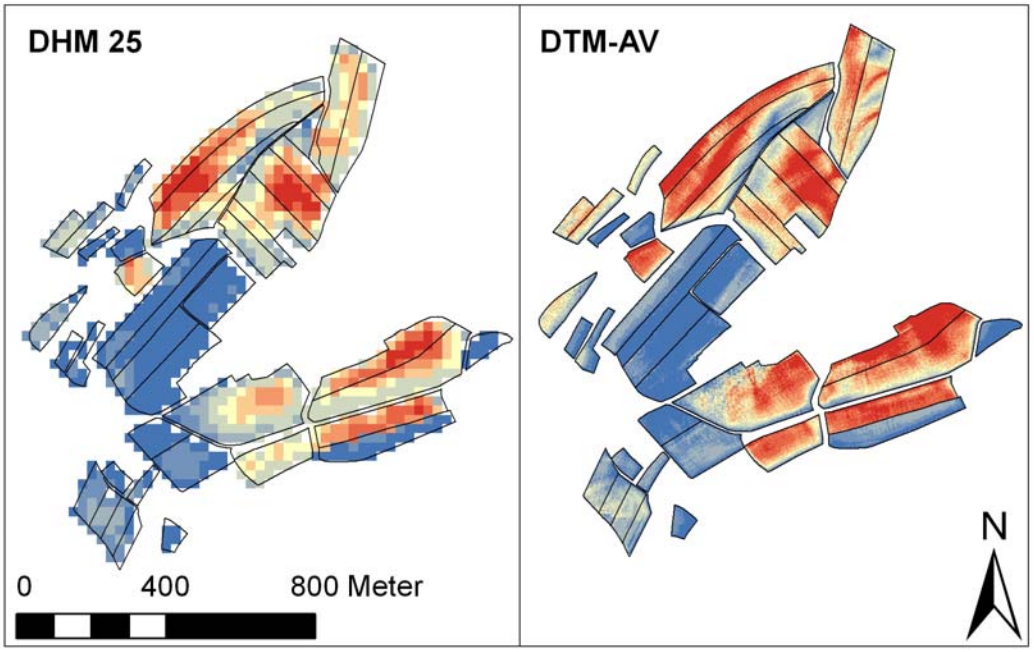


Abbildung 3.1: Gegenüberstellung der zwei verschiedenen Auflösungen. Die Abbildung zeigt die zellenbezogene Darstellung des Teilgebiets Frienisberg. Links mit dem DHM25 und einer Auflösung von 25x25m und rechts mit dem DTM-AV und einer Auflösung von 2x2m. (Quelle: eigene Darstellung)

Raster der R-, K- und C-Faktoren

Die Raster mit den R-, K- und C-Faktordaten werden als separate Raster eingefügt. Die massgebliche Grösse für die Auflösung bildet das digitale Höhenmodell. Die Rasterdatensätze dieser drei Faktoren werden auf dessen Auflösung umgerechnet. Es bringt also keinen zusätzlichen Nutzen, falls diese Faktoren höher aufgelöst sind als das verwendete DHM. Die Faktordaten können somit parzellenscharf oder auch gröber, z.B. gemeindeweise aufgelöst sein. Auf jeden Fall müssen sie als Rasterdatei vorliegen.

3.1.1 Vorarbeiten

Die Vorarbeiten wurden - wie erwähnt - mit der neueren GIS-Software durchgeführt. Hier mussten vor allem der Parzellenplan in einen Rasterdatensatz umgewandelt werden. Beim parzellenscharfen C-und K-Faktor mussten die Daten aus dem Polygondatensatz von PRASUHN (2008) extrahiert und ebenfalls in eine Rasterdatei umgewandelt werden.
Diese vorbereiteten Daten wurden dann in AVErosion geladen und weiterverarbeitet. Nachdem alle Datensätze geladen wurden und das DHM überprüft und korrigiert wurde, mussten alle fünf Raster auf eine einheitliche Grösse und Auflösung angepasst werden. Für diesen Vorgang steht in der Software ein Tool zur Verfügung. Dieses Tool passt alle Datensätze an einen ausgewählten Bereich an und übernimmt für alle eine einheitliche Auflösung. In dieser Arbeit war das die Auflösung des DHM, also 25x25 m oder 2x2 m. Nachdem die Daten dann soweit vorbereitet waren, konnte man die Raster im Programmfenster von AVErosion laden und die Berechnung starten.

3.1.2 Resultate

Als Resultat erhält man zwei Erosionsabschätzungskarten, einmal auf Pixelgrösse aufgelöst und einmal mit gemittelten Werten für jede Parzelle. Zusätzlich zu den Karten erhält man noch eine Tabelle, welche alle gemittelten Faktorwerte und zusätzliche Daten für jede Parzelle beinhaltet. Zusätzliche Daten sind z.B. kritische Hanglänge, λ-Wert und m-Wert. Der λ- und m-Wert werden für die Berechnung der Einzugsgebietsgrösse/Hanglänge (L-Faktor) benötigt (siehe Kapitel 3.3.4). Wenn man vor dem Start der Berechnung die Option „Zwischenschritte" markiert, erhält man zusätzlich noch Karten für die einzelnen berechneten Faktoren, also für S-, L- und P-Faktor und für die λ- und m-Werte. Mit diesen Daten wurden dann die Vergleiche mit den Resultaten von CHISHOLM (2008) gemacht.

Weitere Infos zur Berechnung der Bruttoerosion in AVErosion finden sich in CHISHOLM (2008 : 25ff.) und in SCHÄUBLE (2005).

3.2 CPmax-Szenarien

Das CPmax-Szenario gibt eine maximale Nutzungsintensität für einen vorher bestimmten tolerierbaren Bodenabtrag an. Das heisst, die Berechnung liefert die C-Werte, welche zulässig wären, um den angegebenen Schwellenwert nicht zu überschreiten. Das Szenario kann somit Grundlage für eine Massnahmenplanung mit Ziel der ökologischen Nachhaltigkeit auf Ackerböden sein. Auf diese Szenarien wird in Kapitel 6 ausführlicher eingegangen und die damit erzielten Resultate werden dort besprochen und analysiert.

3.2.1 Ausgangsdaten

Die Ausgangsdaten und deren Vorbereitung bei der Berechnung der CPmax-Szenarien sind bis auf eine Änderung exakt die gleichen wie bei der Bruttoerosion. Diese Änderung betrifft den Rasterdatensatz mit den C-Faktoren. Bei der Auswahl von CPmax-Szenarien im Analysefenster von AVErosion wechselt die Bezeichnung des C-Faktors in „Toleranz". Dort ist nicht mehr der C-Faktordatensatz einzufügen, sondern ein Schwellenwert. Dieser gibt den tolerierbaren Bodenabtrag in t/(ha*a) an, den der Benutzer in 0,5er Schritten selbst bestimmen kann. Wird beispielsweise „5" eingegeben, berechnet AVErosion die nötigen C-Faktorwerte, welche im Feld vorhanden sein müssten, um einen Abtrag von 5 t/(ha*a) nicht zu übersteigen.

3.2.2 Resultate

Als Resultat erhält der Benutzer analog zu den Ergebnissen bei der Bruttoerosion zwei Karten. Einerseits die Karte mit den CPmax-Werten aufgelöst auf Pixelgrösse und andererseits eine Karte mit den gemittelten CPmax-Werten für jede Parzelle. Zusätzlich können auch hier wieder die „Zwischenschritte“ ausgegeben werden, mit den gleichen Karten, wie bei der Berechnung der Bruttoerosion. Um die eigentlichen C-Faktoren zu erhalten, muss die ausgegebene Karte noch mit der P-Faktor Karte multipliziert werden, um den Effekt der Erosionsschutzmassnahmen zu berücksichtigen (vgl. SCHÄUBLE 2005).

3.3 Faktordaten

Für beide Analysen werden Rasterdatensätze einzelner Faktoren als Eingabedaten benötigt. Der L-, S- und P-Faktor, werden zusätzlich vom Programm berechnet. Um Aufschluss darüber zu geben, wie diese Faktoren zu Stande kommen, woher sie stammen und wie sie im Programm implementiert werden, sind nachfolgend die sechs Parameter der USLE/MUSLE87 erklärt. Die verschiedenen Faktordaten stammen einerseits aus der Arbeit von FRIEDLI (2006) und anderseits von PRASUHN & GRÜNIG (2001) und PRASUHN (2008).

3.3.1 Der R-Faktor – Erosive Kraft des Niederschlages [N*h^{-1}]

Der R-Faktor beziffert die Niederschlagserosivität und gibt somit die erosivwirksame Kraft des Niederschlags an. In Betracht genommen werden die Menge des Niederschlags und seine Intensität. Ursprünglich wurden von WISCHMEIER & SMITH (1978) die aufsummierte kinetische Energiedichte E (kJ/m^2) und die maximale 30-Minuten-Intensität beim R-Faktor eingerechnet (In: SCHWERTMANN et al. 1990). FRIEDLI (2006) verwendete hier eine abgeänderte Berechnung nach ROGLER & SCHWERTMANN (1981), um über die ganze Schweiz mittels einer Regressionsgerade den R-Faktor zu bestimmen. Um die Werte für die Berechnung von WISCHMEIER & SMITH (1978) zu generieren, wären sehr viele detaillierte Messungen notwendig gewesen.

Die Formel von ROGLER & SCHWERTMANN (1981), die durch FRIEDLI (2006) noch leicht modifiziert wurde, zieht aber die gleichen Werte in Betracht, wie dies bei WISCHMEIER & SMITH (1978) der Fall war. Der R-Faktor wird nach ROGLER & SCHWERTMANN (1981) über den mittleren jährlichen Niederschlag berechnet. Die Formel dazu lautet:

$R = 0.083 * N - 1.77$ (N= mittlerer jährlicher Niederschlag)

• *Schneeabminderung:*

Es hat sich herausgestellt, dass dieses Modell Schwächen aufweist, da es Einflussgrössen wie Hagel, Schnee u.a.m. nicht gebührend berücksichtigt. Deshalb hat FRIEDLI (2006) diese Grundgleichung noch mit zwei Ansätzen erweitert. Er führte einen Faktor ein, welcher den R-Faktor um den Schneeanteil des Niederschlags abmindert. Dies geschah anhand der spezifischen Höhenstufe des Gebietes.

Die Gleichung dazu lautet:

f(x) = 0.0264 * h – 2.0663 (h = Höhe über Meer [m])

Diese Schneeabminderung geht folgendermassen in die Grundgleichung ein:

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

R = Niederschlagserosivitätsfaktor
N = Niederschlagsmenge (mittl. jährl. Korr. Niederschlagshöhen)
h = Höhe über Meer [m]

Dieser eingebaute Teil zieht nun in Abhängigkeit der Höhe über Meer einen gewissen Betrag vom Niederschlag ab, der in Form von Schnee fällt, da Schnee beim auftreffen keine erosiven Kräfte entfaltet.

• *Extreme Punktniederschläge:*

Ein weiterer zusätzlicher Punkt von FRIEDLI (2006) ist der Einbezug von extremen Punktniederschlägen. Diese Extremereignisse haben starke Auswirkungen auf die Bodenerosion, da sie eine grosse kinetische Energie aufweisen. Dabei wurden stündliche Starkniederschläge mit einer Wiederkehrperiode von 2.33 Jahren aus dem hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES), aus dem auch schon die mittleren jährlichen Niederschlagsmengen genommen wurden, auf das Hektarraster berechnet. Diese Starkniederschläge wurden mit einem direkten Zuschlag bis zu 20% auf den R-Faktor wie folgt berücksichtigt:

Niederschlagsmenge	Zuschläge
12 bis 13 mm	Keine Zuschläge [Faktor: 1]
14 bis 40 mm	Zuschlag linear von 0 – 20% [Faktor: [(Wert-13) * (0.2/27)] + 1]
Ab 40 mm	Konstanter Zuschlag von 20% [Faktor: 1.2]

Tabelle 3.1: Zuschläge auf den R-Faktor auf Basis von stündlichen extremen Punktniederschlägen mit einer Wiederkehrperiode von 2.33 Jahren (HADES), (Quelle: FRIEDLI 2006 : 30).

Diese Berechnungen wurden von FRIEDLI (2006) für ein flächendeckendes Hektarraster über die ganze Schweiz gemacht (Abbildung 3.2). Diese Daten wurden sowohl von CHISHOLM (2008), wie auch in dieser Arbeit, direkt übernommen.

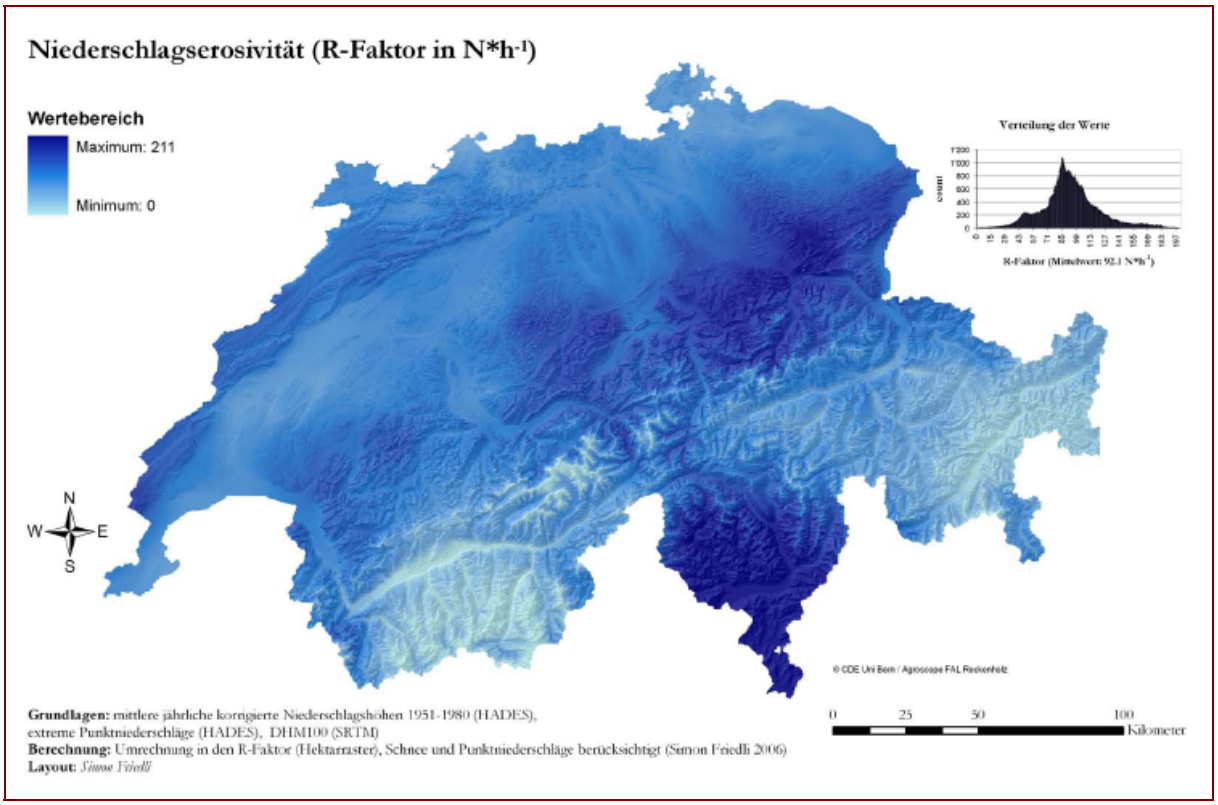


Abbildung 3.2: Der R-Faktor im Hektarraster über die ganze Schweiz, (Quelle: FRIEDLI 2006).

3.3.2 K-Faktor – Bodenerodierbarkeitsfaktor [kg*h*N^{-1}*m^{-2}]

Der K-Faktor beschreibt die Erodierbarkeit bzw. die Erosionsanfälligkeit des Bodens (PRASUHN & GRÜNIG 2001). Diese hängt nach WISCHMEIER & SMITH (1978) von fünf Faktoren ab:

- % Schluff und Feinstsand (0.002 – 0.1 mm)
- % Sand abzüglich Feinstsand (0.1 mm)
- % organischer Substanz (OS)
- Aggregatsklasse (A)
- Durchlässigkeitsklasse (D)

• *Gemittelter K-Faktor nach FRIEDLI (2006)*

Da die oben aufgelisteten Bodeneigenschaften nur mittels genauerer Laboranalysen erhoben werden können teilte FRIEDLI (2006) verschiedene Bodentypen mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften in K-Faktor-Klassen ein. Als Grundlage diente ihm die digitale Bodeneignungskarte 1:200'000 (BFS 2000) und Körnungsangaben aus ergänzend verfügbaren Bodenkarten 1:25'000 (PEYER). Die 13 verwendeten Bodenkarten stammten vor allem aus dem Schweizer Mittelland, womit für dieses Gebiet recht detaillierte Angaben für die Abschätzung zur Verfügung standen. FRIEDLI (2006) nahm nun für die verschiedenen Gebiete die Attributtabelle der digitalen Bodeneignungskarte in Anspruch und entnahm daraus Informationen zu „Formelement der Landschaft", „Skelettgehalt" und „Wasserdurchlässigkeit". Diese Attribute wurden dann noch mit den Angaben zur Textur aus den Bodenkarten 1:25'000 ergänzt. Diese Texturangaben waren T (Ton), L (Lehm), sL (sandiger Lehm) und lU (lehmiger Schluff), die dann den Bodentypen zugeordnet wurden. Aus diesen Angaben teilte FRIEDLI die verschiedenen Typen in fünf K-Faktor Klassen ein. Die Klassen bezeichneten die Bodenerodierbarkeit von 1 (sehr gering) bis 5 (sehr hoch). In die erste Klasse gelangten vor allem Böden mit den Attributen „extrem skelettreich und/oder übermässig durchlässig", dagegen wurden sehr schluffreiche Böden der Klasse 4 bis 5 zugeteilt, sandiger Lehm bis Lehm der Klasse 3 und toniger Lehm bis Ton der Klasse 2. Die Einteilungen in Klasse 2 und 3 basierten vor allem auf den Texturangaben aus den Bodenkarten.
Schliesslich erhielt FRIEDLI eine Karte, welche die K-Faktoren für die ganze Schweiz zeigt und zwar aufgeteilt in die 5 Klassen (Abbildung 3.3). Diesen wurde dann ein spezifischer K-Faktorwert zugeteilt, der sich von 0.15 (für Klasse 1) bis 0.55 (für Klasse 5) erstreckte (siehe Tabelle 3.2). Mit dieser Einteilung liegen im Untersuchungsgebiet Frienisberg fast ausschliesslich Werte der Klasse 3 vor. Der K-Faktor beträgt dort also vorwiegend 0.35.

Qualitative Angabe	Quantitative Angabe	Mittelwert (entspricht dem verwendeten K-Faktor)
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

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: 36).

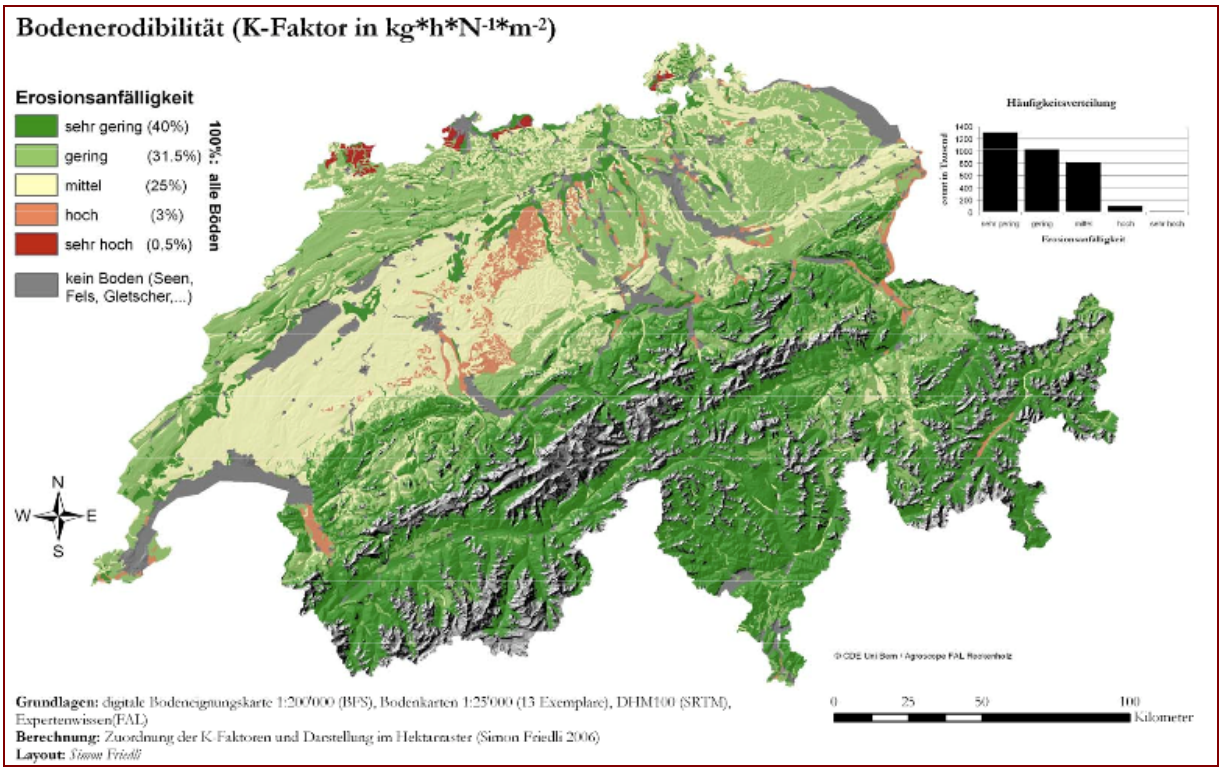


Abbildung 3.3: K-Faktor für die Schweiz. (Quelle: FRIEDLI 2006).

• *Parzellenscharfe K-Faktoren (aus PRASUHN & GRÜNIG 2001)*

Die Angaben zum parzellenscharfen Bodenerodierbarkeitsfaktor (K-Faktor) wurden hier aus den obengenannten Eigenschaften (Schluff und Feinstsand, Sand, organisches Material, Aggregatsklasse und Durchlässigkeitsklasse) ermittelt. Im Gebiet Frienisberg gab es 1987 ein nationales Forschungsprojekt (NFP), wo auf verschiedenen Parzellen in den einzelnen Teilgebieten Feldkästen aufgestellt wurden. Aus diesen Feldkästen, 9 in Suberg und je 2 in Frienisberg und Lobsingen, konnten detaillierte Angaben zu Korngrösse, organischer Substanz und Skelettgehalt gewonnen werden (vgl. ROHR 1999). Zusätzlich gab es in der Umgebung noch 28 weitere Analysen, die zur Absicherung der Resultate herbeigezogen wurden. Weiter gab auch eine Bodenkarte im Massstab 1:10'000 (FAP 1979) im Teilgebiet Suberg noch weitere Aufschlüsse über die Körnung und im Gebiet Schwanden wurden zwei Bodenprofile aus BODE (1989) verwendet. Zusätzlich gab es bei fast allen Landwirten Angaben über die Bodenart aus Bodenanalysen, welche bei Nährstoffanalysen erstellt werden. Diese detaillierten Angaben wurden mittels Fühlproben auf den Parzellen noch weiter ergänzt und daraus folgte dann die Berechnung der K-Faktoren. Auf eine Laboranalyse jeder einzelnen Parzelle wurde verzichtet, da angenommen wurde, dass die Bodeneigenschaften sich seit 1989 nicht wesentlich verändert haben. Für die Aggregatsklasse und die Durchlässigkeit wurden deshalb auch die gleichen Werte wie bei MOSIMANN et al. (1990) verwendet (Aggregatsklasse 2,5; Durchlässigkeitsklasse 4). Die Berechnung des K-Faktors geschah mittels nachstehender Formel.
(vgl. PRASUHN & GRÜNIG 2001)

• *K-Faktor:*

$$K = 2.77 \times 10^{-6} \times M^{1.14} \times (12 - OS) + 0.043 \times (A - 2) + 0.033 \times (4 - D)$$

Mit:

M = (% Schluff + Feinstsand) * (% Schluff + % Sand)
OS = % organischer Substanz; für OS > 4 %, 4 einsetzen
A = Aggregatsklasse
D = Durchlässigkeitsklasse

Der errechnete Wert wird je nach Steinbedeckung der Parzelle um einen bestimmten Wert verringert. Dies geschieht anhand eines K-Faktor-Nomogramms. Weitere Informationen dazu und zur Formel finden sich in SCHWERTMANN et al. (1990). Nachfolgend findet sich eine Darstellung der parzellenscharfen K-Faktoren aus dem Gebiet Frienisberg (siehe Abbildung 3.4).

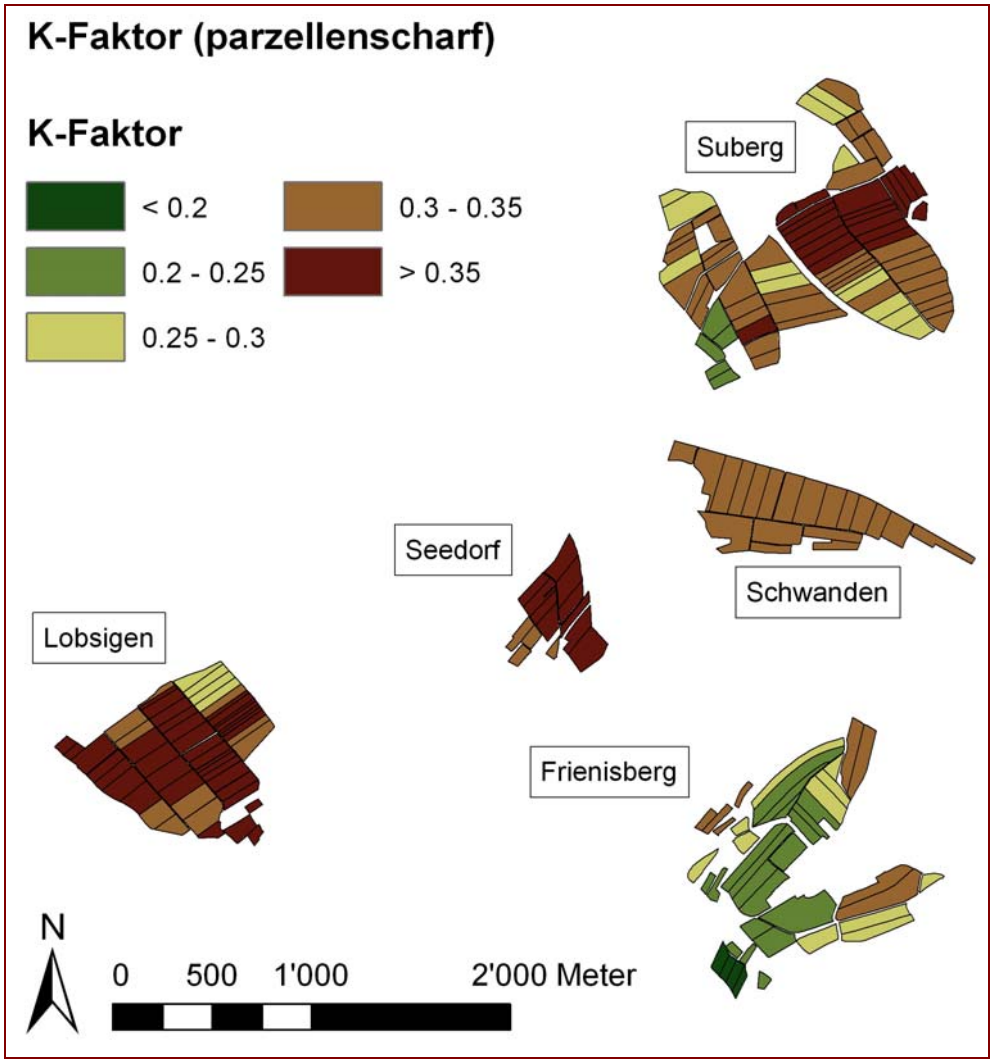


Abbildung 3.4: Parzellenscharfe K-Faktoren im Gebiet Frienisberg. (Quelle: PRASUHN & GRÜNIG 2001, eigene Darstellung)

3.3.3 C-Faktor– Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor [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 ist sehr komplex aufgebaut und wird meist für Fruchtfolgen angegeben, die aus den kulturspezifischen C-Faktoren zusammengesetzt sind. Er zieht einerseits die relativen Bodenabtragswerte (RBA) mit ein, welche das obengenannte Verhältnis zu den verschiedenen Entwicklungsstadien (Werdegang der Pflanze von Aussaat bis Ernte (FRIEDLI 2006)) der Kultur angeben. Zum anderen wird auch die jährliche Verteilung der erosiven Niederschläge in Betracht gezogen. Ein schlecht vor Erosion geschütztes Feld stellt noch kein Problem dar, wenn nicht zur gleichen Zeit auch erosivwirksame Niederschläge fallen. So kommen die Niederschläge zweimal in die ABAG. Einmal als R-Faktor und ein zweites Mal als jährliche Niederschlagsverteilung im C-Faktor (vergleiche dazu SCHWERTMANN et al. 1990).

Die angebaute Kultur und die Bearbeitungsmethode wirken sehr differenziert auf die Erosion ein. Einerseits schützt eine angebaute Kultur, je nach Art und Entwicklungsstadium, die Bodenaggregate mehr oder weniger gut vor den eintreffenden Regentropfen und der Planschwirkung („Splash-Effekt“). Zusätzlich stabilisieren die Wurzeln der Pflanze auch noch das Bodengefüge (FELDWISCH et al. 2006). Andererseits wirken die Pflanzen mit den zurückgelassenen Ernterückständen (Mulch) auch nach der Entnahme vom Feld noch schützend für den Boden. Dies hängt von der angewandten Bewirtschaftungsmethode ab, z.B. verbleiben bei der Mulchsaat die Erntereste bis über die Ansaat der Folgekultur hinaus auf dem Feld liegen, während sie beim traditionellen Pflugverfahren in den Boden eingearbeitet werden und so an Schutzwirkung verlieren. Die Bearbeitungsmethode ist auch für die Änderung der Bodenerodibilität verantwortlich. All diese Eigenschaften finden schliesslich über den C-Faktor den Weg in die ABAG und wirken sich dort positiv oder negativ auf den Bodenabtrag aus.

In dieser Arbeit wurden zwei verschiedene C-Faktoren verwendet, welche auf unterschiedliche Weise ermittelt wurden. Zum Einen sind dies die C-Faktordaten von FRIEDLI (2006), welche auch CHISHOLM (2008) verwendet hat. Diese Daten sind auf Gemeindeniveau erhoben worden. Zum Anderen sind dies parzellenscharfe C-Faktorwerte von PRASUHN (2008), welche auf Befragungen der einzelnen Landwirte beruhen. Diese Daten liefern für jede einzelne Parzelle im Untersuchungsgebiet einen spezifischen C-Faktorwert. Im Folgenden werden die zwei Ansätze kurz erläutert.

• *Gemittelter C-Faktor nach FRIEDLI (2006)*

FRIEDLI (2006), der Erosionsabschätzungen über die ganze Schweiz gemacht hat, konnte die C-Faktoren nicht für jede einzelne Region oder gar für jeden einzelnen Hof berechnen, da dies viel zu aufwendig gewesen wäre. Deshalb hat er ein Verfahren gebraucht, das kulturspezifische C-Faktoren für das Schweizer Mittelland verwendet. Diese stammen aus den Arbeiten von PRASUHN & GRÜNIG (2001), PRASUHN & MOHNI (2003) und RÜTTIMANN (2005, unveröffentlicht), welche solche kulturspezifischen C-Faktoren berechneten. Gemäss SCHWERTMANN et al. (1990) wurden bei diesen Berechnungen die Entwicklungsstadien von Saat bis Ernte berücksichtigt. Dieses Verfahren bezieht sowohl die Bodenbearbeitungsmethoden wie auch die jährliche Verteilung der erosivwirksamen Niederschläge mit ein (FRIEDLI 2006). Nachfolgend findet sich eine Tabelle, in der diese kulturspezifischen C-Faktoren mit entsprechenden Bracheanteilen bei Verwendung der einzelnen Kulturen aufgelistet sind (Tabelle 3.3). Für jede Gemeinde wurden die prozentualen Kulturanteile, wieviel Mais, Kartoffeln, Getreide usw. angepflanzt wurde, aus der Betriebszählung 2002/03/04 (BFS 2002/03/04) übernommen. Diese Anteile wurden über ein additives Verfahren mit den Werten der kulturspezifischen C-Faktoren verrechnet. So erhielt jede Gemeinde einen C-Faktor zugewiesen, welcher dem durchschnittlichen Wert der dort angepflanzten Kulturen entsprechen sollte. Bei der Berechnung wurde nur das konventionelle Pflugverfahren berücksichtigt. Da das Untersuchungsgebiet sich fast ausschliesslich in einer Gemeinde befindet, weisen die C-Faktoren, vorwiegend die gleichen Werte auf (vgl. CHISHOLM 2008). Eine Übersicht über die C-Faktoren von FRIEDLI (2006) findet sich in der Abbildung 3.4.

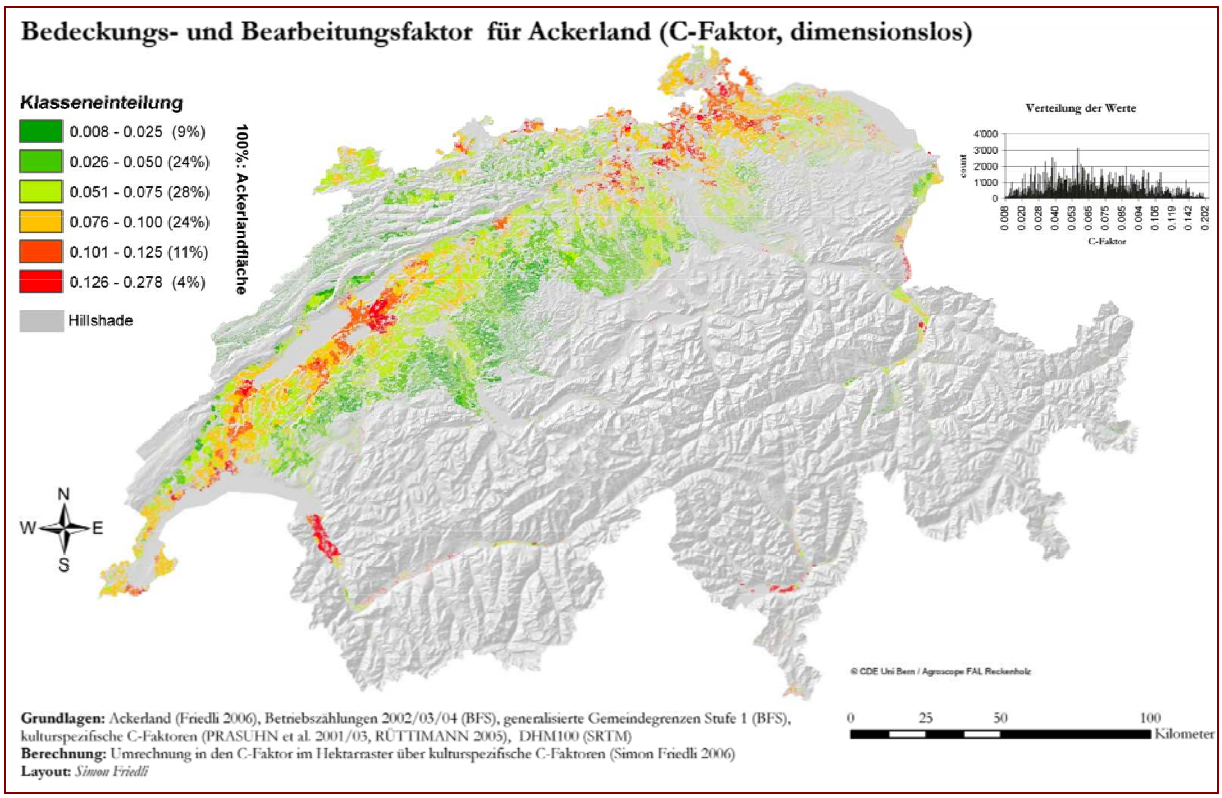


Abbildung 3.4: C-Faktoren für das Schweizer Ackerland (Quelle: FRIEDLI 2006).

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 Kunstwiese vor (daher nur 3% Flächenanteil Brache); nach RUETTIMANN 2005 (unveröffentlicht)
0.245	Gemüse	30	Berechnung für Frienisberg ergibt einen C-Faktor von 0.245, da gemeindeweise Berechnung, Hanglage nicht berücksichtigt (PRASUHN & GRÜNIG 2001)
0.137	Rüben, resti. 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	Buntbrache	0	PRASUHN & GRÜNIG 2001
0.100	Rotationsbrache	0	PRASUHN & GRÜNIG 2001
0.060	Raps	3	PRASUHN & GRÜNIG 2001
0.008	Kunstwiese	0	Annahme: die Kunstweisen sind meist dreijährig, teilweise zweijährig, daher Berechnung des durchschnittlichen C-Faktors über zweieinhalb Jahre

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

• Parzellenscharfe C-Faktoren

Die parzellenscharfen C-Faktoren wurden von PRASUHN (2008) berechnet und zur Verfügung gestellt. Bei Befragungen aller Landwirte im Gebiet Frienisberg wurden die genauen Fruchtfolgen der letzten 8-10 Jahre erhoben. Das heisst, es war bekannt was jeder Landwirt auf seinen Parzellen für Kulturen und Zwischenkulturen anbaute, mit welcher Anbaumethode er dies tat und zu welchen Zeitpunkten die Zwischenkulturen gesät wurden. Diese Informationen wurden im Programm „Bodenerosion selber abschätzen – Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater“ von MOSIMANN TH. & RÜTTIMANN M. (1999, 2002) zur Berechnung des C-Faktors eingesetzt. Bei diesem Programm handelt es sich um eine Software, mit welcher Betriebsleiter unter Angabe verschiedener Informationen zu einer Parzelle die Erosionsgefährdungsstufe abschätzen können. Es müssen Angaben zur Hangneigung, Region in der sich die Parzelle befindet, Fliesstrecke, Bodenart, Bodenbedeckung mit Steinen usw. gemacht werden. In einem weiteren Schritt wird dann nach der Angabe der Kulturen und Zwischenkulturen der letzten 10 Jahre und den Bodenbearbeitungsmethoden ein C-Faktor berechnet, welcher zwischen 0 und 4 liegt. Um den C-Faktor für die allgemeine Bodenabtragsgleichung zu erhalten, muss dieser Wert durch 10 geteilt werden.
Die gesammelten Daten aus dem Gebiet Frienisberg wurden für jede der 204 Parzellen in dieses Programm eingespiessen und so wurde der Bodenenbedeckungs- und Bearbeitungsfaktor (C-Faktor) berechnet. Bei dieser Berechnung wurden nach Angaben der Autoren folgende Effekte berücksichtigt:

- Intensität der Bodenbearbeitung (4 Typen)
- Einfluss der Zwischenperiode, unterschieden nach Typ, Bodenbearbeitung und Zeitpunkt des Beginns.
- Erosionsmindernder Effekt mehrjähriger Kunstwiesen auf die Hauptkulturen der beiden Folgejahre.
- Erosionsverstärkender Effekt von Wurzelfrüchten auf die Folgekulturen Getreide und Raps.
- Erosionsverstärkender Effekt spät räumender Vorkulturen (Körnermais, Zucker- oder Futterrüben) auf die Folgekultur Winterweizen.
- Unterschiedliches Erosionsrisiko bei mehrjährigen Ackerkulturen (z.B. Chinaschilf, Buntbrachen, mehrjährige Kunstwiesen) im ersten Jahr und in den Folgejahren.
  (MOSIMANN & RÜTTIMANN 1999, 2002)

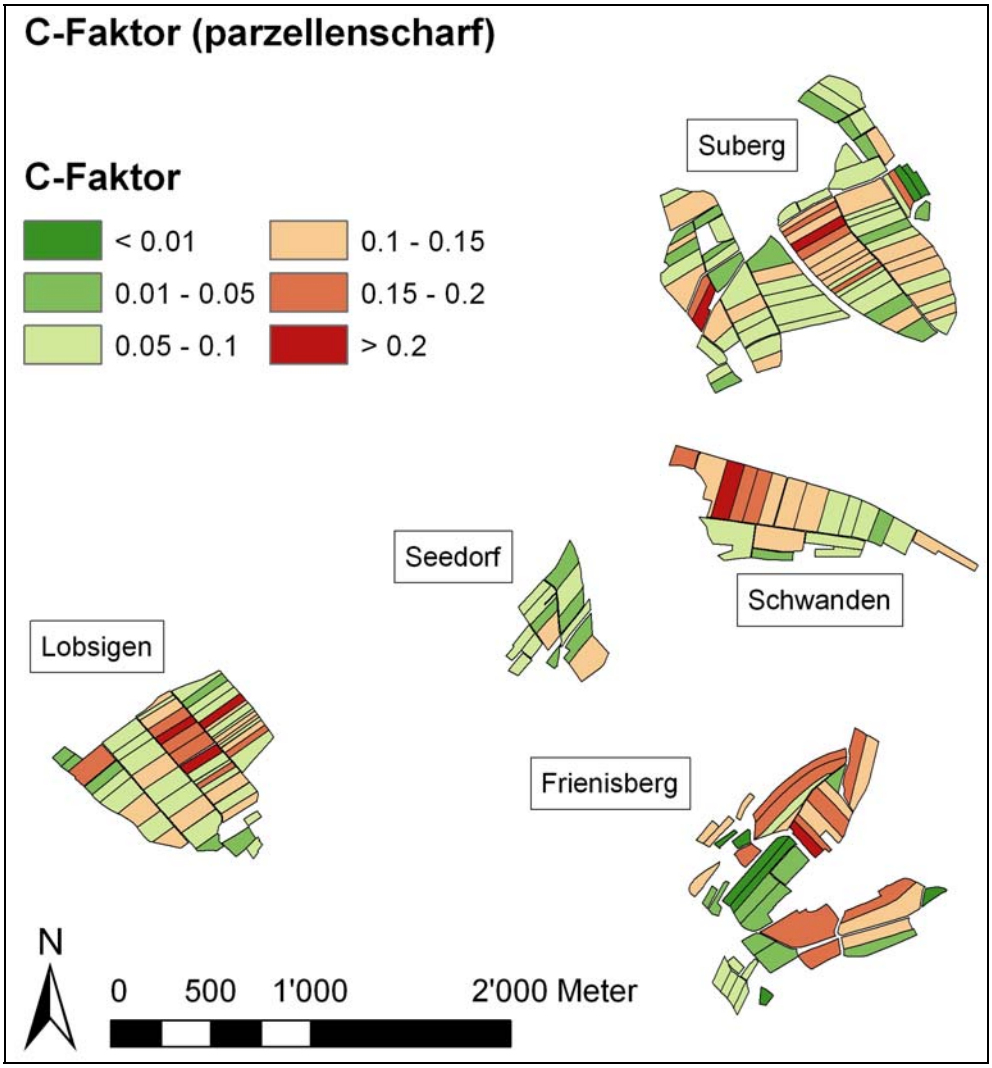


Abbildung 3.5: Parzellenscharfe C-Faktoren im Gebiet Frienisberg. (Quelle: PRASUHN & GRÜNIG 2001, eigene Darstellung).

Diese Berechnungen sind gültig für Ackerbaugebiete des zentralen Mittellandes. Es existieren mittlerweile verschiedene abgeänderte Versionen für andere Regionen der Schweiz. Die Verhältnisse der erosivwirksamen Niederschläge und deren Verteilung finden somit direkt Einhalt in den Werten für die einzelnen Kulturen und werden nicht separat aufgelistet.
Die erhaltenen Resultate für jede der 204 Parzellen bildete nun die Grundlage für die parzellenscharfen C-Faktoren (vgl. Abbildung 3.5). Hier wurden im Gegensatz zur Variante von FRIEDLI (2006) und CHISHOLM (2008) keine gemittelten C-Faktoren für ganze Gemeinden verwendet, sondern es standen individuelle C-Faktoren für jede einzelne Parzelle zur Verfügung. Ein Beispiel für eine solche Berechnung mit dem C-Faktortool von MOSIMANN & RÜTTIMANN (2002) findet sich nachfolgend in Abbildung 3.6.

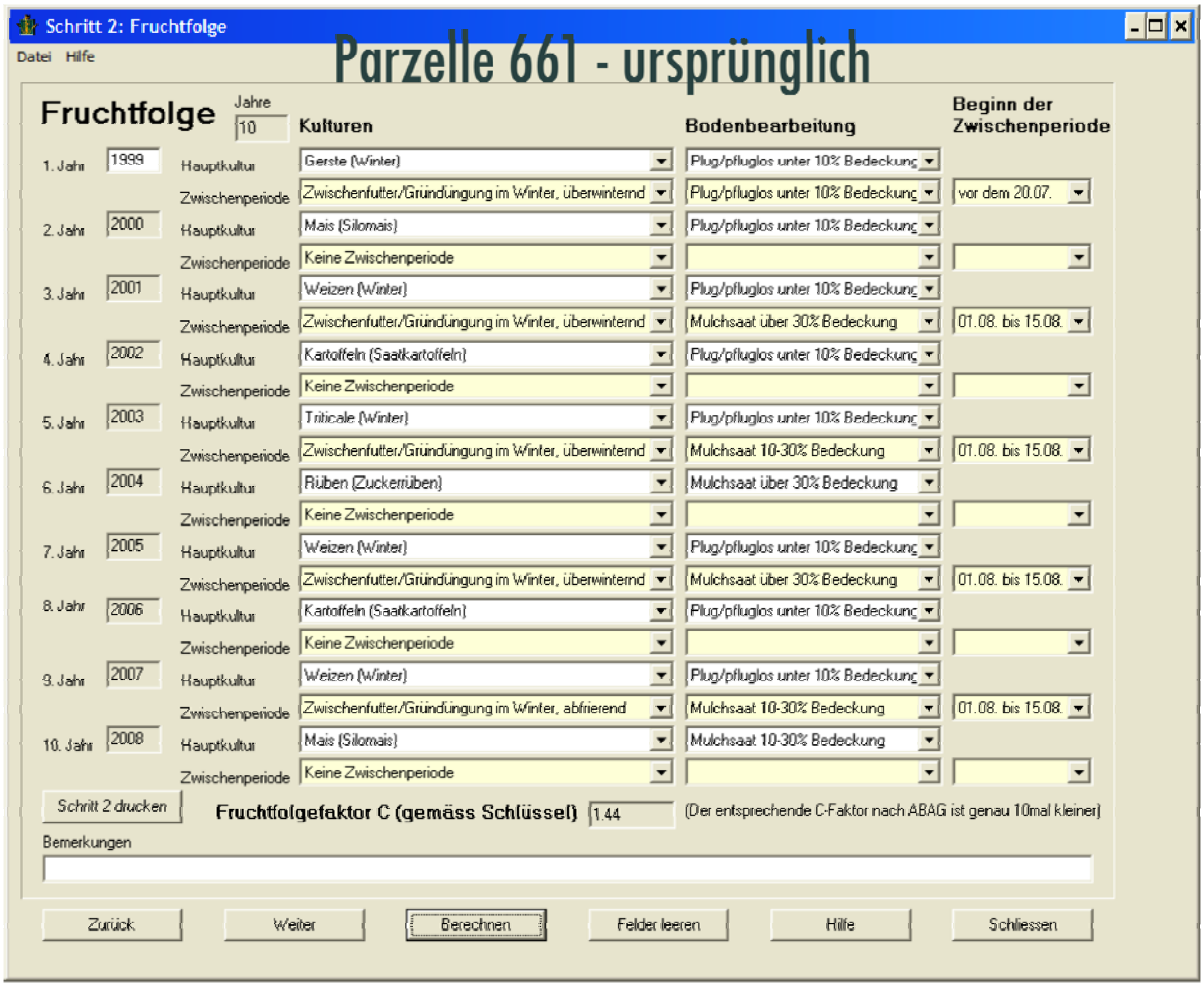


Abbildung 3.6: Berechnung des C-Faktors im Programm Erosion CH V2.02. Eingaben von Hauptkultur, Zwischenperiode, Bodenbearbeitung und Zeitpunkt des Beginns der Zwischenperiode sind notwendig. Der Fruchtfolgefaktor C muss für die allgemeine Bodenabtragsgleichung noch durch 10 dividiert werden. (Quelle: MOSIMANN & RÜTTIMANN 2002).

3.3.4 Der L-Faktor – Einzugsgebietsgrösse [dimensionslos]

Der L-Faktor bezeichnet die erosive Hanglänge (USLE) resp. die Grösse des Einzuggebietes (MUSLE87). Damit ist die Fliesstrecke des Wassers bis zu jenem Punkt, an dem man den L-Faktor bestimmen möchte, gemeint. Generell bezeichnet der Faktor die Strecke zwischen dem Auftreten von Oberflächenwasser bis zu dem Punkt, an dem die Sedimentation beginnt (CHISHOLM 2008). Der L-Faktor gibt zusammen mit dem S-Faktor die Eigenschaften des Reliefs wieder. Bei AVErosion werden diese beiden Faktoren direkt aus dem DHM berechnet. Es gibt Unterschiede bei der Berechnung des L-Faktors bei den zwei verschiedenen Modellen, der USLE und der MUSLE87. Diese wurden bereits im Kapitel 2.3.2 erläutert und werden deshalb hier nicht mehr erwähnt. Die Berechnung des L-Faktors sieht auf der Grundlage der Formel von RENARD et al. (1997) folgendermassen aus:

• L-Faktor:

$\beta = (\sin(\Theta)/ 0.0896) / (3*\sin(\Theta)^{0.8} + 0.56)$ (β –Wert zur Berechnung von m)

$m = \beta/(1+ \beta)$ (m-Wert)

$L_{fac} = (\lambda_i^{m+1} - \lambda_{i-1}^{m+1}) / (\lambda_i - \lambda_{i-1}) * 22.13^m$ (L-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 in m (=USLE)
oder
Grösse des Einzugsgebietes in Zahl der akkumulierten
Zellen * Zellengrösse in m (=MUSLE87)

3.3.5 Der S-Faktor – Hangneigungsfaktor [dimensionslos]

Der S-Faktor gibt die Hangneigung und ihre Wirkung auf die Erosion an. Dieser Faktor wirkt sich sehr stark auf die Erosion aus und ist im Vergleich zum L-Faktor überproportional. Eine Verdoppelung der Hangneigung führt im Schnitt zu einer 2,9-fach höheren Änderung der Erosion, als eine Verdoppelung der Fliesstrecke (MOSIMANN 2003). Die Formel hat zwei Ansätze, einen für Gebiete bis 9% Steigung und eine für Steigungen über 9%. Die Grenze von 9% entspricht einem S-Faktor von 1. Ab dieser Grenze steigt der S-Faktor bei gleichem Zuwachs der Hangneigung nicht mehr so stark an wie zuvor (siehe Diagramm 3.1). Die verwendete Formel in AVErosion bezieht sich wiederum auf die Berechnungen von RENARD et al. (1997) und sieht folgendermassen aus:

• S-Faktor:

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

$S_{steil} = 16.8 * \sin\Theta - 0.5$ S-Wert für Neigungen ≥ 9% (bzw. ab 5.14°)

Mit:

Θ = Hangneigung in Grad [°]

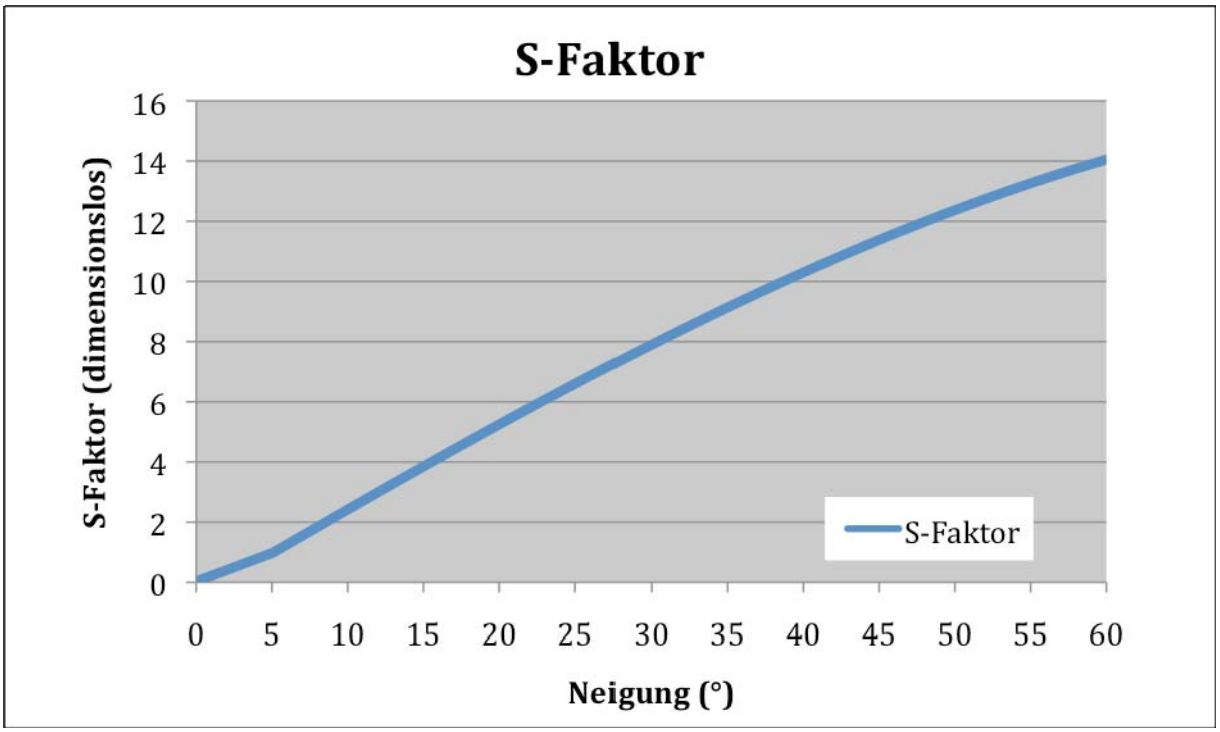


Diagramm 3.1: Verhalten des S-Faktors in Bezug zur Hangneigung. Aufgrund der Berechnung mit Sinus nimmt der S-Faktor nicht linear mit der Neigung zu. Die Zunahme des S-Faktors schwächt sich mit zunehmender Neigung leicht ab. (Quelle: eigene Darstellung nach CHISHOLM 2008 : 41).

3.3.6 Der P-Faktor – Schutzmassnahmen [dimensionslos]

Der P-Faktor gibt das Verhältnis von einem Feld mit getroffenen Schutzmassnahmen gegenüber einem Feld mit fehlenden Schutzmassnahmen an, welches in Richtung des Gefälles gepflügt wird (WISCHMEIER & SMITH 1978). In der Beschreibung der USLE von WISCHMEIER & SMITH (1978) wird der Faktor als „Support Practice Factor" bezeichnet. Gemeint sind damit Praktiken, welche die Fliesseigenschaften des Wassers beeinflussen und zu einer Reduktion des Bodenabtrags beitragen. Dazu zählen vordergründig das Konturpflügen, Streifensaat und Terrassensysteme. Weitere Techniken werden hier dazu gezählt, wie z.B. Filterstreifen, Hecken oder Obstbäume entlang den Konturen (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, USDA).
Schützende Bearbeitungsmassnahmen wie Mulchsaat oder Direktsaat, welche mit liegengebliebenen Ernterückständen der erosiven Wirkung des Niederschlags entgegenwirken, werden wegen ihrer engen Beziehung zu den Kulturen und zur Bearbeitungsmethode beim C-Faktor eingerechnet (WISCHMEIER & SMITH 1978).

Im Programm AVErosion wird der P-Faktor aus dem digitalen Höhenmodell und dem Parzellenplan berechnet; die Hangneigung und die Hanglänge werden dabei miteinbezogen. Bei dieser Berechnung wird nur der Effekt des Konturpflügens berücksichtigt. Der P-Faktor zeigt hier den Effekt, welcher durch das Konturpflügen (Pflügen entlang der Höhenlinien) erzielt werden kann und gibt das Verhältnis an, um wieviel sich der Bodenabtrag bei dieser Technik verringert. Grundsätzlich kann der P-Faktor zwischen 0 und 1 liegen (CHISHOLM 2008). Die Formel zur Berechnung des P-Faktors nach SCHÄUBLE (2005):

• P-Faktor:

P_{vorl} = 0.4 + 0.02 * Neigung (%) (vorläufiger P-Faktor)

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

HL_{krit} = $170 * e^{-0.13*Neigung(\%)}$ (kritische Hanglänge)

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

Der P-Faktor ist hier also immer mindestens 0.4 und das Maximum ist 1. Der P-Faktor hängt von der Hanglänge (HL_{real}) und der Hangneigung in % ab. Dies gibt eine weitere Beschränkung, denn ab 30% Hangneigung ist $P_{vorl} \geq 1$ und hat somit das Maximum erreicht. Das heisst, alle Hänge mit einer Neigung über 30% bekommen ungeachtet ihrer Länge den Wert 1. Die nachstehenden Diagramme verdeutlichen diese Zusammenhänge grafisch (siehe Diagramme 3.2 und 3.3).

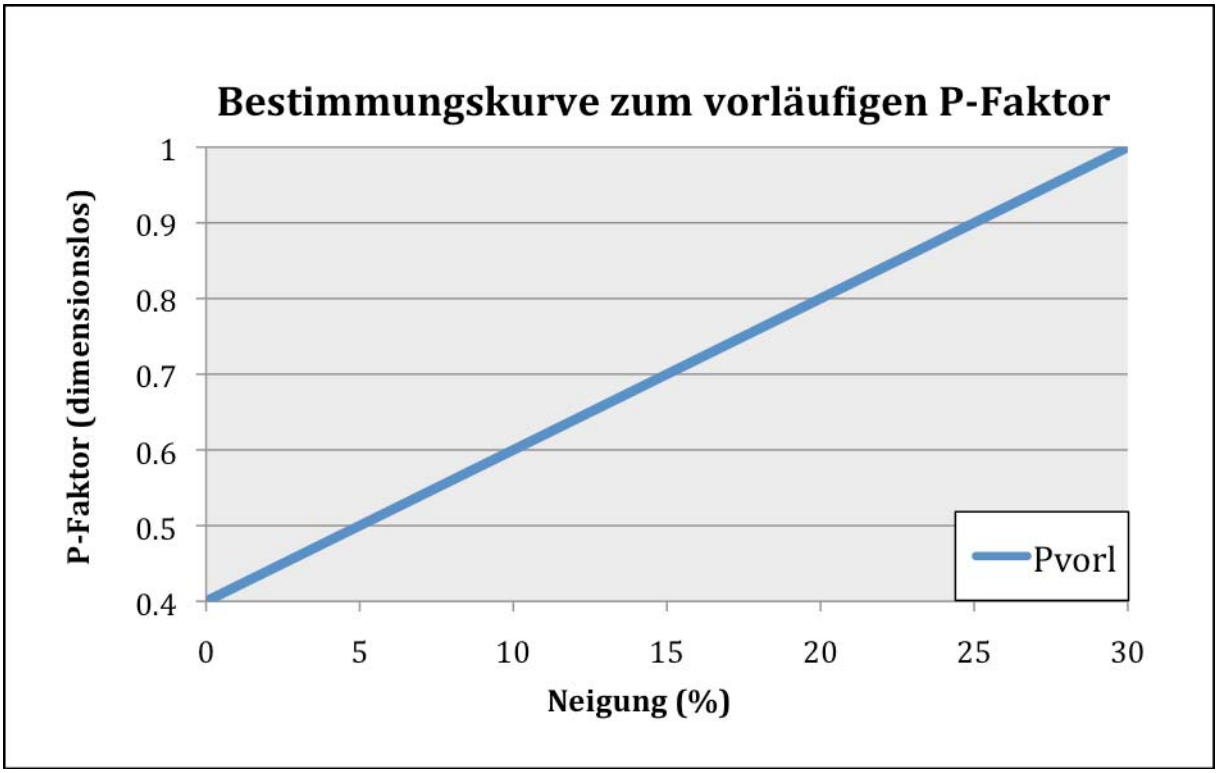


Diagramm 3.2: P_{vorl} in Bezug zur Hangneigung (Quelle: eigene Darstellung nach CHISHOLM 2008 : 42).

Konturpflügen kann die Erosion massgeblich reduzieren. Dabei kommt es auf die Hangneigung, die Hanglänge und auf die Abstände zwischen den einzelnen Pflugfurchen an. Mit dieser Technik sind nach MOSIMANN (2003) Verringerungen bis zu 40% des Bodenabtrags möglich. Bei seinen Untersuchungen im Kanton Basel-Landschaft stellte er aber fest, dass oft nicht direkt entlang der Konturlinien gepflügt wird, sondern senkrecht zur Lage der Parzelle. Bei einem schräg zu den Höhenlinien angesetzten Pflügen verringert sich der Schutzeffekt markant. Jedoch ist es nach MOSIMANN (2003) auch nicht das Ziel des Erosionsschutzes 100% Konturpflügen zu erreichen, wichtiger scheint hier, dass Muldenformen durch die Pflugrichtung nicht noch begünstigt werden.

Damit der positive Effekt des Konturpflügens aber überhaupt zum tragen kommt und über den P-Faktor im Modell berücksichtigt wird, darf eine vorgegebene kritische Hanglänge HL_{krit} nicht überschritten werden (siehe Formel nach SCHÄUBLE 2005 weiter oben). Die Abhängigkeit zwischen Hangneigung und kritischer Hanglänge wird im nachstehenden Diagramm verdeutlicht.

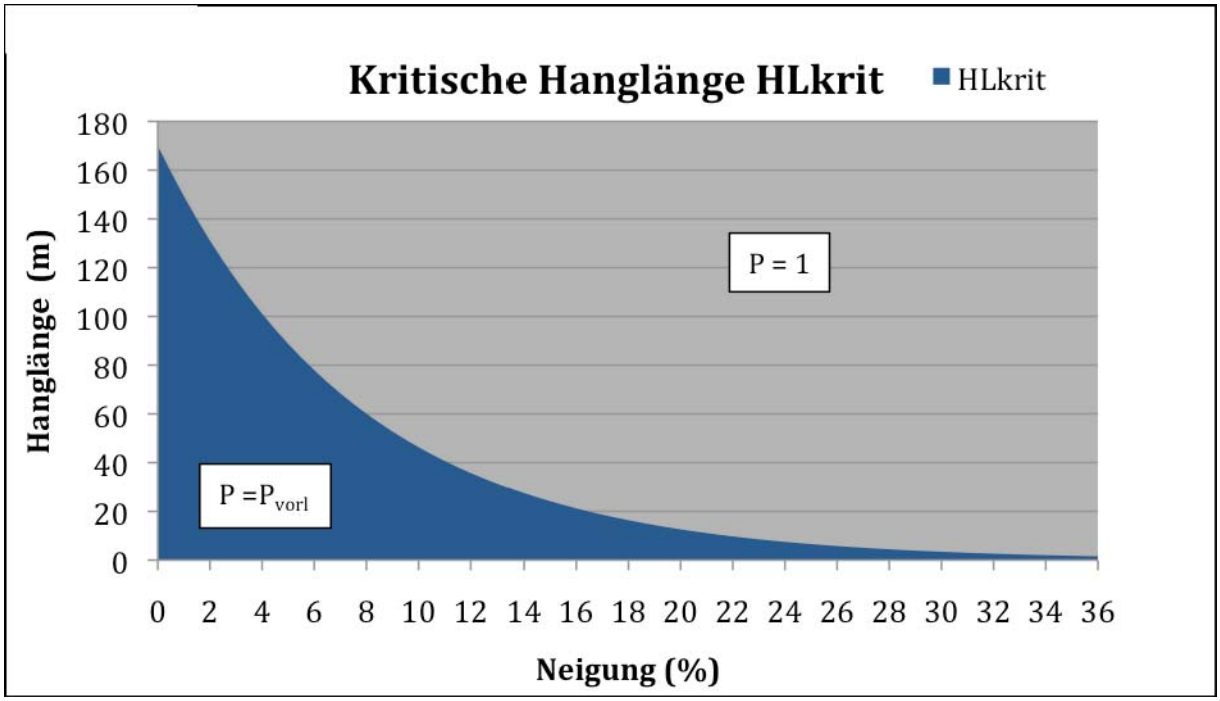


Diagramm 3.3: Kritische Hanglänge in Bezug zur prozentualen Hangneigung. Ist die Länge des untersuchten Hanges kürzer als HL_{krit}, so kommt P_{vorl} zum Einsatz (blauer Bereich), sonst gilt P = 1 (Quelle: eigene Darstellung nach CHISHOLM 2008 : 43).

4. GEBIETSBESCHREIBUNG – FRIENISBERG

Das Untersuchungsgebiet Frienisberg liegt nordwestlich von Bern zwischen 475 und 720 m.ü.M. Das Gebiet wurde im Rahmen des NFP-Projekts von 1987-89 ausgewählt. Seit dieser Zeit fanden dort immer wieder Untersuchungen statt, vor allem von PRASUHN & GRÜNIG (2001), welche Erosionskartierungen erstellt haben und LEDERMANN et al. (2008), die ebenfalls Untersuchungen zur Bodenerosion gemacht haben.
Das Gebiet Frienisberg ist in fünf Teilgebiete aufgeteilt. Die Teilgebiete Seedorf, Lobsigen und Suberg liegen in der Seedorf-Mulde, Schwanden in der Lyssbachebene und das am höchsten gelegene Teilgebiet Frienisberg liegt am Frienisberg-Nordabhang. Dieses Teilgebiet ist mit Abstand das steilste der fünf Gebiete. Im ganzen Untersuchungsgebiet ist mit mittleren Jahresniederschlägen von rund 1100 mm zu rechnen.

Landnutzung und Böden

Im gesamten Gebiet Frienisberg herrscht eine für den Ackerbau typische Nutzung der landwirtschaftlichen Fläche vor. Rund 270 ha Ackerfläche stehen 50 ha Naturwiese gegenüber. Wald und Wiesen nehmen nur einen kleinen Teil der Gesamtfläche in Anspruch. Im Teilgebiet Frienisberg ist der Anteil Naturwiese, verglichen mit den anderen vier Gebieten, etwas höher. Dies ist bedingt durch die Steilheit des Reliefs und die damit ungünstigeren Verhältnisse für den Ackerbau.
Die Geologie in diesem Raum ist geprägt durch Süsswassermolasse und Würm-Moränen (CHISHOLM 2008). Die daraus entstandenen Böden sind vorwiegend Braun- und Parabraunerden. Bestimmt man die Bodenart nach Anteilen der drei Hauptbestandteile Ton, Schluff und Sand, so sind vorwiegend sandige Lehme vorzufinden. Teils treten Schluffgehalte von mehr als 50% auf und im Teilgebiet Frienisberg sind Sandgehalte über 60% häufig anzutreffen. Auf dieser Grundlage basierend kann man die Böden generell als mässig erosionsanfällig bezeichnen. Dies entspricht ebenfalls der Einteilung, welche FRIEDLI (2006) diesem Gebiet zuordnet. (vgl. auch zu den beiden Abschnitten die Angaben in PRASUHN & GRÜNIG 2001:21)

Insgesamt sind 204 Parzellen auf die fünf Teilgebiete aufgeteilt. Seedorf bildet das kleinste und Suberg das grösste Teilgebiet. In der nachfolgenden Karte, wird eine Übersicht des Gebietes gezeigt, welche aus der 1:25’000er Karte (swisstopo) und des überlagernden Parzellenplans (Amtliche Vermessung) besteht. Hier werden die Teilgebiete in ihrer ursprünglichen Lage dargestellt. Aus Layout-Gründen wird im nachfolgenden Resultatteil bei Kartendarstellungen das Gebiet Schwanden etwas näher an die anderen vier Gebiete angegliedert, um eine grössere und detailliertere Darstellung zu ermöglichen.

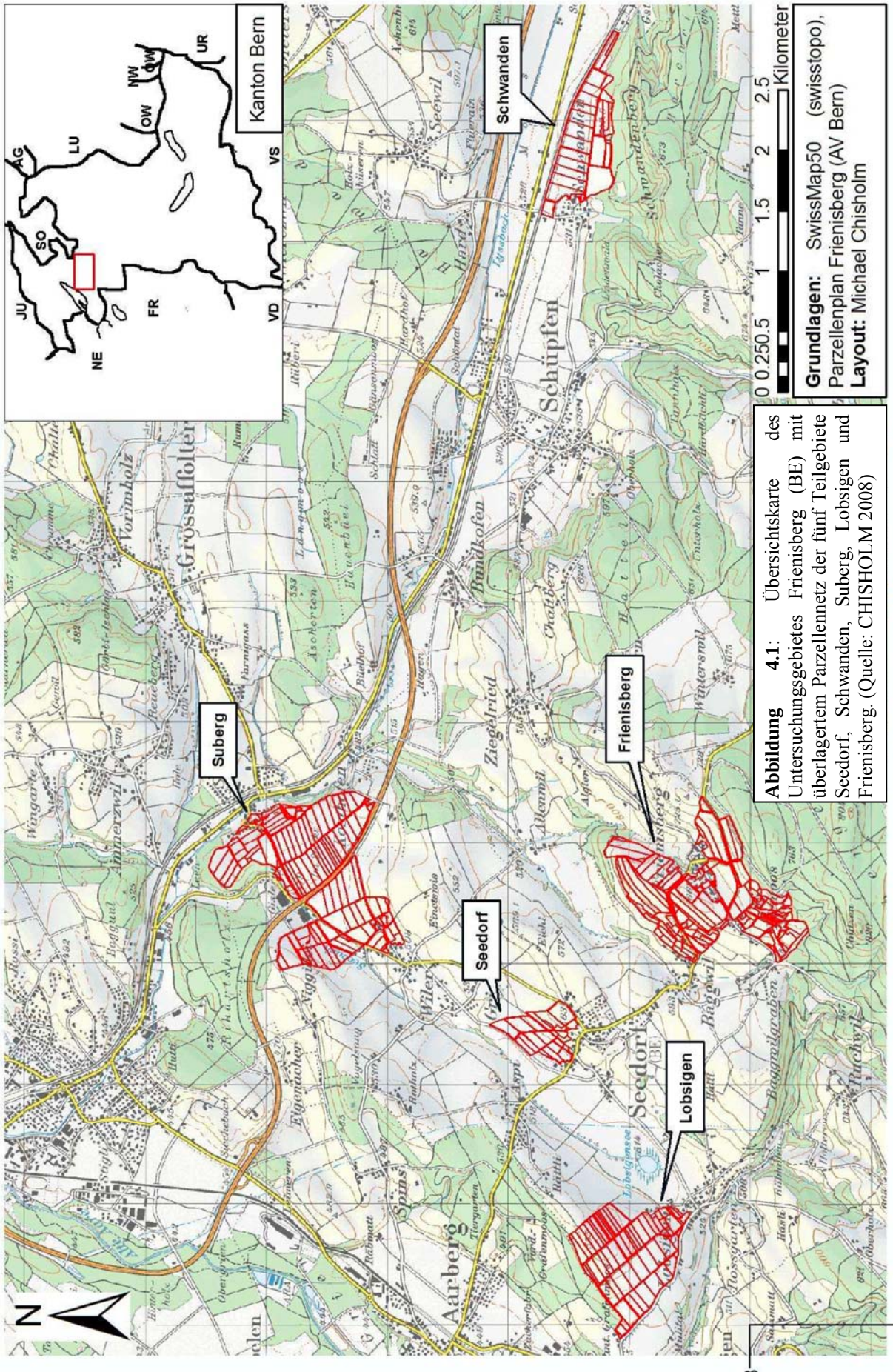


Abbildung 4.1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes Frienisberg (BE) mit überlagertem Parzellennetz der fünf Teilgebiete Seedorf, Schwanden, Suberg, Lobsigen und Frienisberg. (Quelle: CHISHOLM 2008)

Die Abbildung 4.2 zeigt das gleiche Gebiet wie auf der Karte vorher ersichtlich war. Hier wurde zur Illustration ein Aussschnitt aus Google-Earth hinterlegt. Man kann die ackerbauliche Nutzung des gesamten Raumes erkennen. Ackerbau in dieser Form ist im gesamten schweizerischen Mittelland auf landwirtschaftlichen Flächen zu finden. Frienisberg ist somit eine repräsentative Ackerbauzone für das Schweizer Mittelland. Im Rahmen der COST-Aktion 634 gibt es neben Frienisberg noch zwei weitere Untersuchungsgebiete in der Schweiz. Dies ist zum einen Estavayer-le-Lac (FR) und zum anderen ein Gebiet im Oberaargau (BE). Da aber nur für das Gebiet von Frienisberg die für diese Arbeit erforderlichen detaillierten Grundlagendaten vorhanden waren, wurden die anderen zwei Gebiete hier nicht berücksichtigt.

Abbildung 4.2: Übersichtskarte von Frienisberg (BE) mit Luftbildaufnahmen aus Google-Earth und überlagertem Parzellenplan. (Quelle: Google-Earth, eigene Darstellung).

5. RESULTATE UND INTERPRETATION DES VERGLEICHS MIT CHISHOLM 2008

5.1 Auswirkungen von parzellenscharfen Faktordaten – Erläuterungen zum Vorgehen

In diesem Teil der Arbeit sollen die Auswirkungen der parzellenscharfen Faktordaten gezeigt werden. CHISHOLM (2008) verwendete ausschliesslich gemittelte Faktordaten, welche über eine ganze Gemeinde gleiche Werte aufwiesen. In dieser Arbeit liegen nun erstmals parzellenscharfe Daten für den C- und K-Faktor vor. Das heisst, für jede Parzelle stehen individuelle Werte für diese zwei Parameter zur Verfügung. Ziel war es nun, die Auswirkungen der höher aufgelösten Daten zu ermitteln. Einerseits wurde auf die Unterschiede geachtet, um Aufschlüsse darüber zugeben, welches die dominanten Faktoren sind. Andererseits wurden Gemeinsamkeiten gesucht, um den Nutzen von gemittelten Daten zu erfassen.

Zu diesem Zweck wurden drei verschiedene Bodenabtragskarten erstellt, für jede der zwei Auflösungen. Einmal diente das DHM25 (swisstopo 2005) als Rastergrundlage, ein digitales Höhenmodell, welches auf 25x25 m aufgelöst ist. Danach wurde der Vorgang mit dem auf 2x2 m hochaufgelösten DTM-AV (swisstopo 2005) wiederholt. Die Grunddaten waren immer dieselben wie bei CHISHOLM (2008). Dazu gehörten das DHM25 resp. DTM-AV vom Raum Bern, ein Niederschlagsraster von FRIEDLI (2006), ein leicht abgeänderter Parzellenplan (da aktualisiert 2008) von PRASUHN (2008) und Rasterdatensätze für den K- und den C-Faktor. Eine Zusammenstellung und Übersicht der verwendeten Datensätze findet sich in Kapitel 2.4 „Datenstruktur“.
Diese Daten wurden unter Verwendung der ArcView Extension AVErosion verarbeitet. Das Resultat sind Karten, die eine Abschätzung des Bodenabtrags enthalten; zum Einen zellenscharf und zum Andern gemittelt über die Parzellen. Die drei verschiedenen Varianten haben den Zweck die Auswirkungen der parzellenscharfen Faktordaten zu ermitteln. Deshalb wurden die parzellenscharfen Faktoren zuerst separat in der jeweiligen Variante verwendet, um die isolierte Wirkung zu erfahren und am Ende noch gemeinsam in eine letzte Variante eingebaut. Um eine Übersicht der drei erarbeiteten Varianten zu erhalten, ist nachfolgend eine Auflistung und Erklärung aufgeführt, welche die Datengrundlage der Varianten darlegt:

Variante 1: Alle Daten waren gleich wie bei CHISHOLM (2008), ausser der **C-Faktor.** Dieser wurde bei ihm über die ganze Gemeinde gemittelt, hier dagegen parzellenscharf eingefügt. Der K-Faktor wurde von CHISHOLM übernommen, das heisst er war gemittelt über die Gemeinde.

Variante 2: Alle Daten waren gleich wie bei CHISHOLM (2008), ausser der **K-Faktor**. Dieser wurde bei ihm über die ganze Gemeinde gemittelt, hier dagegen parzellenscharf eingefügt. Hier wurde der C-Faktor über die Gemeinde gemittelt eingesetzt.

Variante 3: Eine Kombination aus 1 und 2. Sowohl der **C- wie auch der K-Faktor** waren parzellenscharf, die anderen Daten waren gleich wie bei CHISHOLM (2008).

Kurze Begriffserklärung:

Schläge, Parzellen und Felder:	Diese Wörter werden in der Folge als Synonyme benutzt. Sie bezeichnen ein einzelnes bearbeitetes Feld eines Landwirten, wie es auf einem Parzellenplan ausgewiesen wird.
Zelle, Pixel:	Bei der Berechnung der Bodenabträge mit der Extension AVErosion erhält man als Resultat zwei Karten. Die eine gibt die gemittelten Abtragswerte für die einzelnen Parzellen wieder, während die andere für jede Zelle einen Wert ausgibt. Die Zelle bezeichnet hier also die Grösse eines Pixels. Diese ändert sich folglich von 25x25m beim DHM25 auf 2x2m beim DTM-AV. In der Folge wird meist von Zelle gesprochen und nicht von Pixel.
GISLER (2009), CHISHOLM (2008):	Um den Vergleich mit dieser Arbeit und jener von Chisholm (2008) in Worten auszudrücken, werden die Bezeichnungen Gisler (2009) oder kurz Gisler verwendet, während die Vergleichsarbeit Chisholm (2008) oder kurz Chisholm genannt wird.
DHM 25m, DTM-AV:	DHM heisst digitales Höhenmodell. DTM, heisst digitales Terrainmodell. Die Bezeichnung 25m bezieht sich auf die Auflösung und somit auf die Grösse eines Pixels. Beim DHM 25m, kurz DHM25 ist diese 25x25m und beim DTM-AV 2x2m. Der Zusatz AV bedeutet Amtliche Vermessung, von dort stammt das digitale Terrainmodell.

Nach der Berechnung der einzelnen Karten werden nun die Resultate der drei Varianten mit den Ergebnissen von Chisholm (2008) verglichen und ausgewertet. Es werden mehrheitlich die Resultate des DTM-AV graphisch dargestellt, da diese Modelle einen viel detaillierteren Anblick bieten als jene des DHM25. Jedoch wird auch immer Bezug zu den Daten des DHM25 genommen und die Werte werden auch in den verschiedenen Tabellen aufgezeigt und verglichen. Im Weiteren wird vermehrt auf die Parzellen Bezug genommen, jedoch werden auch die Werte und das Erscheinungsbild, der auf die einzelnen Zellen aufgelösten Karten in Betracht gezogen und untersucht. Der Vergleich und die Auswertung der Resultate erfolgt mittels der drei Varianten und wird an Hand dieser beschrieben.

5.2 Variante 1 – Verwendung von parzellenscharfen C-Faktoren

5.2.1 Resultate und Interpretation

	Gisler 2009		Chisholm 2008	
	Parzellenscharfer C-Faktor		Gemittelte Faktordaten	
	DHM25	DTM-AV	DHM25	DTM-AV
	Bodenabtrag der Parzellen in t/(ha*a) :		Bodenabtrag der Parzellen in t/(ha*a) :	
Min	0.19	0.27	0.49	0.62
Max	26.19	48.34	14.82	28.29
Mittelwert	3.87	4.97	3.10	4.28
Median	2.69	2.93	2.51	2.96
Std. Abweichung	4.24	6.61	2.19	3.80

Tabelle 5.1: Vergleich der Eckdaten der Variante 1 in Gisler 2009 mit parzellenscharfem C-Faktor, mit den Eckdaten von Chisholm (2008) mit gemittelten Faktordaten. Verwendet wurden das DHM25 und das DTM-AV im Gebiet Frienisberg, BE.

Wenn man die Werte in Tabelle 5.1 betrachtet, sieht man einerseits grosse Unterschiede zwischen den Extremwerten von Gisler und Chisholm, sowohl beim DHM25 wie auch beim DTM-AV, andererseits gibt es aber auch zwischen den einzelnen Auflösungen grössere Differenzen. Jedoch treten bei beiden Arbeiten bei höherer Auflösung höhere Werte auf. Dies hat einerseits damit zu tun, dass es mit dem DTM-AV Zellen mit sehr hohen Werten gibt, welche beim DHM25 durch angrenzende Gebiete mit geringeren Werten abgeschwächt wurden, da diese die Erosion in einem Gebiet von 25x25m aufzeigen. Nimmt man nun den Durchschnitt einer ganzen Parzelle, wird dieser somit auch tiefer liegen. Andererseits werden durch die hohe Auflösung beim DTM-AV auch kleinste Änderungen der Hangneigung berücksichtigt. So kann es in gewissen Teilabschnitten sehr hohe Hangneigungen geben, welche beim DHM25 nicht berücksichtigt werden. Diese starken Hangneigungen führen zu sehr hohen S-Faktorwerten und über die Multiplikation in der MUSLE87 auch zu hohen Bodenabträgen. Diese zwei Punkte führen zum erwähnten Zuwachs der Extremwerte. Ähnlich verhält es sich auch bei den Minimalwerten, welche beim DHM25 tiefer liegen. Da wie oben erwähnt durch die grosse Fläche einer einzelnen Zelle eher verminderte Werte auftreten, wird dies auch beim mitteln aller Zellen einer Parzelle weitergeleitet und führt so zu tieferen Werten für ganze Parzellen.

Die Karte mit parzellenscharfem C-Faktor von Gisler und die Karte von Chisholm sehen auf den ersten Blick sehr ähnlich aus (siehe Abbildung 5.1). Beim 25 m Raster, wie auch beim 2 m Raster, kommen die stark gefährdeten Gebiete im Teilgebiet Frienisberg mit hohen Werten zum Vorschein. Dies ist auch bei der Zellendarstellung mit dem DTM-AV der Fall (Abbildung 5.1). Hier fallen aber einige Flächen auf, wo Chisholms Daten höher sind als bei Gisler. Dies ist zum Einen der nördlichste Teil und ein Teil im Westen von Suberg und zum Andern das Gebiet von Seedorf. Beispielsweise im Norden von Suberg betragen meine Zellenwerte 5-8.5 t/(ha*a) und jene von Chisholm 16-20 t/(ha*a). Dies liegt daran, dass die parzellenscharfen C-Werte dieser Arbeit dort teilweise unter den gebietsspezifischen gemittelten Werten von Chisholm liegen. Die tieferen C-Werte wirken sich dann über die Multiplikation mit den anderen Faktoren erosionsmindernd aus und führen zu geringeren Bodenabtragswerten.

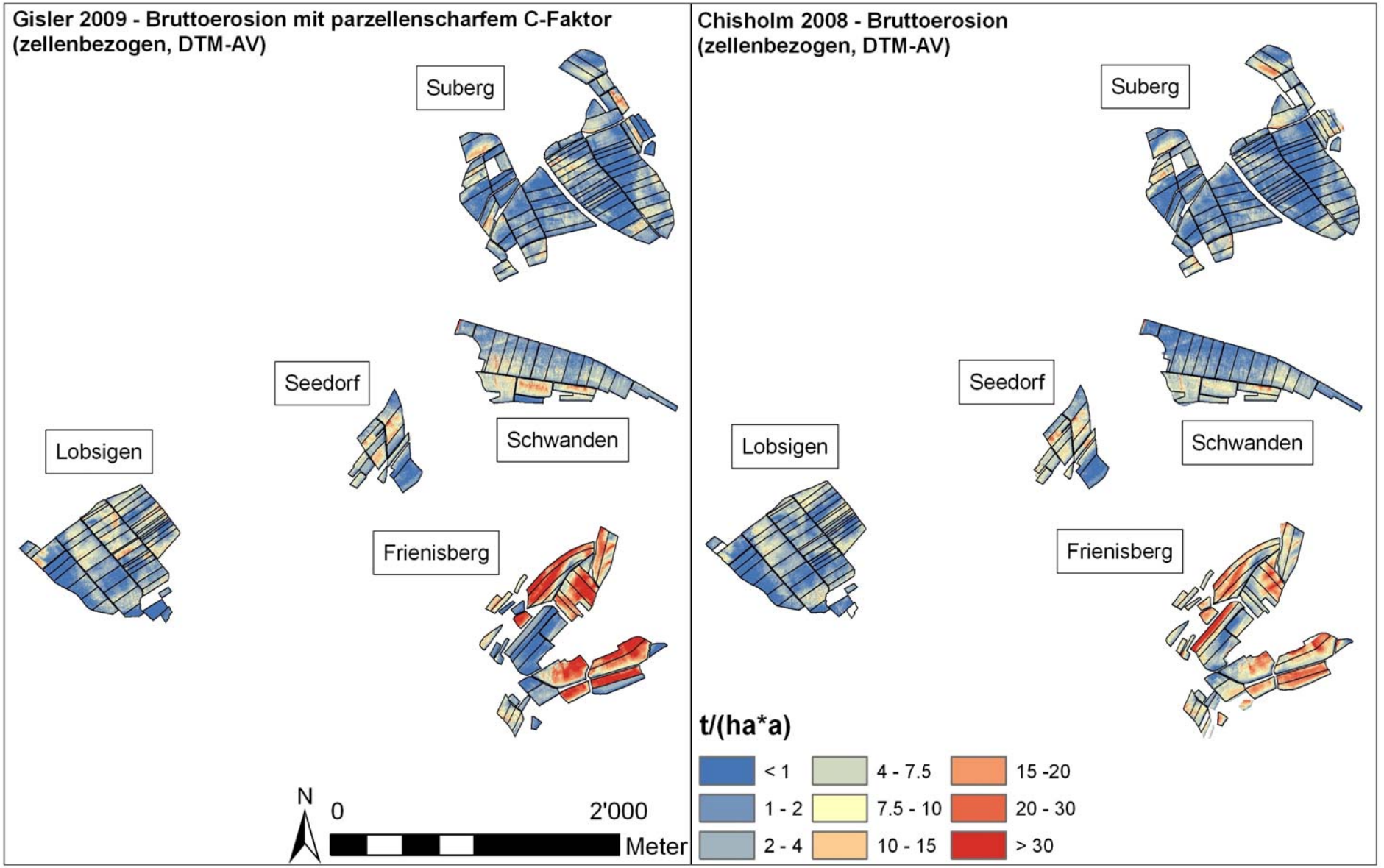


Abbildung 5.1: Bruttoerosion mit parzellenscharfem C-Faktor von Gisler (2009) (links) und die von Chisholm (2008) (rechts). Die Karte ist zellenscharf aufgelöst mit einer Pixelgrösse von 2x2m. Verwendet wurde dafür das DTM-AV im Gebiet Frienisberg, BE. (Quelle: eigene Darstellung).

Da die Daten von Gisler auch bei den Parzellen ein viel höheres Maximum haben (siehe Tabelle 5.1), wird durch die „streched values“ die graphische Darstellung verzerrt, zumal da eigentlich nur eine Parzelle einen viel höheren Wert hatte. Dies erschwert den Vergleich. Zur besseren Analyse wurde die Parzellendarstellung klassifiziert und die Felder in acht Klassen eingeteilt. Diese gehen von < 0.5, 0.5 – 2, 2-4 und dann in vierer Schritten bis >20 t/(ha*a). So hat man einen besseren Vergleich der beiden Karten, da alle Extremwerte in die Kategorie >20 t/(ha*a) fallen und so die farblichen Werte den gleichen Zahlenwerten entsprechen (siehe Abbildung 5.2, die klassifizierte Karte von Chisholm befindet sich im Anhang 1).

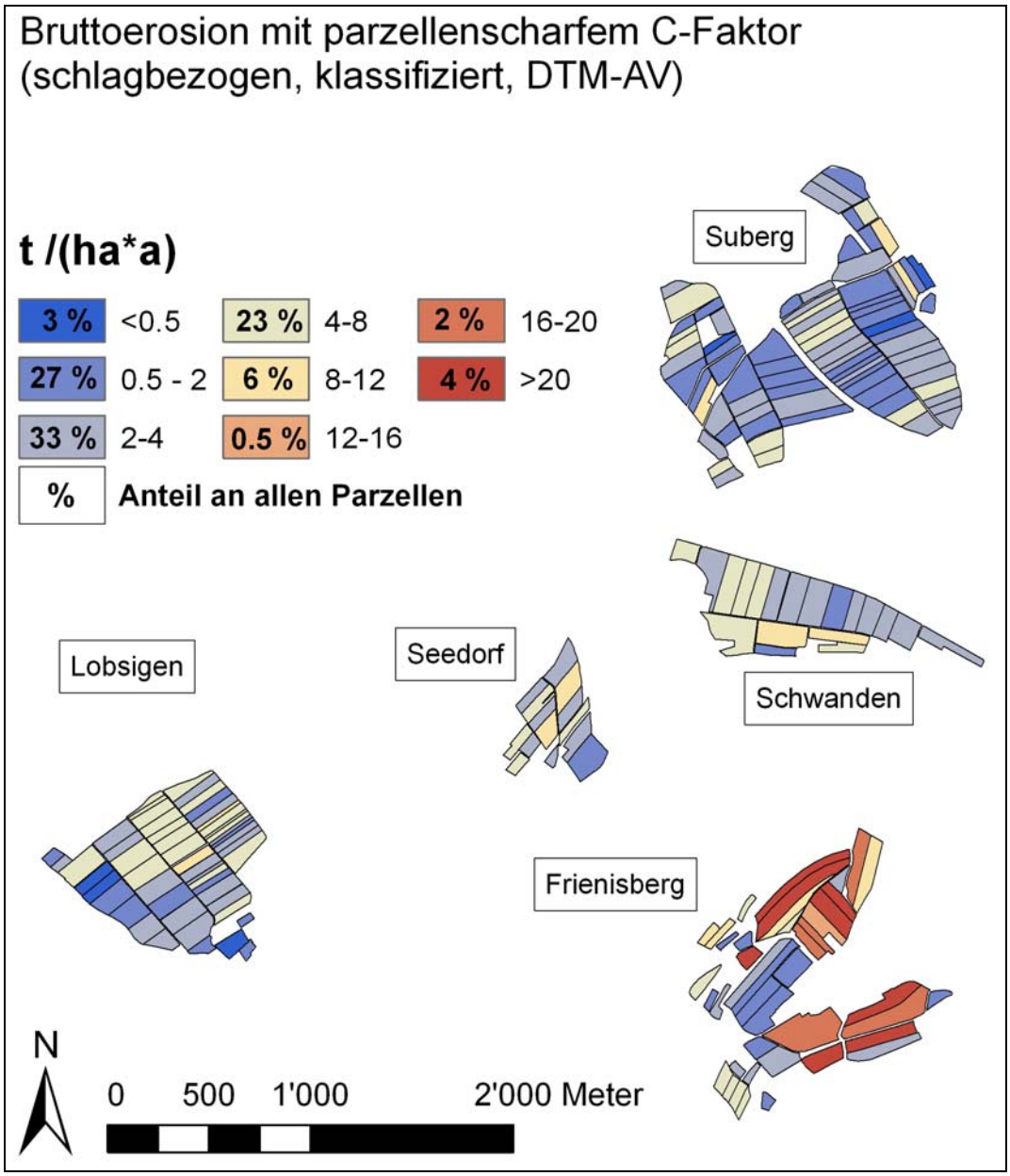


Abbildung 5.2: Gisler (2009) - Klassifizierte Schläge mit parzellenscharfem C-Faktor. Anhand des Bodenabtrags in acht Klassen eingeteilte Parzellen unter Verwendung von parzellenscharfen C-Faktordaten und dem DTM-AV. (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Betrachtung der erhaltenen Darstellung finden sich sehr viele Übereinstimmungen und nur kleine Differenzen, bis auf das Gebiet Frienisberg (vgl. Abbildung 5.2 und Anhang 1). In Frienisberg gibt es Parzellen, die sich über drei, vier Kategorien unterscheiden. Verdeutlicht wird die Erosionsanfälligkeit von Frienisberg dadurch, dass alle Parzellen in den Kategorien 12 t/(ha*a) und mehr in Frienisberg liegen (siehe Abbildung 5.2). Dies sind bei Gisler insgesamt 14 und bei Chisholm 9 Felder, von denen 7 übereinstimmend sind. Das Gefahrenpotential von Frienisberg ist auch in der Karte mit dem DHM25 ersichtlich, auch dort trat dieses Gebiet mit stark erhöhten Werten hervor. Das am stärksten von Erosion betroffene Gebiet weist auch die grössten Unterschiede in den Beträgen beider Berechnungen auf. Dies wurde durch die Karte mit den absoluten Differenzen der Bodenabträge der Schläge ersichtlich, welche zur einfacheren Analyse der Daten erstellt wurde (hier nicht abgebildet). Dieses Bild zeigt sich bei beiden Auflösungen. Die meisten Parzellen, welche stark von Erosion betroffen sind, weisen bei Gisler einen noch höheren Wert auf als bei Chisholm. Einzig die Parzellen 636, 645, 653 und 758 (siehe Abbildung 5.8, S. 61) im Teilgebiet Frienisberg sind bei Chisholm um einiges höher als bei Gisler. Auf einzelne dieser Parzellen wird im letzten Teil des Vergleiches noch eingegangen. Vorweggenommen sei, dass dies am sehr geringen C-Faktor dieser Parzellen liegt. Bei der Besprechung mit Volker Prasuhn, welcher diese Daten zusammengetragen und erarbeitet hat, kam heraus, dass diese Felder seit mehreren Jahren nur noch als Kunstwiesen genutzt werden und der C-Faktor deshalb so tief liegt. Das ist auch die Erklärung wieso wir dort, obwohl es steile Gebiete sind, nahezu keine Erosion vorfinden. Bei der genauen Betrachtung der einzelnen Felder fallen die Unterschiede in den C-Faktorwerten auf, welche auch hauptsächlich für die grossen Abweichungen der Bodenabträge verantwortlich sind. Vor allem in steilen Gebieten wie z.B. Frienisberg wirken sich schon betragsmässig kleinere Unterschiede in den C-Werten über den Faktor beim multiplizieren stark aus, wie an den am stärksten betroffenen Parzellen in Frienisberg zu sehen ist. Die Verteilung der C-Faktoren in den Teilgebieten sowie ein Gesamtüberblick der Verteilung bei Gisler und Chisholm finden sie in der nachfolgenden Tabelle.

Gebiet	**Min**	**Max**	**Mittel**	**Std. Abweichung**
Schwanden	0.01	0.21	0.11	0.05
Seedorf	0.03	0.11	0.07	0.02
Frienisberg	0.01	0.25	0.09	0.06
Lobsigen	0.02	0.24	0.10	0.05
Suberg	0.01	0.22	0.09	0.04
Gesamtes Gebiet:				
Chisholm (2008)	0.07	0.11	0.08*	0.00
Gisler (2009)	0.01	0.25	0.09	0.05

Tabelle 5.2: C-Faktorwerte für die verschiedenen Teilgebiete von Frienisberg in Gisler (2009). Zum Vergleich die Werte für das gesamte Gebiet von Chisholm (2008) und Gisler (2009). *nur einzelne Werte sind bei Chisholm nicht 0.08

Die Tabelle 5.2 zeigt das Wertespektrum des C-Faktors auf. Dieses reicht von 0.01 bis 0.25, das entspricht einem Faktor 25 vom kleinsten zum grössten Wert. Dieser Faktor wirkt sich durch die Multiplikation in der ABAG, direkt auf den abgeschätzten Bodenabtrag aus. Vom Maximum bei Gisler (= 0.25) zu jenem von Chisholm (= 0.11) sind es mehr als 200 % Unterschied. Dies ist eine Erklärung, weshalb es zum Teil so markante Unterschiede bei der resultierenden Erosion gibt.

Der C-Faktor, ist nicht an irgendwelche geologischen oder geomorphologischen Eigenschaften der Umgebung gebunden, wie dies beim K-Faktor der Fall ist. Er ist prinzipiell nur vom Landwirt, welcher das Feld bewirtschaftet, abhängig. Natürlich gibt es auch da Grenzen, welche unter anderem durch wirtschaftliche Überlegungen zu Stande kommen, aber grundsätzlich entscheidet der Landwirt selbst, wie er seine Ackerfläche nutzt und beeinflusst so den C-Faktor in hohem Mass. Die Erkenntnis, die daraus gewonnen wurde ist, dass der C-Faktor von Parzelle zu Parzelle stark variieren kann und somit gemittelte Werte den tatsächlichen Verhältnissen nur teilweise entsprechen können.

Es ist naheliegend, dass bei hohen Bodenabtragswerten für einzelne Felder leicht grössere Unterschiede resultieren können. Doch wie sieht es mit den relativen Differenzen aus? Vielleicht gibt es Gebiete, welche nur um 2-3 t/(ha*a) variieren, dies macht aber mehr als die Hälfte des gesamten Abtrages aus? Um diesen Erscheinungen auf den Grund zu gehen, wurde eine Karte mit den relativen Differenzen zwischen den schlagbezogenen Bodenabträgen von Gisler und jenen von Chisholm erstellt (siehe Abbildung 5.3). Hier sieht das Bild nicht mehr so klar aus wie bei den absoluten Differenzen. Es gibt überall grössere Abweichungen, wobei zu erwähnen ist, dass auch die betragsmässig grossen Unterschiede in Frienisberg auf dieser Karte in den Extrembereichen angesiedelt sind. Jedoch gibt es in fast allen Teilgebieten sowohl grosse negative wie auch positive Abweichungen. Dies relativiert die Aussage über die absoluten Differenzen, da es überall verhältnismässig grosse Unterschiede gibt, jedoch widerspricht sie ihnen nicht, da die Tendenzen hier noch deutlicher zu sehen sind.

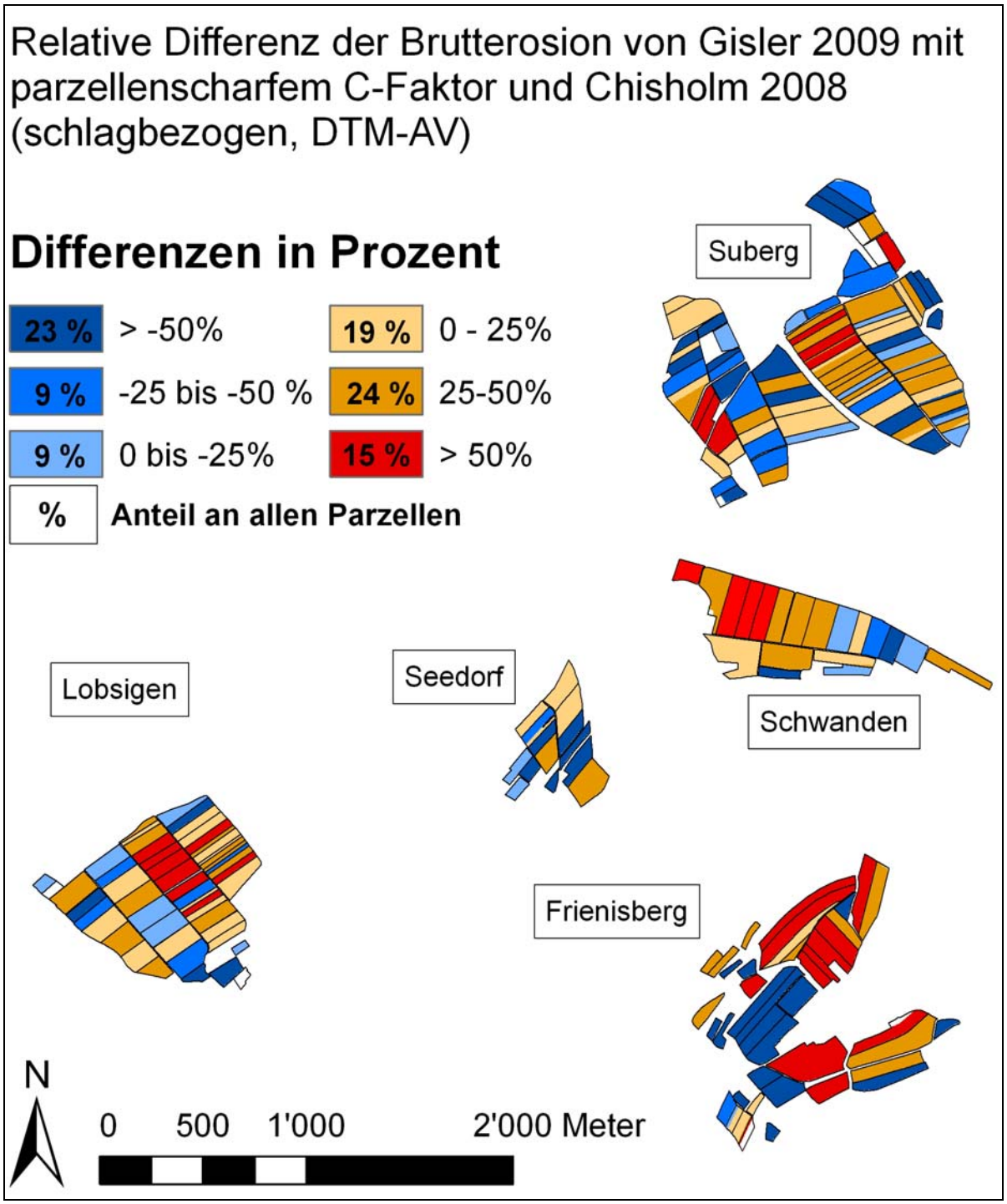


Abbildung 5.3: Relative Differenz der Bruttoerosion zwischen Gisler (2009) und Chisholm (2008). Relative Differenzen der Bodenabträge der schlagbezogenen Werte von Gisler mit parzellenscharfen C-Faktordaten und jenen von Chisholm mit gemittelten Faktordaten. (Quelle: eigene Darstellung).

5.2.2 Fazit der Variante 1

Im Allgemeinen sehen die Karten beim optischen Vergleich sehr ähnlich aus. Auch die Werte liegen meist in den gleichen Bereichen. Nur in Frienisberg, wo die Erosion am stärksten wirkt, finden sich grössere Unterschiede. Die 14 am stärksten von Erosion betroffenen Parzellen liegen in Frienisberg und korrelieren auch sehr stark mit den absoluten Differenzen zwischen den Daten von Chisholm und Gisler. Die Darstellung der relativen Differenzen zeigt, dass auch bei anderen Parzellen grössere Abweichungen vorhanden sind. Dies ist aber trotzdem nicht im Widerspruch mit den angesprochenen hohen absoluten Differenzen in den am stärksten betroffenen Feldern zu sehen. Das verhältnismässig grosse Wertespektrum des C-Faktors führt in Kombination mit steilen Hängen und somit hohen S-Faktoren zu teilweise hohen Abweichungen der beiden Abschätzungen des Bodenabtrags. Der C-Faktor kann von Parzelle zu Parzelle stark variieren, da er vom Landwirten und dessen Praktiken abhängig ist. Dies führt zu einer stark heterogenen Verteilung der Werte. Das ist auch der Grund für die vereinzelt starken Unterschiede des Bodenabtrags zwischen Chisholm (2008) und Gisler (2009). Diese starke Variabilität geht durch eine Abschätzung und Mittelung der C-Faktoren über ein grösseres Gebiet, wie dies bei Chisholms Datengrundlage der Fall war, verloren und führt so zu stark abweichenden Aussagen. Deshalb sind parzellenscharfe C-Faktoren gemittelten Werten sicherlich vorzuziehen. Weitere Interpretationen dazu finden sich im Vergleich der Variante 3 mit parzellenscharfem C- und K-Faktor in Kapitel 5.4.

5.3 Variante 2 – Verwendung von parzellenscharfen K-Faktoren

Bei dieser Variante wurde der C-Faktor wie bei Chisholm (2008) gemittelt eingesetzt, aber der K-Faktor wurde durch den parzellenscharfen Datensatz ausgetauscht. Das heisst, es liegen für jede einzelne Parzelle individuelle Werte für die Bodenerodierbarkeit vor. Bei Chisholm sind diese Werte wiederum über ganze Gemeinden gemittelt. Hier geht es nun darum, die isolierten Auswirkungen der parzellenscharfen K-Faktoren zu ermitteln und Unterschiede und Gemeinsamkeiten festzuhalten.

5.3.1 Resultate und Interpretation

	Gisler 2009		**Chisholm 2008**	
	Parzellenscharfer K-Faktor		**Gemittelte Faktordaten**	
	DHM25	DTM-AV	DHM25	DTM-AV
	Bodenabtrag der Parzellen in t/(ha*a) :		Bodenabtrag der Parzellen in t/(ha*a) :	
Min	0.38	0.60	0.49	0.62
Max	14.19	20.50	14.82	28.29
Mittelwert	2.91	3.83	3.10	4.28
Median	2.43	2.86	2.51	2.96
Std. Abweichung	2.00	3.09	2.19	3.80

Tabelle 5.3: Vergleich der Eckdaten der Variante 2 in Gisler (2009) mit parzellenscharfem K-Faktor, mit den Eckdaten von Chisholm (2008) mit gemittelten Faktordaten. Verwendet wurden das DHM25 und das DTM-AV im Gebiet Frienisberg, BE.

Die Eckdaten in Tabelle 5.3 zeigen, dass die Resultate dieser Variante mit parzellenscharfem K-Faktor sehr ähnlich sind. Vor allem beim DHM25 sind die Unterschiede sehr gering. Bei der Betrachtung der Zellenkarten fallen einem bei beiden Auflösungen fast keine Unterschiede auf (siehe Abbildung 5.4). Auch die Extremwerte der DTM-AV Karten sind fast gleich. Die Darstellung mit den Parzellen ergibt ein ähnliches Bild, wobei einzelne kleine Abweichungen zu sehen sind. Doch auch im stark gefährdeten Gebiet von Frienisberg sehen die Werte optisch ziemlich übereinstimmend aus. Die Darstellung mit den anhand des Bodenabtrags klassifizierten Parzellen unterstreicht die starke Übereinstimmung der Variante 2 mit Chisholms Daten (Anhang 1 & 2). Trotzdem gibt es einige Differenzen in den Werten. In Frienisberg sind die Unterschiede mit Abstand am grössten und deutlichsten. Hier sind die Werte von Chisholm höher. Dies im Gegensatz zur Variante 1 mit parzellenscharfem C-Faktor, wo die Zahlenwerte von Gisler im Teilgebiet Frienisberg deutlich höher waren als jene von Chisholm.

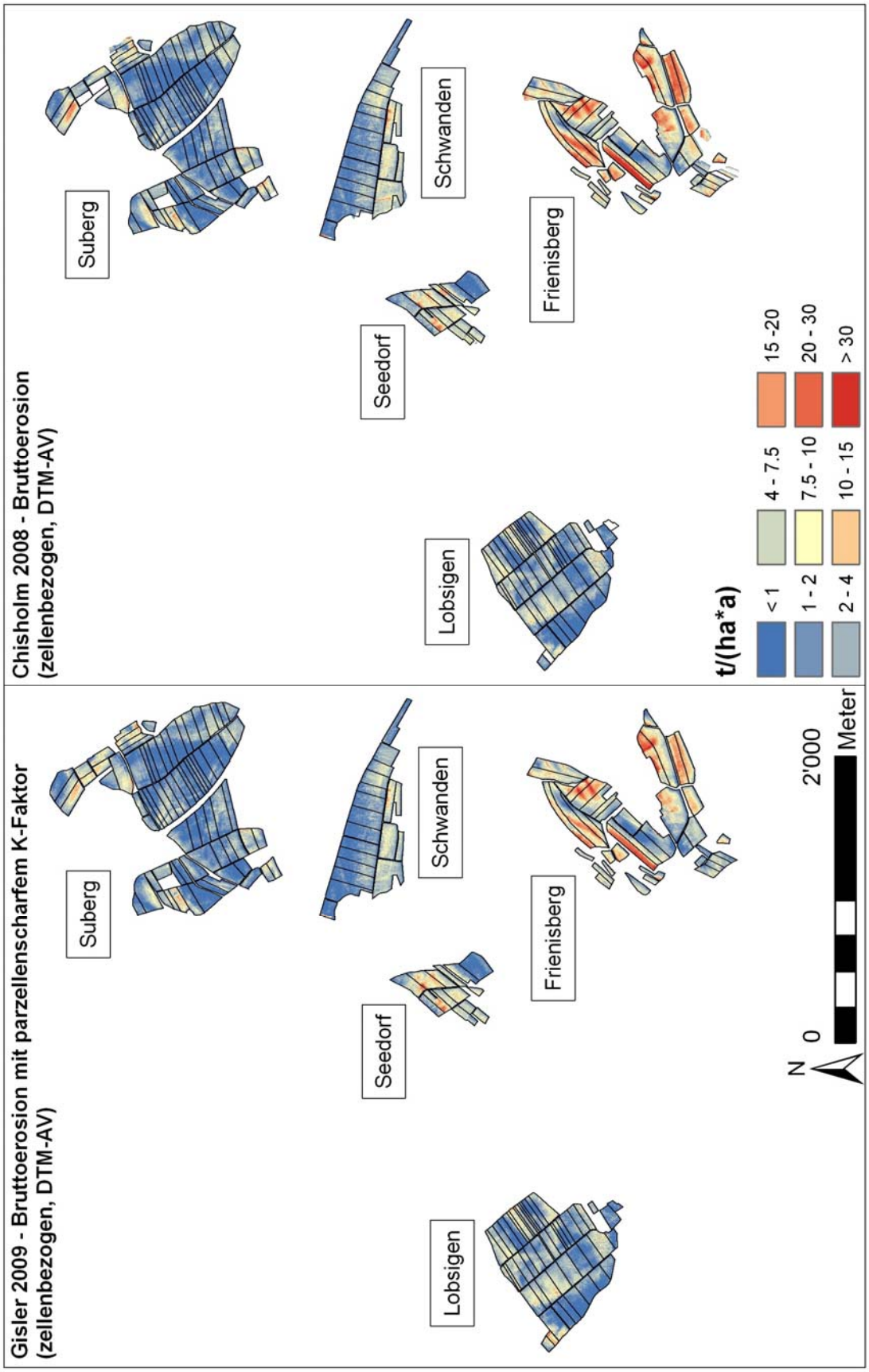


Abbildung 5.4: Bruttoerosion mit parzellenscharfem C-Faktor von Gisler (2009) (links) und die von Chisholm (2008) (rechts). Die Karte ist zellenscharf aufgelöst mit einer Pixelgrösse von 2x2m. Verwendet wurde dafür das DTM-AV im Gebiet Frienisberg, BE. (Quelle: eigene Darstellung).

Bei genauer Betrachtung der K-Faktorwerte und nach einem Gespräch mit Volker Prasuhn wurde festgestellt, dass diese Werte sehr gebietsspezifische Eigenschaften aufweisen. Der K-Wert ist konstanter als der C-Wert, weil er von den natürlichen Umgebungs- und Entstehungseigenschaften beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu variiert der vom Menschen stark beeinträchtigte C-Faktor und kann von Parzelle zu Parzelle ganz unterschiedliche Werte annehmen. Über das gesamte Gebiet liegen die K-Werte von Gisler im Bereich 0.17-0.42, mit einem Mittelwert von 0.33. Die Variabilität beträgt hier also nur Faktor 2.5 von minimalen zum maximalen Wert. Verglichen mit dem zuvor beobachteten Faktor 25 beim C-Faktor ist dies ein eher geringes Wertespektrum. Der K-Faktor bei Chisholm weist für fast alle Parzellen den Wert 0.35 auf. Dies zeigt, dass die Abschätzungen von FRIEDLI (2006) ziemlich dem Wert entsprechen, den man im Feld vorfinden wird, wenn man die Mittelwerte vergleicht. Schaut man sich die K-Werte der einzelnen Teilgebiete etwas genauer an, ist zu erkennen, dass sie in Frienisberg deutlich unter jenen der anderen Gebiete liegen (vergleiche Tabelle 5.4). Dies ist mit ein Grund, weshalb Chisholm bei dieser Variante im Gebiet Frienisberg vorwiegend höhere Bodenabträge aufweist als Gisler. Dies kommt auch bei der Darstellung der relativen Differenzen der Schläge zum Ausdruck (Abbildung 5.5).

Gebiet	**Min**	**Max**	**Mittel**	**Std. Abweichung**
Schwanden	0.32	0.34	0.33	0.010
Seedorf	0.34	0.38	0.36	0.017
Frienisberg	0.17	0.33	0.26	0.039
Lobsigen	0.29	0.42	0.38	0.036
Suberg	0.26	0.42	0.33	0.047
Gesamtes Gebiet:				
Chisholm (2008)	0.35	0.45	0.35*	0.013
Gisler (2009)	0.17	0.42	0.33	0.056

Tabelle 5.4: K-Faktorwerte für die verschiedenen Teilgebiete von Frienisberg in Gisler (2009). Zum Vergleich die Werte für das gesamte Gebiet von Chisholm (2008) und Gisler (2009). *nur einzelne Parzellen haben einen anderen Wert als 0.35.

Ähnlich wie in Frienisberg ist auch in Schwanden zu erkennen, dass Chisholms Werte über das gesamte Gebiet Schwanden höher sind (Abbildung 5.5). Tabelle 5.4 zeigt, dass Schwanden stets tiefere K-Werte aufweist als Chisholm. Dies erklärt die Abweichungen des Bodenabtrags. Analog verhält es sich in Lobsigen, wobei hier der Schnitt der K-Werte höher ist als bei Chisholm, also liegen auch die Abweichungen vorwiegend im leicht positiven Bereich.

In Frienisberg sind die Unterschiede jedoch nicht nur mehrheitlich negativ, sie sind auch noch recht stark (dunkelblaue Färbung). Dies ist dadurch zu erklären, dass die Verbindung von grösseren Unterschieden in den K-Werten und hohe S-Faktorwerte (steiles Gebiet) zu einer Verstärkung dieser Differenz führen. So sehen wir auch hier ein Zusammenspiel mehrere Faktoren, die zu grösseren Differenzen führen.

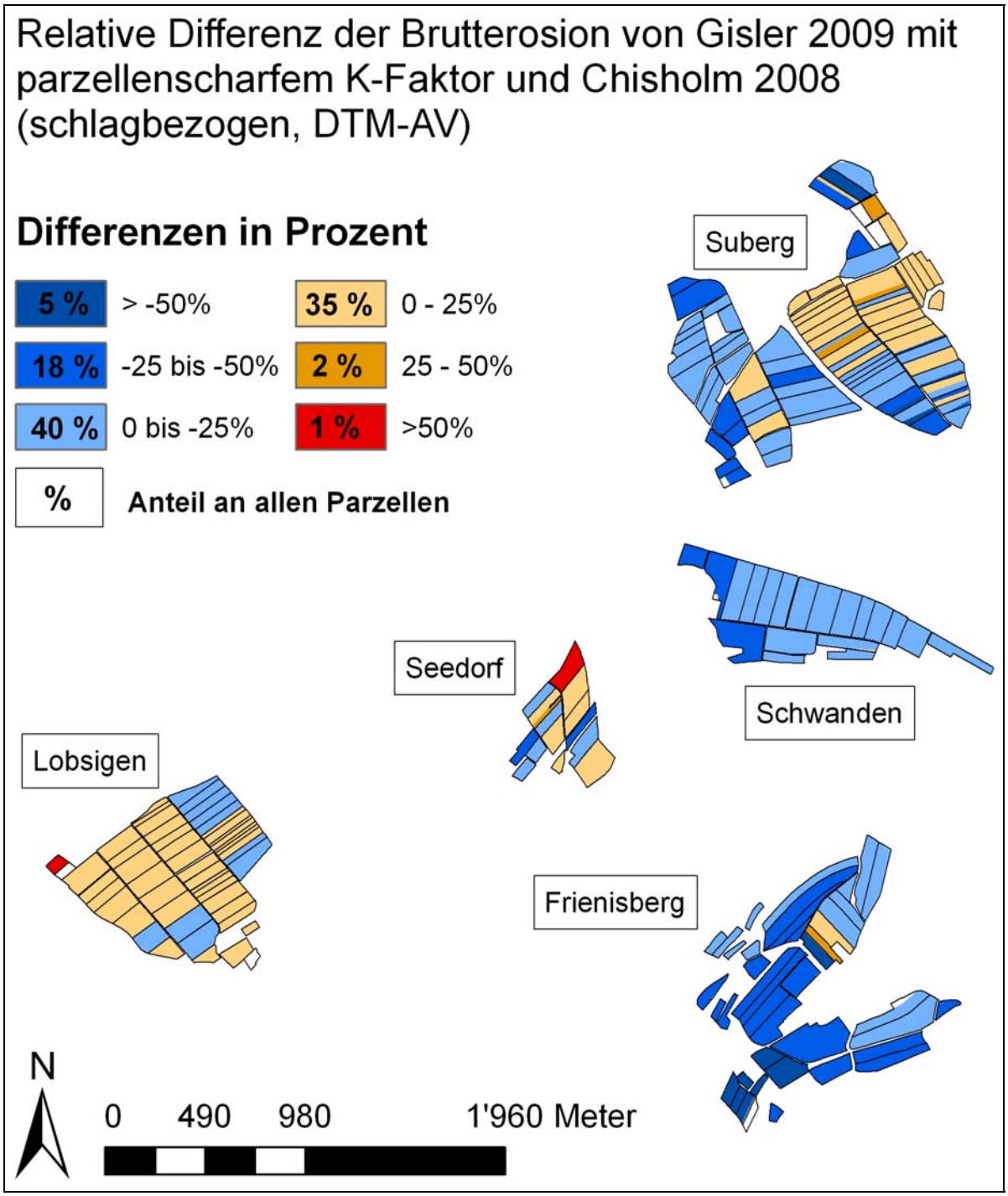


Abbildung 5.5: Relative Differenz der Bruttoerosion zwischen Gisler (2009) und Chisholm (2008). Relative Differenzen der Bodenabträge der schlagbezogenen Werte von Gisler mit parzellenscharfen K-Faktordaten und jenen von Chisholm mit gemittelten Faktordaten. (Quelle: eigene Darstellung).

5.3.2 Fazit der Variante 2

Die Variante 2 mit parzellenscharfem K-Faktor weist in beiden Auflösungen sehr grosse Ähnlichkeiten zu Chisholm auf. Dies liegt einerseits daran, dass der K-Faktor sehr konstant ist und andererseits der stark variierende C-Faktor bei dieser Variante ausgeklammert wurde, in dem die gleichen gemittelten Werte wie bei Chisholm (2008) eingesetzt wurden. In Tabelle 5.4 wurde gezeigt, dass der K-Faktor innerhalb eines Teilgebietes nicht sehr stark schwankt, jedoch von einem Teilgebiet zum nächsten erhebliche Unterschiede auftreten können (z.B. Frienisberg und Lobsigen). Diese Unterschiede werden durch den Reliefeffekt abgeschwächt oder noch verstärkt, wie z.B. in Frienisberg, wo dieser Effekt sehr stark zum tragen kommt. Insgesamt sind die Differenzen bei der Variante 2 aber relativ gering und die klassifizierten Parzellen sind meist in den gleichen Klassen eingeteilt. Besonders ist die grosse Übereinstimmung bei der Zellenkarte zu erwähnen, wo fast alle Gebiete gleich angezeigt werden (Abbildung 5.4). Da die Varianz des K-Faktors eher gering ist und dieser sich auch nicht so schnell verändert, ist es sicherlich ein probates Mittel, diese Werte abzuschätzen und zu generalisieren. Die gemittelten Werte von Chisholm (aus FRIEDLI 2006) über das ganze Gebiet kommen sehr nahe an die im Feld erhobenen Daten von PRASUHN (2008) heran.

5.4 Variante 3 – Verwendung von parzellenscharfen C- und K-Faktoren

Bei der letzten Variante des Vergleichs zwischen Chisholm (2008) und Gisler (2009) wurden sowohl der C- wie auch der K-Faktor parzellenscharf eingesetzt. Die gemittelten Daten dieser zwei Faktoren wurden beide durch die hoch aufgelösten Daten ersetzt und somit wurde hier die bestmöglichste Datengrundlage dieser Arbeit gewählt. Der Niederschlagraster (R-Faktor) ist wie bei allen anderen Varianten zuvor, gleich wie bei Chisholm und beruht auf den Berechnungen von FRIEDLI (2006). Die resultierende Bruttoerosionsabschätzung dieser Variante bildet im weiteren Verlauf der Arbeit die Datengrundlage weiterer Berechnungen. Wird in nachfolgenden Kapiteln von „ursprünglichen" Werten gesprochen, sind die Werte und Faktordaten dieser Variante 3 gemeint.

5.4.1 Resultate und Interpretation

	Gisler 2009		**Chisholm 2008**	
	Parzellenscharfe C- und K-Faktoren		**Gemittelte Faktordaten**	
	DHM25	DTM-AV	DHM25	DTM-AV
	Bodenabtrag der Parzellen in t/(ha*a) :		Bodenabtrag der Parzellen in t/(ha*a) :	
Min	0.18	0.31	0.49	0.62
Max	21.70	42.81	14.82	28.29
Mittelwert	3.50	4.39	3.10	4.28
Median	2.45	2.81	2.51	2.96
Std. Abweichung	3.48	5.39	2.19	3.80

Tabelle 5.5: Vergleich der Eckdaten der Variante 3 in Gisler (2009) mit parzellenscharfem C- und K-Faktor, mit den Eckdaten von Chisholm (2008) mit gemittelten Faktordaten. Verwendet wurden das DHM25 und das DTM-AV, im Gebiet Frienisberg, BE.

Die Karten der Variante 3 mit parzellenscharfen C- und K-Faktoren sehen sehr ähnlich aus, wie diejenigen der Variante 1, wo nur der C-Faktor parzellenscharf war. Wiederum, wie bei den vorangegangen Varianten, zeigt sich eine stark erhöhte Erosionstätigkeit im Teilgebiet Frienisberg. Die Eckdaten von Tabelle 5.5 liegen betragsmässig zwischen Variante 1 und 2. Der Mittelwert und der Median sind hier sehr ähnlich. Der Maximalwert von 42.81 beim DTM-AV täuscht ein wenig, da der zweithöchste Wert bei 29.87 liegt, also ziemlich im Bereich von Chisholms Werten. Auffällig sind die grossen Unterschiede zwischen den Maxima der zwei verschiedenen Auflösungen, vor allem bei den Resultaten dieser Arbeit. Die Mittelwerte liegen sowohl bei Chisholm wie auch bei Gisler beim DHM25 deutlich tiefer als beim DTM-AV. Mögliche Ursache dieser Unterschiede wurden bei der Besprechung der Variante 1 schon erwähnt. Daher sollen hier nur nochmals kurz die wichtigsten Punkte wiedergegeben werden. Zum Einen werden durch die auf 2x2m aufgelösten Pixel kleinräumige Extremwerte auch erfasst, welche in einem 25x25m Pixel nicht mehr zum Vorschein kommen. Zum Anderen werden die Werte beim DTM-AV durch die genauere Abbildung des Reliefs und daraus resultierender hoher S-Faktorwerte noch verstärkt. Dies führt dann im Endergebnis zu deutlich höheren Extremwerten. Aber durch die Abschwächung der Werte, führt dies andererseits beim DHM25 zu tieferen Minimalwerten.

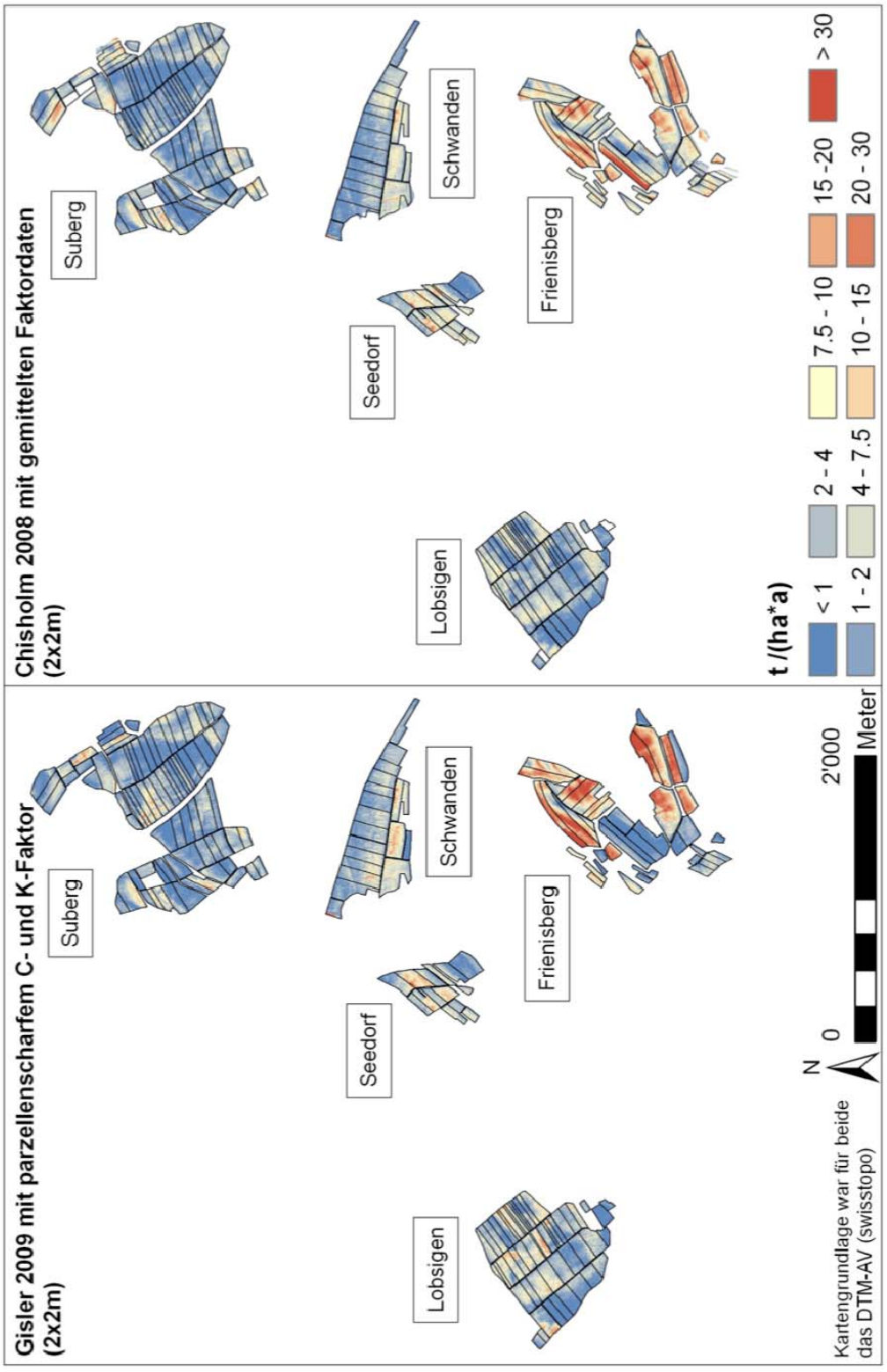


Abbildung 5.6: Bruttoerosion von Gisler (2009) mit parzellenscharfem C- und K-Faktor (links) und von Chisholm (2008) (rechts). Die Darstellung ist zellenbezogen und mit dem DTM-AV auf 2x2m aufgelöst. (Quelle: eigene Darstellung).

Beim Vergleichen der Zellenkarten (siehe Abbildung 5.6, vordere Seite) fallen die Gebiete im Norden und Westen Subergs, ein kleines Gebiet im Zentrum Lobsigens und die schon bei Variante 1 erwähnten Parzellen in Frienisberg auf. Ansonsten sind die Hot Spots an den gleichen Stellen angesiedelt und auch feine Anzeichen von Erosion sind am gleichen Ort.

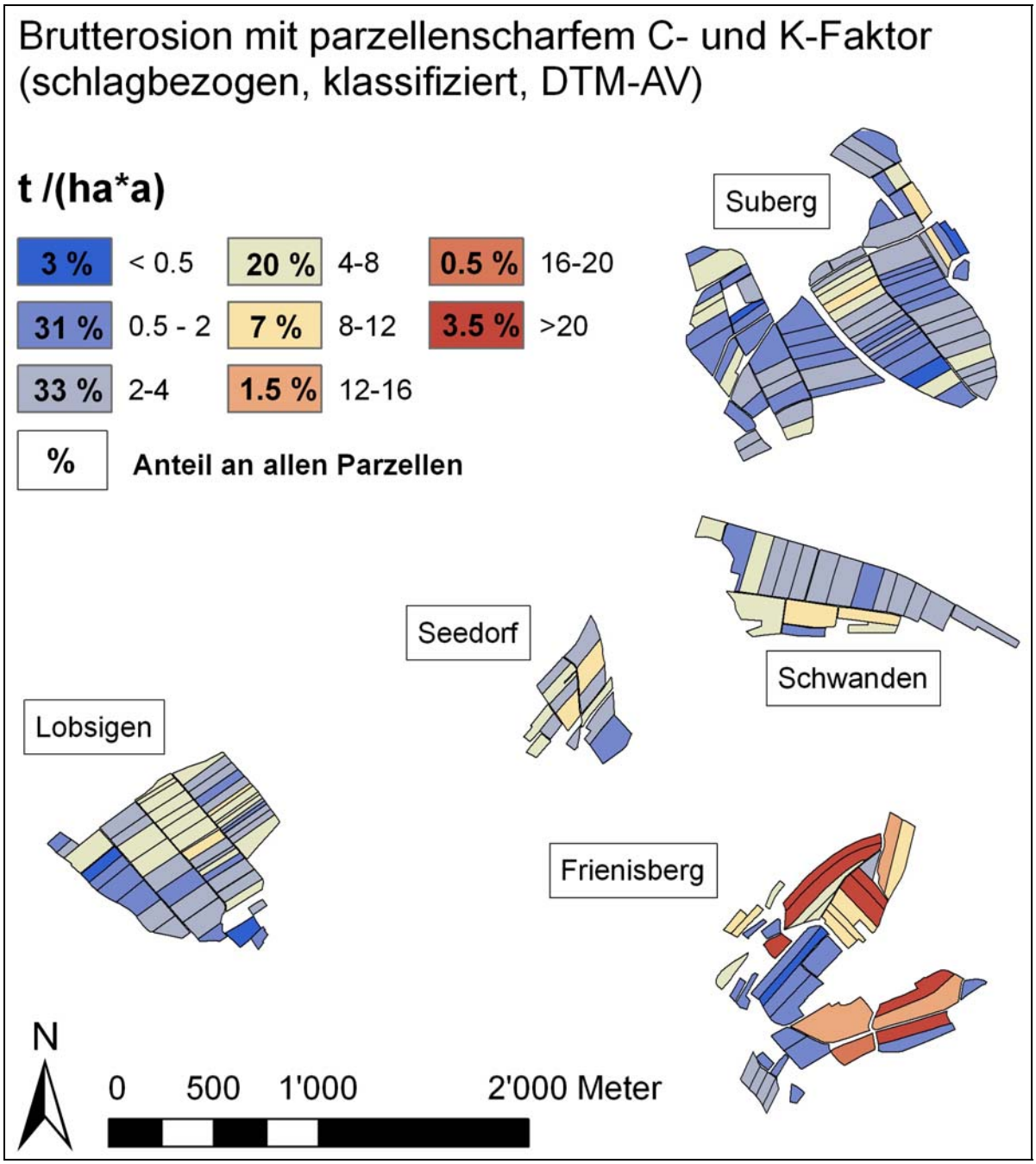


Abbildung 5.7: Gisler (2009) - Klassifizierte Schläge mit parzellenscharfem C- und K-Faktor. Anhand des Bodenabtrags in acht Klassen eingeteilte Parzellen unter Verwendung von parzellenscharfen C-und K-Faktordaten und dem DTM-AV. (Quelle: eigene Darstellung).

Die Gesamtübersicht des Gebietes mit der Karte der klassifizierten Parzellen zeigt eine grosse Ähnlichkeit mit den Resultaten von Chisholm, jedoch gibt es vielerorts Verschiebungen um eine Klasse und im Gebiet Frienisberg nehmen diese Klassenverschiebungen ein grösseres Mass ein (Abbildung 5.7 und Anhang 1). Mit insgesamt 87 % liegen die meisten Parzellen in einem Bereich unter 8 t/(ha*a). Die sehr stark gefährdeten Felder machen nur einen kleinen Teil aus. Dem Teilgebiet Frienisberg kommen in dieser Hinsicht sicherlich die guten Eigenschaften des Bodens in dieser Gegend zu Gute. Ansonsten würde es dort noch zu höheren Bodenabträgen kommen.

Die Parzellen mit extensiver Nutzung (645, 653, 758 und ein paar kleinere Parzellen, siehe Abbildung 5.8) haben bei Chisholm auch in Variante 3 wieder viel höhere Abträge als bei Gisler. Dies liegt am markant geringeren C-Faktor von Gisler für diese Parzellen. Um das Zusammenspiel der Faktoren und die daraus resultierenden Unterschiede aufzuzeigen, werden nachfolgend zwei extreme Parzellen im Einzelnen mit ihren Werten aufgeführt.

Tabelle 5.6 zeigt, dass kleine Unterschiede in beiden Faktoren grosse Auswirkungen auf den Bodenabtrag haben können. Abweichungen von 0.1 resp. 0.07 bei den C- und K-Faktoren für Parzelle 645 (vgl. Abbildung 5.8) führen beim resultierenden Bodenabtrag zu einem Unterschied vom Faktor 17.3 beim DHM25 resp. 17.6 beim DTM-AV. Dies ist ein Beispiel, wo Chisholm (2008) durch die gemittelten Werte die wahren Gegebenheiten überschätzt und somit einen viel zu hohen Bodenabtrag erhält. Denn die Parzelle 645 wird seit einigen Jahren nur noch als Kunstwiese genutzt und weißt deshalb, trotz der sehr steilen Lage am Frienisberg, sehr geringe Erosionsvorkommen auf.

	Gisler 2009	**Chisholm 2008**	**Faktor**
Parzelle 645			
K-Faktor	0.25	0.35	1.4
C-Faktor	0.006	0.08	13.33
Bodenabtrag in t/(ha*a) DHM 25m	0.81	14.01	17.3
Bodenabtrag in t/(ha*a) DHM 2m	1.62	28.29	17.6
Parzelle 735			
K-Faktor	0.29	0.35	1.2
C-Faktor	0.18	0.08	0.44
Bodenabtrag in t/(ha*a) DHM 25m	14.89	7.26	0.49
Bodenabtrag in t/(ha*a) DHM 2m	27.78	13.83	0.50

Tabelle 5.6: Eckdaten der Parzellen 645 und 735 in Frienisberg. Datengrundlage bilden die Ausgabetabellen der Berechnungen mit der AVErosions-Extension von Chisholm (2008) und Gisler (2009) (Variante 3 mit parzellenscharfen C- und K-Faktoren).

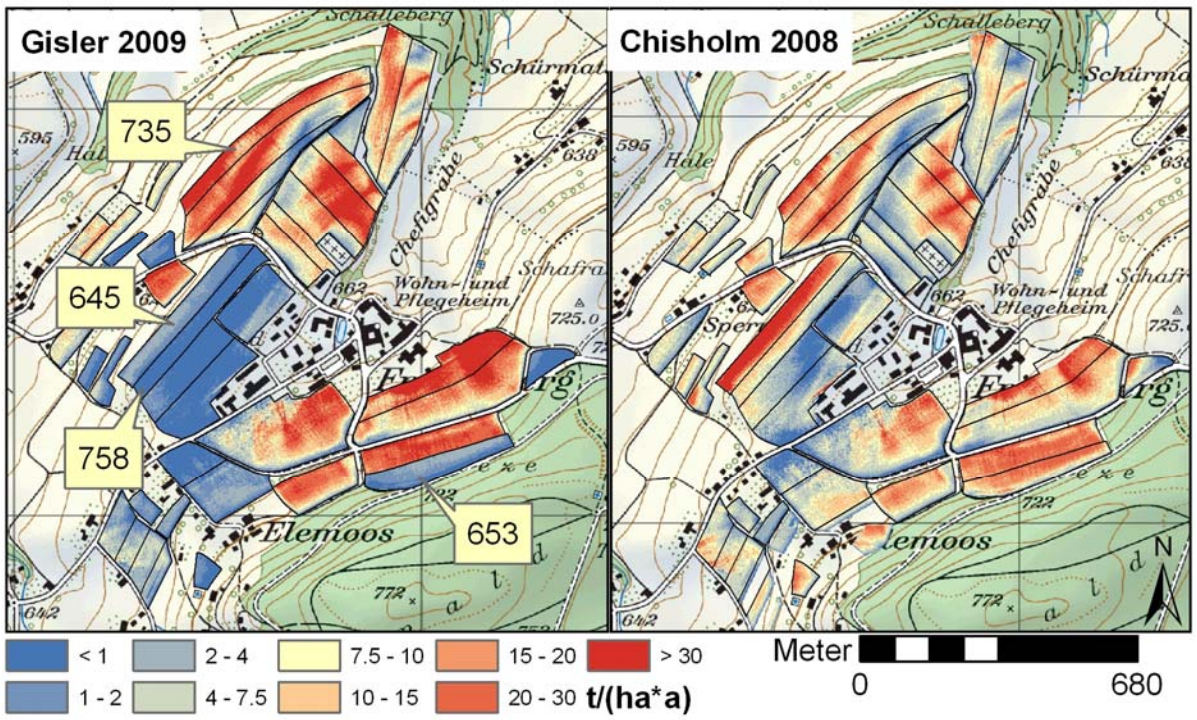


Abbildung 5.8: Bruttoerosion mit parzellenscharfem C- und K-Faktor für das Teilgebiet Frienisberg unter Verwendung des DTM-AV. Hervorgehoben sind die in Tabelle 5.6 erwähnten Parzellen 645 und 735. (Quelle: eigene Darstellung).

Anders verhält es sich bei Parzelle 735 (Abbildung 5.8), ebenfalls in Frienisberg gelegen. Dort liegen die K-Werte sehr nahe beieinander und der C-Faktor ist bei Gisler mit 0.18 gegenüber 0.08 von Chisholm mehr als doppelt so hoch. Im Endergebnis führen diese Differenzen der einzelnen Faktoren zu einem Unterschied der Bodenabtragsabschätzung von 7.63 t/(ha*a) beim DHM25 resp. 13.95 t/(ha*a) beim DTM-AV. Auch hier führen kleine Abweichungen zu betragsmässig grossen Differenzen im Endergebnis. Dies hat einerseits mit den verschiedenen C- und K-Faktoren zu tun, andererseits verstärken sich diese Tendenzen in einem steilen Gebiet wie Frienisberg durch hohe S-Faktoren noch weiter und führen dann zu diesen teilweise stark abweichenden Werten. Um die Auswirkungen und die Verteilung des S-Faktors zu verdeutlichen, ist nachfolgend eine Übersichtskarte aufgeführt, welche die S-Faktorwerte darstellt (Abbildung 5.9). Besonderes Augenmerk gilt hier dem Teilgebiet Frienisberg, welches die höchsten S-Werte zeigt. Ein anderes Bild zeigt sich in Schwanden, welches in der Lyssbachebene liegt und in Lobsigen (Seedorf-Mulde). Diese zwei Teilgebiete sind vorwiegend flach.

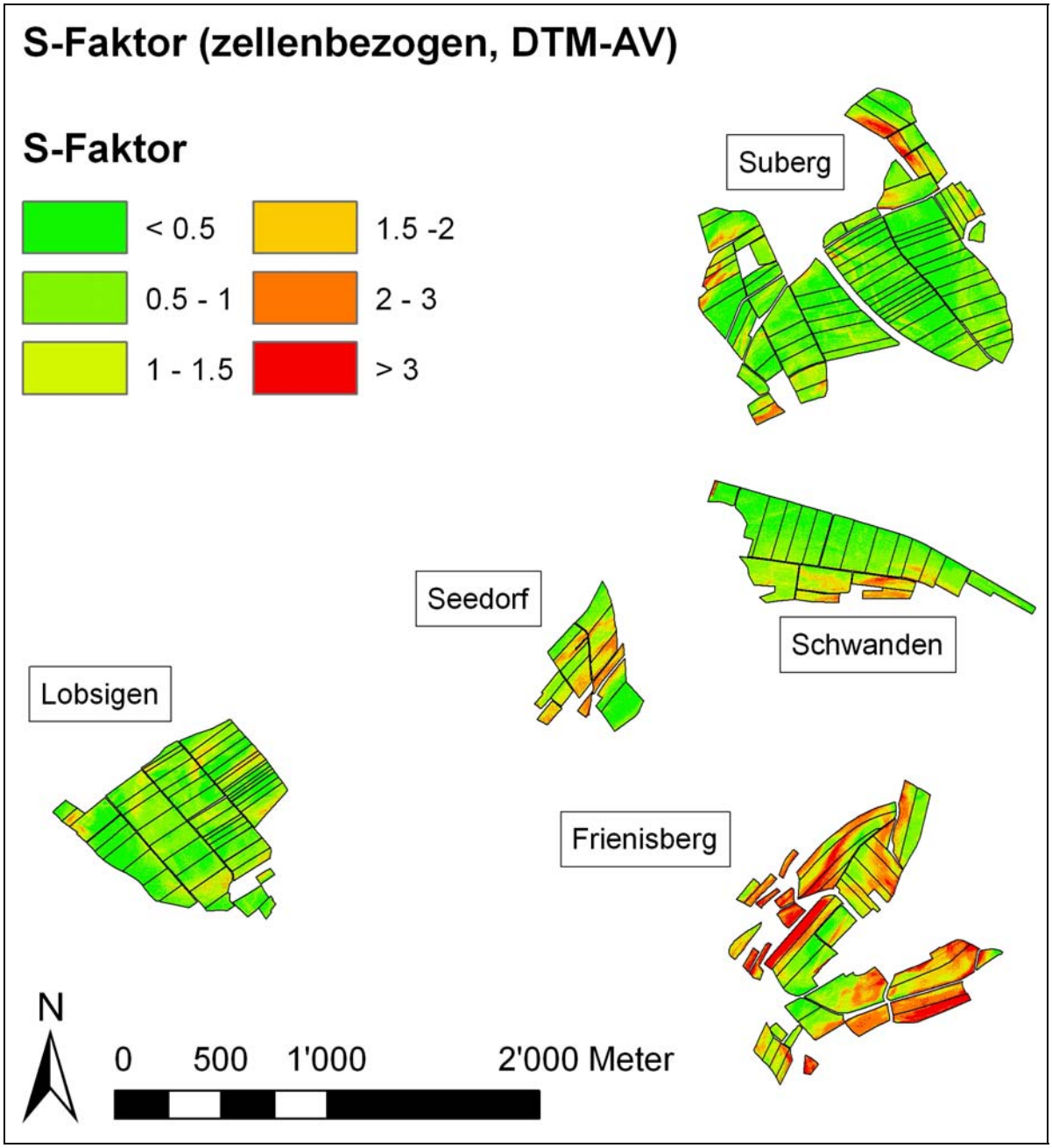


Abbildung 5.9: S-Faktor. Verteilung des S-Faktors, welcher ein Mass für die Hangneigung ist. Die Datengrundlage bilden die Berechnungen für die Variante 3 mit parzellenscharfem C- und K-Faktor unter Verwendung des DTM-AV. (Quelle: eigene Darstellung)

Schaut man weiter die relativen Differenzen an, zeigt sich ein anderes Bild als bei der Variante 2 mit parzellenscharfem K-Faktor (siehe Abbildung 5.10). Vieles ist in Rottönen eingefärbt, was auf höhere Werte von Gisler hinweist. Doch vor allem in Suberg gibt es etliche Parzellen, welche eine blaue, negative Abweichung aufweisen, die bis über 50% hinausgeht. Zur Erklärung dieser blau eingefärbten Parzellen sei darauf hingewiesen, dass rund 2/3 der Felder von Suberg einen geringeren K-Wert (0.23-0.34) aufweisen, als dies bei Chisholm (0.35) der Fall ist. Im Weiteren liegen die C-Werte bei rund der Hälfte aller Felder in diesem Gebiet unterhalb derjenigen von Chisholm. Diese beiden Punkte zusammen führen zu einer eher überschätzten Erosion von Chisholm in diesem Gebiet.

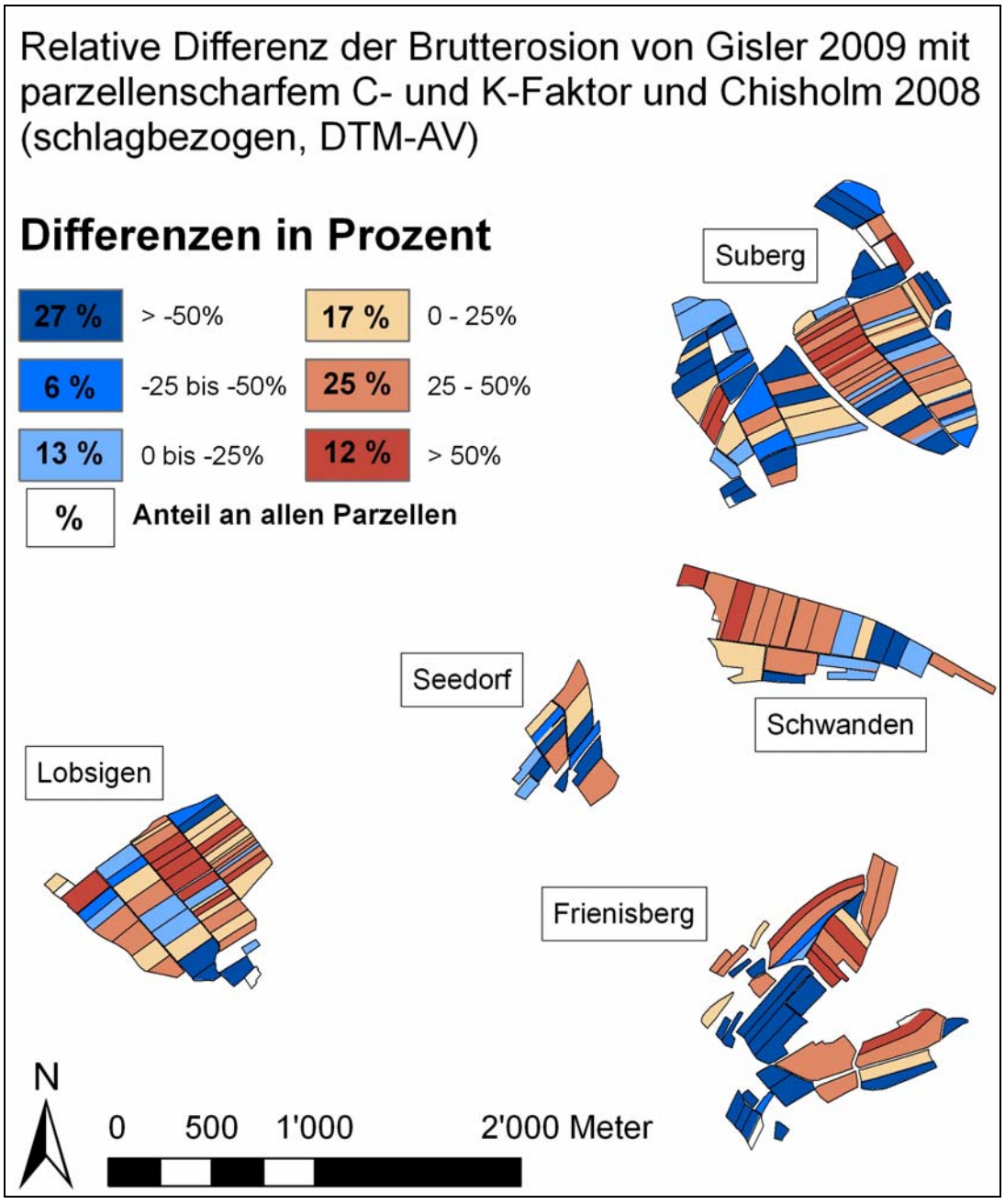


Abbildung 5.10: Relative Differenz zwischen den Schlägen von Gisler und Chisholm (DTM-AV). Relative Differenzen der Bodenabträge der schlagbezogenen Werte von Gisler mit parzellenscharfen C- und K-Faktordaten und jenen von Chisholm mit gemittelten Faktordaten. (Quelle: eigene Darstellung).

Das heterogene Bild von Abbildung 5.10 zeigt, dass es überall verhältnismässig grosse Abweichungen geben kann. So ist bei einer Parzelle, die einen Bodenabtrag von 2 t/(ha*a) aufweist, eine Abweichung von 1 t/(ha*a) schon eine Veränderung um 50%. Dieses Feld wäre dann in der Abbildung oben dunkelblau oder –rot eingefärbt. Da die klassifizierte Karte der Parzellen (Abbildung 5.7) aber weitgehend mit Chisholm übereinstimmt, fallen diese kleinen Abweichungen nicht so ins Gewicht.

5.4.2 Fazit der Variante 3

Auf Grund der klassifizierten Karte und deren grosser Übereinstimmung darf man davon ausgehen, dass die gebietsweise gemittelten Daten von Chisholm (resp. FRIEDLI 2006) eine recht gute Annäherung an die parzellenscharf erhobenen Daten bieten. Die Resultate aus Chisholm (2008) geben auf jeden Fall, ohne all zu grossen Aufwand bei der Datenbeschaffung, einen recht guten Überblick in welchen Grössenordnungen sich der Bodenabtrag bewegt. Für genaue Analysen und eine gezielte Massnahmenplanung würden sich aber genauere Abklärungen der Datenlage als zwingend notwendig erweisen, da z.B. Änderungen in der Nutzung zu extensiv verwendeten Flächen bei einer Generalisierung oder Abschätzung der Daten übergangen werden. Diese Flächen wirken aber in hohem Masse erosionsmindernd. Liegen sie dann in Mitten eines Steilhanges, wird bei der Auswertung dort eine hohe Gefährdung ausgewiesen, welche der Landwirt durch die Nutzungsänderung aber schon massiv abgeschwächt hätte. Deswegen ist es zweckmässig, die C-Faktoren parzellenscharf oder zumindest für Teilgebiete spezifisch zu erheben. Die grosse Bedeutung des C-Faktors gegenüber dem K-Faktor wurde auch durch die Tatsache bekräftigt, dass die Karten der Variante 1 (mit parzellenscharfem C-Faktor), sehr ähnlich aussahen wie die der Variante 3 (mit parzellenscharfem C- und K-Faktor). Die Karten der Variante 2 mit parzellenscharfem K-Faktor, als der C-Faktor ausgeklammert wurde, haben ein deutlich anderes Bild gezeigt. Diese Dominanz des C-Faktors gegenüber dem K-Faktor und seinen grossen Einfluss auf die Erosion wird in Kapitel 5.5.2 noch genauer besprochen.

5.5 Fazit aller Varianten

5.5.1 Auswirkungen der parzellenscharfen Faktordaten

Die drei besprochenen Varianten haben einen Vergleich zwischen gemittelten und parzellenscharfen Faktordaten ermöglicht. Bei der Auswertung der Varianten wurden Gemeinsamkeiten und Unterschiede herausgefiltert und Begründungen für deren Existenz aufgezeigt. Dies führte zu einigen Erkenntnissen, welche hier nochmals zusammengefasst werden.

Es stellte sich heraus, dass die parzellenscharfe Erfassung des K-Faktors für die Abschätzung der Bodenabträge eine eher untergeordnete Rolle spielt. Zwar kann sein Einfluss teilweise vermindernd auf die Erosion wirken, wie z.B. im Teilgebiet Frienisberg, wo eher tiefe K-Faktorwerte vorherrschen, jedoch überwiegt der C-Faktor im Zusammenspiel mit dem S-Faktor auch dort deutlich. Die gemittelten Abschätzungen des K-Faktors von FRIEDLI (2006) geben die tatsächlich vorkommenden Werte sehr gut wieder und bilden so eine sehr gute Grundlage für die Bodenabtragsabschätzung. Einerseits liegt dies am eher kleinen Wertespektrum dieses Faktors, welches in diesem Gebiet von 0.17 - 0.42 reicht. Dies entspricht einem Faktor von 2.5 und ist somit zehnmal kleiner als beim C-Faktor. Andererseits kann die Abschätzung des K-Faktors über Kenntnisse verschiedener anderer Faktoren, wie Bodenart und dazugehörige Durchlässigkeitsraten, aus diversem Kartenmaterial gut abgeleitet werden. Da der K-Faktor von den natürlichen Umgebungs- und Entstehungseigenschaften des Bodens abhängig ist und sich somit eher konstant verhält, sind gemittelte und abgeschätzte Werte sicherlich ein probates Mittel im Zusammenhang mit Bodenabtragsbestimmungen.

Die Tatsache, dass Variante 1 mit parzellenscharfem C-Faktor und Variante 3 mit parzellenscharfem C- und K-Faktor ziemlich ähnliche Werte aufweisen, spricht für die Dominanz des C-Faktors. Da die Bodenbearbeitung und –bedeckung sich von Parzelle zu Parzelle ändern kann und grundlegend nicht von irgendwelchen natürlichen Entstehungsprozessen abhängig ist, weist dieser Faktor eine starke Heterogenität in einzelnen Gebieten auf. Der Landwirt alleine entscheidet, wie er seine Felder bewirtschaftet und bestimmt somit auch den Wert für den C-Faktor. Dies ist auch daran zu erkennen, dass ab und zu mehrere Parzellen nebeneinander die gleichen Werte aufweisen, weil sie von den gleichen Landwirten bewirtschaftet werden und die gleiche Fruchtfolge aufweisen. Weiter ist das Wertespektrum ein wichtiger Grund für die Dominanz des C-Faktors. Dieser bewegt sich in Frienisberg von 0.01 bis 0.25, was einem Faktor von 25 entspricht. Diese Unterschiede sind enorm und haben sehr grossen Einfluss auf den Bodenabtrag. Dies kann einerseits zu sehr grossen Bodenabträgen führen, andererseits beinhaltet es aber auch Chancen für die Eindämmung solcher Ereignisse. Wenn man davon ausgeht, dass in stark gefährdeten Gebieten extensiver bewirtschaftet wird und somit tiefe C-Faktoren zu einer starken Verminderung des Bodenabtrags führen, sind die starken Effekte des C-Faktors sicherlich willkommen. Leider muss man dazu sagen, dass man nach der Analyse der Daten vom Teilgebiet Frienisberg von dieser Annahme nicht ausgehen kann. Denn in diesem Gebiet wird

trotz der hohen potentiellen Gefahr durch das steile Relief teilweise sehr intensiv bewirtschaftet, was bei einem hohen C-Faktor zu sehr hohen Bodenabträgen führt. Jedoch gibt es auch andere Beispiele, wie z.B. die Parzelle 645 (siehe Abbildung 5.8), welche in Tabelle 5.6 behandelt wurde. Dieses Feld liegt in einem sehr steilen und daher stark gefährdeten Gebiet. Durch den sehr geringen C-Faktor - wegen der extensiven Nutzung - werden dort aber kaum Erosionsprozesse registriert. Hier fragt man sich warum nicht in all diesen gefährdeten Gebieten auf extensive Bewirtschaftung umgestiegen wird, um den Bodenabtrag zu verhindern. Hier muss man aber im Sinne der Nachhaltigkeit und ihrer verschiedenen ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Komponenten auch die Betriebsstruktur und die Rentabilität eines Hofes in Betracht ziehen. Denn einem auf Ackerbau spezialisierten Bauer ohne Viehbestand nützt eine Kunstwiesenparzelle nichts. Um einen Ausweg aus dieser Situation zu finden, wurde im nächsten Teil der Arbeit versucht, eine Massnahmenplanung für bestimmte Parzellen durchzuführen. Unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Komponenten wurde versucht, die Bewirtschaftung dieser Parzellen so zu ändern, dass die negativen ökologischen Folgen - der Bodenabtrag - vermindert werden können.

5.5.2 Die Bedeutung der einzelnen Faktoren auf den Bodenabtrag

Die obengenannten Einflüsse der verschiedenen Faktoren auf den Bodenabtrag werden in der folgenden Tabelle 5.7 noch numerisch unterstützt. Hier wurden auf der Grundlage der Resultate aus Variante 3 Korrelationen zwischen den einzelnen Faktoren, Faktorenkombinationen und der resultierenden Erosion berechnet. Der Einfluss des Reliefs mit S- und L-Faktor, der zuvor immer wieder angesprochen wurde, kommt auch hier wieder zum Vorschein. Einerseits ist zu sehen, dass der C-Faktor - trotz seines grossen Einflusses gegenüber dem K-Faktor - nicht alleine für das Ausmass der Erosion verantwortlich gemacht werden kann (grünes Feld). Beim K-Faktor liegt ein leicht negativer Wert vor, welcher aber nicht als Korrelation gedeutet werden darf, da der Wert zu tief ist. Dies unterstreicht die oben genannten Aussagen, dass der K-Faktor nicht so einen grossen Einfluss auf das Ergebnis hat und somit eine Abschätzung der Faktordaten hier sinnvoll erscheint. Wenn man alleine den Relieffaktor (L*S) betrachtet (hellblaues Feld), sieht man, dass es eine stärkere positive Korrelation gibt. Dies bestätigt den Einfluss des Reliefs, vor allem der Hangneigung, wenn man noch den Wert im orangen Feld hinzuzieht. Bei diesem Feld wurde der S- und der C-Faktor miteinander kombiniert und es resultierte mit 0.859 ein sehr hoher Wert. Dies bedeutet auch, dass der S-Faktor gegenüber dem L-Faktor dominant ist. Kombiniert man nun den Relief- (L*S) mit dem C-Faktor, erhält man einen Korrelationswert von 0.985 (rotes Feld). Dieses hohe Mass an Korrelation widerspiegelt fast eine eins zu eins Abhängigkeit dieser drei Faktoren und der resultierenden Erosion. Dies bedeutet aber auch, dass der Relieffaktor alleine nicht ausreicht, um einen hohen Bodenabtrag zu generieren, es bedarf zusätzlich eines C-Faktors, welcher Erosionsvorgänge überhaupt zulässt. Das unterstreicht abermals den enormen Einfluss, der vom C-Faktor ausgeht. Einen solchen Fall wurde mit der Parzelle 645 in Tabelle 5.6 dargestellt. Dort ist die natürliche Disposition (starke Hangneigung) für erhöhte

Erosionsereignisse gegeben und trotzdem findet fast kein Bodenabtrag statt. Dies liegt klar an der Bewirtschaftung der Parzelle, bei welcher der Landwirt auf extensive Nutzung umgestellt hat (tiefer C-Faktor). Diese Intervention des Landwirtes ist eine direkte Massnahme auf Grund der natürlichen Gegebenheiten (Hangneigung). Er reagiert auf die potentielle Gefährdung seiner Parzelle, in dem er den C-Faktor durch Änderungen in der Bewirtschaftung reduziert. Würde man davon ausgehen, dass dies alle Landwirte so machen, müsste die Korrelation zwischen S- und C-Faktor stark negativ sein. Der Wert, der aus der Tabelle 5.7 entnommen werden kann, liegt mit -0.217 (gelbes Feld) nur leicht im negativen Bereich. Die geringe Korrelation dieser zwei Faktoren lässt darauf schliessen, dass man nicht davon ausgehen darf, dass alle Landwirte die Bewirtschaftung ihrer Felder an die natürlichen Gegebenheiten anpassen.
Zum Schluss lässt sich festhalten, dass der C-Faktor trotz des starken Einflusses des Relieffaktors ein sehr grosses Potential zur Verminderung von Erosionsereignissen hat, andererseits aber auch den Bodenabtrag zusätzlich verstärken kann. Es wäre somit wünschenswert, wenn die Korrelation zwischen S- und C-Faktor noch stärker würde.

Faktoren	*K*	*L*	*S*	*C*	L*S	S*C	L*S*C
K	1						
L	-0.204	1					
S	-0.446	0.336	1				
C	0.133	0.001	-0.217	1			
L*S	-0.401	0.726	0.832	-0.098	1		
S*C	-0.218	0.348	0.439	0.637	0.505	1	
L*S*C	-0.232	0.635	0.425	0.467	0.682	0.881	1
Erosion	-0.111	0.624	0.374	0.502	0.638	0.859	0.985

Tabelle 5.7: Korrelationswerte zwischen den einzelnen Faktoren, Faktorkombinationen und der resultierenden Erosion. Grundlage der Werte sind die Berechnungen der Variante 3 mit parzellenscharfem C- und K-Faktor und DTM-AV. (Quelle: eigene Darstellung).

5.6 Evaluation der berechneten Bodenabtragsabschätzungen

Das Hauptaugenmerk dieses Teils der Arbeit galt dem Vergleich mit CHISHOLM (2008) und den Aussagen über die Einflüsse von parzellenscharfen Faktordaten. Die Evaluierung der Daten trat eher in den Hintergrund.
In diesem Kapitel werden einige Vergleiche mit kartierten Daten angesprochen, um aufzuzeigen, wie die modellierten Daten zu deuten und zu verwenden sind. In CHISHOLM (2008) wurde der Vergleich von modellierten Bodenabtragsabschätzungen mit AVErosion und kartierten Daten schon gemacht. Dies ist ein weiterer Grund, weshalb hier auf eine detailliertere Analyse verzichtet wird. Ein weiterer Grund ist, dass Volker Prasuhn, welcher seit über 10 Jahren im Gebiet Frienisberg Erosionsereignisse kartiert und somit über einen grossen Erfahrungsschatz verfügt, diese Gegenüberstellung und Analyse der modellierten Daten selbst machen wird. Im Folgenden werden einige seiner ersten Erkenntnisse kurz angesprochen.

Bei den Vergleichen der Daten von CHISHOLM (2008) und PRASUHN & GRÜNIG (2001) hat man gesehen, dass die Abschätzungen mit der AVErosion-Extension generell eher die Erosionsvorkommnisse überschätzen[3]. Da die Resultate dieser Arbeit noch leicht höher liegen als die von CHISHOLM (2008), liegt es auf der Hand, dass auch die vorliegenden Modellierungen im Vergleich mit den kartierten Daten zu hohe Ergebnisse liefern (vgl. Tabellen 5.1, 5.3, 5.5). Durch die zum Teil massiv höheren C-Faktoren, welche in dieser Arbeit eingesetzt wurden, kommen die höheren Bodenabträge gegenüber jenen von CHISHOLM (2008) zustande. Der Nutzen der parzellenscharfen Faktordaten ist nicht in der genaueren Berechnung der absoluten Bodenabträge zu sehen, sondern kommt dann zum Vorschein, wenn Parzellen z.B. neu extensiv bewirtschaftet werden und somit einen tiefen Erosionswert erhalten, was bei einer Mittelung wie bei CHISHOLM (2008) nicht erfasst würde. Umgekehrt werden z.B. auch solche Gebiete mit guten Bodeneigenschaften, aber intensiver Bewirtschaftung (hoher C-Faktor), als gefährdet und somit mit hohen Erosionswerten ausgewiesen. Die Beurteilung der Felder kommt den realen Gegebenheiten also mit parzellenscharfen Faktordaten näher, aber die absoluten Werte überschätzen den tatsächlichen Bodenabtrag zum Teil recht stark. Dies hat sich vor allem in den ersten Analysen von Volker Prasuhn im Vergleich mit seinen kartierten Daten herauskristallisiert.

Bei der ersten Gegenüberstellung der Bodenabtragsabschätzungen mit AVErosion unter Verwendung parzellenscharfer C- und K-Faktoren und dem DTM-AV mit den kartierten Daten von Volker Prasuhn kamen folgende Erkenntnisse zum Vorschein:

Die modellierten Werte wiesen zum Teil massiv höhere Bodenabträge auf, als dies bei den Kartierungen der Fall war (bis Faktor 10, bei tiefen Werten). Bei der Kartierung gab es etliche Parzellen die in 10 Jahren keine Erosionsereignisse zu verzeichnen hatten, dies ist beim Modell nie der Fall. Beim Vergleich der stärker betroffenen Parzellen beträgt der Unterschied nur noch ungefähr Faktor 4. Dies ist immer noch eine massive Überschätzung, aber wie oben erwähnt, ist man von dem eigentlich ausgegangen. Der Nutzen des Programms liegt mehr bei der relativen Abschätzung. Dazu ist auch noch zu sagen, dass die Kartierung den Bodenabtrag auch eher unterschätzt, was den Unterschied zusätzlich noch grösser werden lässt. Denn bei der Kartierung ist es sehr schwierig, schleichende Prozesse wie die flächenhafte Erosion exakt abzuschätzen. Rillen- und Rinnenformen können dagegen recht gut abgeschätzt werden.

Weitere Analysen zeigten aber auch erfreuliche Resultate. 11 der 14 Parzellen, welche bei der Kartierung hohe Erosionswerte aufwiesen, wurden auch bei der Modellierung als stark gefährdet ausgewiesen. Zwei der drei Parzellen mit Abweichungen hatten in den letzten Jahren einmal ein Extremereignis. Somit wurde nur eine Parzelle vom Programm unterschätzt. 26 Parzellen wurden bei AVErosion mit hoher Erosion (> 8 t/(ha*a)) ausgewiesen, 16 dieser 26 Parzellen haben ebenfalls bei der Kartierung erhöhte Werte. Bei den 10 fehlenden Parzellen wurde bisher keine gravierende Erosion festgestellt.

[3] Gemäss diversen Autoren (Zusammenstellung in PRASUHN & GRÜNIG 2001) überschätzen USLE-basierte Modelle den Bodenabtrag bei geringen Abträgen <10 t/(ha*a) massiv.

Dies kann daran liegen, dass die Kartierung erst seit 10 Jahren andauert, die Modellierung mit der MUSLE87 aber von einem langjährigen Mittel über 20 Jahre ausgeht. Andererseits kann man dies auch positiv werten, da man so mit den Abschätzungen durch AVErosion tendenziell auf der sicheren Seite ist, da eher zu viele Parzellen als gefährdet ausgewiesen werden, als zu wenige. Die gefährdeten Parzellen werden durch das Programm gut erkannt. Dies ist sicherlich als positive Erkenntnis zu registrieren.
Es kann abschliessend gesagt werden, dass die absoluten Werte, welche aus der Modellierung mit AVErosion resultieren, nicht direkt verwendet werden können. Sie bieten mehr einen Überblick über die Verteilung der gefährdeten Parzellen und geben somit Hinweise auf Gebiete, bei welchen eventuell reagiert werden müsste. Weiter zeigen sie trotz der teilweisen Überschätzung, die Grössenordnungen des Bodenabtrags im modellierten Gebiet auf. Die erhöhten Werte liegen auch nicht beim Programm selbst, sondern bei dem angewendeten Modell, der USLE. Dies bestätigte auch der Autor des Programms, Dr. Holger Schäuble. Somit müssten die verschiedenen Berechnungen der einzelnen Faktoren der MUSLE87, welche durch BORK & HENSEL (1988) modifiziert wurde und durch SCHWERTMANN et al. (1999) an mitteleuropäische Verhältnisse angepasst wurden, überarbeitet werden.
Um die Aussagen vom Abschnitt weiter oben zu unterstreichen, dass eigentlich die gefährdeten Parzellen recht gut erkannt werden und somit der Realitätsbezug der Modelldaten vorhanden ist, folgen nun einige Bilder mit entsprechenden Karten aus dem Gebiet Frienisberg (Abbildung 5.11, 5.12, 5.13). Die Fotografien stammen von Hanspeter Liniger anlässlich einer gemeinsamen Feldbegehung im Oktober 2008 und sollen den Nutzen und die Verwendbarkeit der Daten unterstreichen.

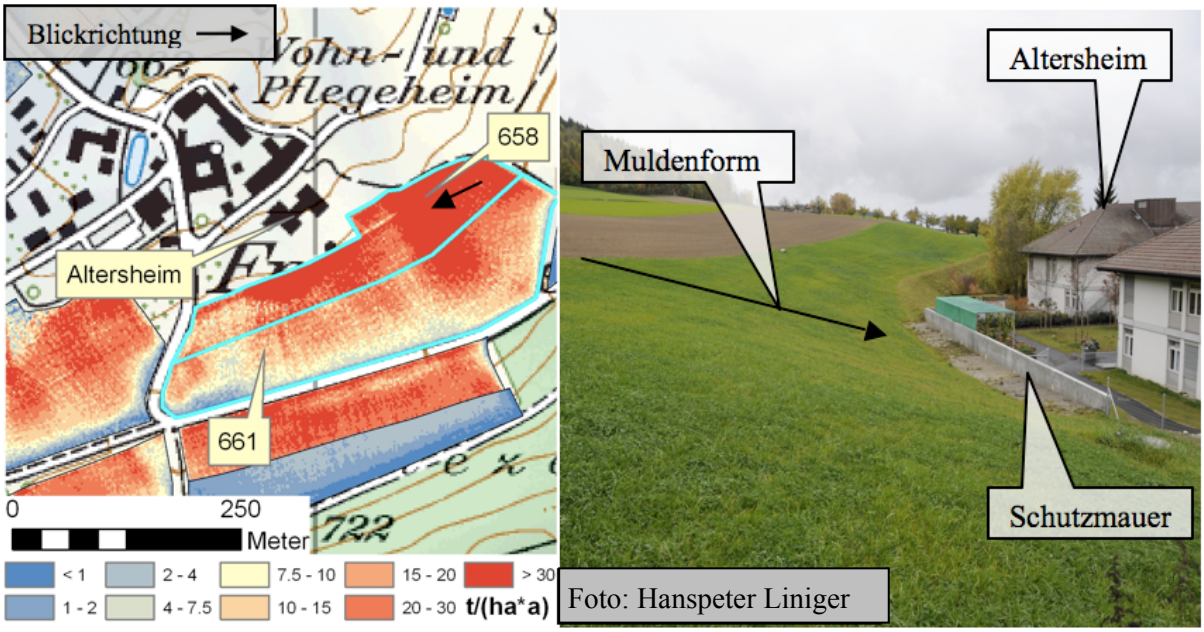


Abbildung 5.11: Die Abbildung zeigt die modellierte Bruttoerosion mit AVErosion, unter Verwendung parzellenscharfer C- und K-Faktoren und des DTM-AV im Teilgebiet Frienisberg (links). Rechts ist die aktuelle Situation zu sehen. Vor dem Altersheim Frienisberg wurde eine Schutzmauer errichtet, dies auf Grund zahlreicher Probleme mit eingeschwemmtem Bodenmaterial.

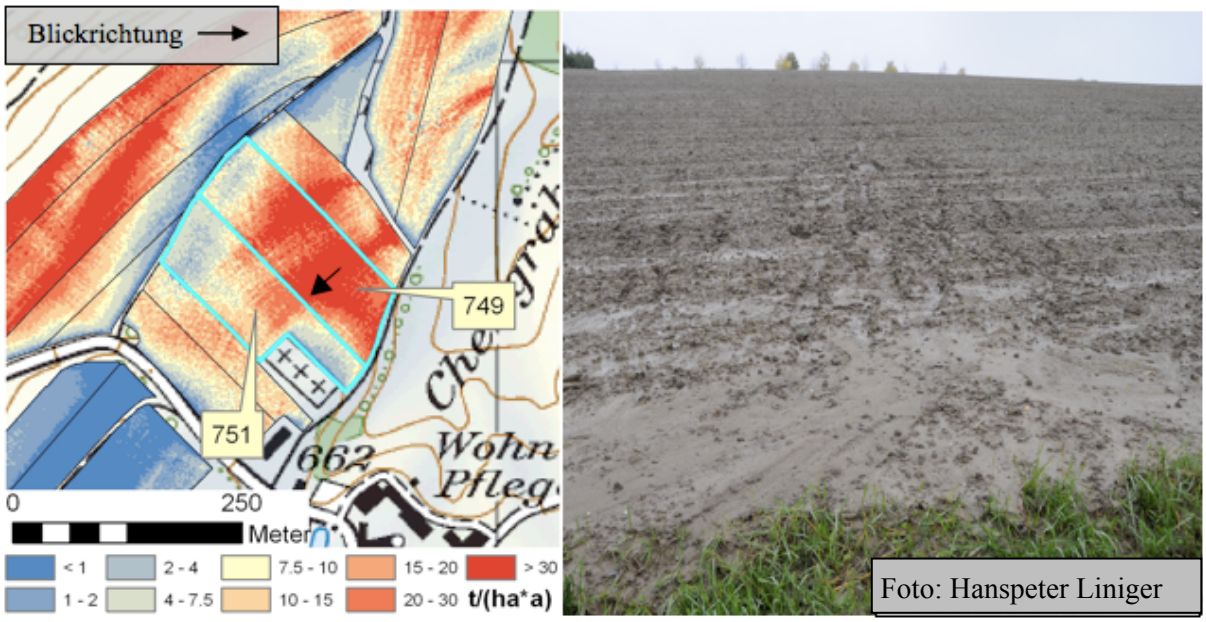


Abbildung 5.12: Die Abbildung zeigt die modellierte Bruttoerosion mit AVErosion, unter Verwendung parzellenscharfer C- und K-Faktoren und des DTM-AV im Teilgebiet Frienisberg (links). Rechts ist die aktuelle Situation bei der Feldbegehung im Oktober 2008 zu sehen. In der Muldenform hat die Erosion sich verstärken können. Das angebaute Wintergetreide war noch zu klein, um den Boden stabilisieren zu können und so wurde über die gesamte Fläche der Parzelle Bodenmaterial erodiert und ausgeschwemmt.

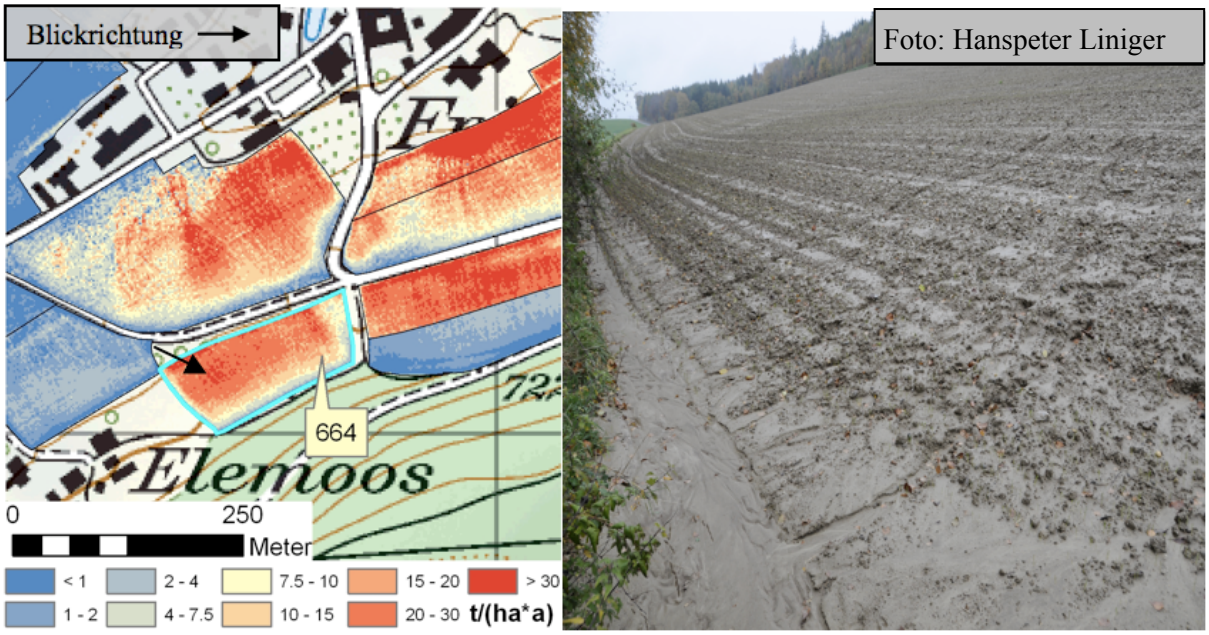


Abbildung 5.13: Die Abbildung zeigt die modellierte Bruttoerosion mit AVErosion, unter Verwendung parzellenscharfer C- und K-Faktoren und des DTM-AV im Teilgebiet Frienisberg (links). Rechts ist gut zu sehen, wie über die ganze Parzelle parallele Rillen verlaufen und sich das Erdmaterial an einer Hecke am unteren Ende der Parzelle sammelt. Auf dem Feld wurde Winterweizen nach Kartoffeln angepflanzt.

6. MASSNAHMENPLANUNG MIT DER EXTENSION AVEROSION

6.1 CPmax-Szenarien

Die CPmax-Szenarien und die verschiedenen dazu erarbeiteten Szenarien, sollen den ersten Schritt für eine Massnahmenplanung mit der Extension AVErosion bilden. Hier wurde versucht eine Massnahmengrundlage zu erarbeiten um die Erosion im Gebiet Frienisberg zu reduzieren. Bei den CPmax-Szenarien geht es in erster Linie um flächenhafte Massnahmen, welche die Bodenbedeckung und –bearbeitung in Betracht ziehen.

6.1.1 Funktionsweise und Datengrundlage der CPmax-Szenarien

Die CPmax-Szenarien wurden in Kapitel 3.2 schon kurz angesprochen. Sie bieten neben der vorher verwendeten Bruttoerosion und der in dieser Arbeit nicht gebrauchten Stoffbilanz eine weitere Berechnungsmöglichkeit in der AVErosion-Extension. Bei diesen Szenarien geht es um die maximal zulässige Nutzungsintensität auf Ackerfeldern. Die Nutzungsintensität wird durch den Bodenbearbeitungs- und –bedeckungsfaktor (C-Faktor) bestimmt. Umso intensiver der Boden bearbeitet und bewirtschaftet wird, desto höher ist der C-Faktor und somit auch die Nutzungsintensität. Dies überträgt sich dann durch die Multiplikation mit den anderen Faktoren der MUSLE87 auch auf den abgeschätzten Bodenabtrag. Bei den CPmax-Szenarien wird versucht, bei einer vorgegebenen Toleranzschwelle (tolerierbarer Bodenabtrag), die maximale Nutzungsintensität bzw. den maximalen C-Faktor zu berechnen, der an einer bestimmten Stelle vorhanden sein darf, um diese vorgegebene Schwelle nicht zu überschreiten.
Dies geschieht einerseits in einer zellgenauen Karte, bei welcher für jedes Pixel dieser Wert berechnet wird. Andererseits werden diese Werte in einer zweiten Karte für jede Parzelle gemittelt und ein einheitlicher Wert pro Parzelle wird ausgegeben. Die Eingabedaten, welche für die Berechnungen notwendig sind, sind die gleichen wie bei der Berechnung der Bruttoerosion, mit dem Unterschied, dass anstatt des C-Faktorrasters ein Toleranzwert eingegeben wird. In diesem Teil der Arbeit wurden als Grundlage der Berechnungen die gleichen Daten wie bei der Variante 3 bei der Bruttoerosion (Kapitel 5.1/5.4) verwendet. Die Eingabe der Daten in die AVErosion-Extension geschieht wie in Abbildung 6.1 beispielhaft dargestellt.

Dies sind die verwendeten Grundlagendaten für die Berechnung der CPmax-Szenarien:

- Niederschlagsraster (FRIEDLI 2006)
- Parzellenplan, aktualisiert 2008 (PRASUHN 2008, Amtliche Vermessung Bern)
- Parzellenscharfer K-Faktor (PRASUHN & GRÜNIG 2001)
- DTM-AV (swisstopo 2005)
- Toleranzwert (7.5 t/(ha*a))

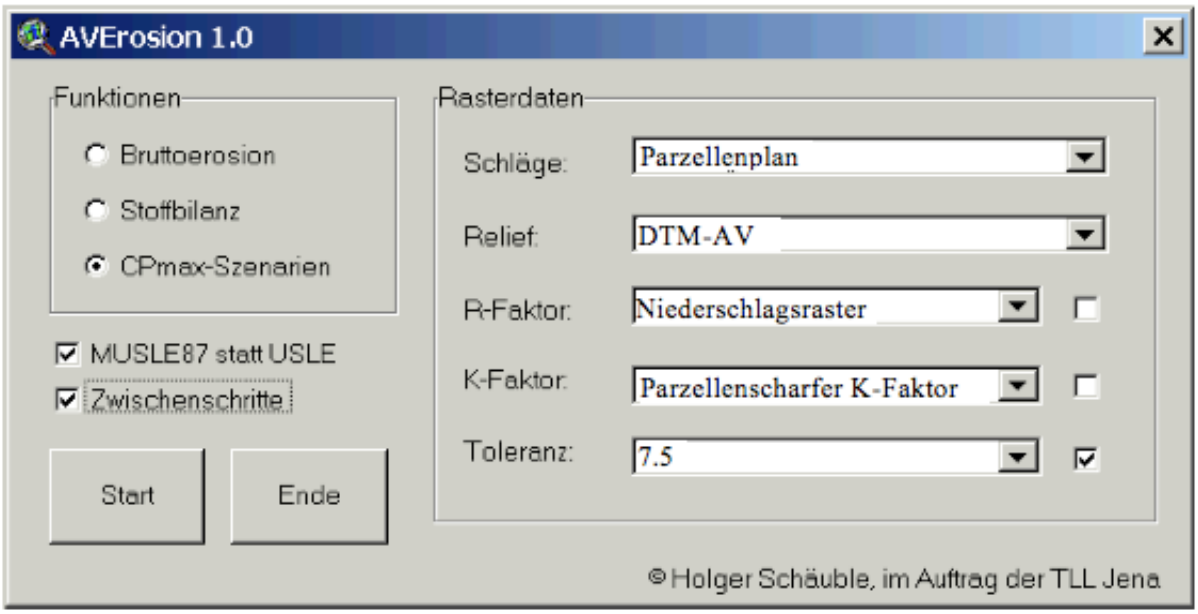


Abbildung 6.1: Berechnung der maximalen Nutzungsintensität mit ausgewählten Analyseoptionen. Hier ist Beispielhaft dargestellt, welche Datensätze in AVErosion eingelesen werden müssen, um die Berechnung der CPmax-Szenarien durchführen zu können. (Quelle: SCHÄUBLE 2005, abgeänderte Darstellung).

6.1.2 Toleranzwert

Der Toleranzwert von 7.5 t/(ha*a) wurde nach eigenem Ermessen festgelegt. Bestimmungen über die maximal zulässigen Bodenabträge in der Schweiz sind in der Verordnung über die Belastung von Böden (VBBo 1998) festgehalten. Dort wird ein mittlerer jährlicher Bodenabtrag von 2 t/(ha*a) für flachgründige Böden, resp. 4 t/(ha*a) für tiefgründige Böden als Richtwert angegeben, welcher nicht überschritten werden darf. Der Wert für tiefgründige Böden bildet die Ausgangslage bei der Ermittelung des hier eingesetzten Toleranzwertes[4]. Ausschlaggebend für die Erhöhung des Wertes war die Annahme, dass die vom Programm berechneten Bodenabträge tendenziell zu hoch sind (siehe Kapitel 5.6). Deshalb wurde der Toleranzwert auf das Doppelte gesetzt, also 8 t/(ha*a). Die Bodenabträge sollten aber unterhalb dieser Schwelle liegen. Deshalb viel die Wahl auf 7.5 t/(ha*a), weil dies der nächst tiefere Wert in AVErosion ist, den man auswählen konnte. Ausserdem sollten die eigentlichen ‚hot spots' bezüglich Erosion erfasst und einer Massnahmenplanung unterzogen werden.

6.1.3 Basis für Massnahmenplanung

Auf Grund dieser neu berechneten maximalen C-Faktorwerte kann versucht werden, die Bearbeitungsmethoden und die angebauten Kulturen auf den Feldern so zu verändern, dass der C-Faktor auf den Wert dieser maximal berechneten Nutzungsintensität kommt. Mit diesen getroffenen Massnahmen wäre gewährleistet, dass dieses Feld den vorgegebenen Toleranzwert nicht überschreitet. Die CPmax-Szenarien sollen hier beispielhaft den ersten

[4] Im Gebiet Frienisberg ist überwiegend mit tiefgründigen Böden zu rechnen

Schritt für eine Massnahmenplanung zur Reduktion des Bodenabtrags bilden. Auf der Grundlage der hier berechneten C-Werte werden Veränderungen und Massnahmen getroffen, die den Erosionsereignissen entgegen wirken sollen. Dies geschieht an sechs ausgewählten Parzellen. Diese wurden auf Grund ihres erhöhten Bodenabtrags bei der Berechnung der Variante 3 bei der Bruttoerosion ausgewählt. Fünf dieser Parzellen liegen in Frienisberg, das am stärksten von Erosion betroffen ist und eine Parzelle liegt in Suberg. Die sechs Parzellen repräsentieren verschiedene Gruppen von betroffenen Feldern. Sie liegen alle unterschiedlich hoch über dem gewählten Schwellenwert von 7.5 t/(ha*a). Angefangen mit der Parzelle 235 in Suberg mit einem mittleren jährlichen Bodenabtrag von 8.28 t/(ha*a) bis hin zur Parzelle 735 in Frienisberg mit 27.78 t/(ha*a). Die ausgewählten Felder mit ihren verschiedenen Erosionspotentialen sollen helfen, aufzuzeigen, wie bei unterschiedlich stark betroffenen Parzellen reagiert werden kann, um die Erosion in den Griff zu bekommen. Man kann davon ausgehen, dass bei der Parzelle 235 geringere Veränderungen vorzunehmen wären, als dies bei der sehr stark von Erosion betroffenen Parzelle 735 der Fall sein würde.

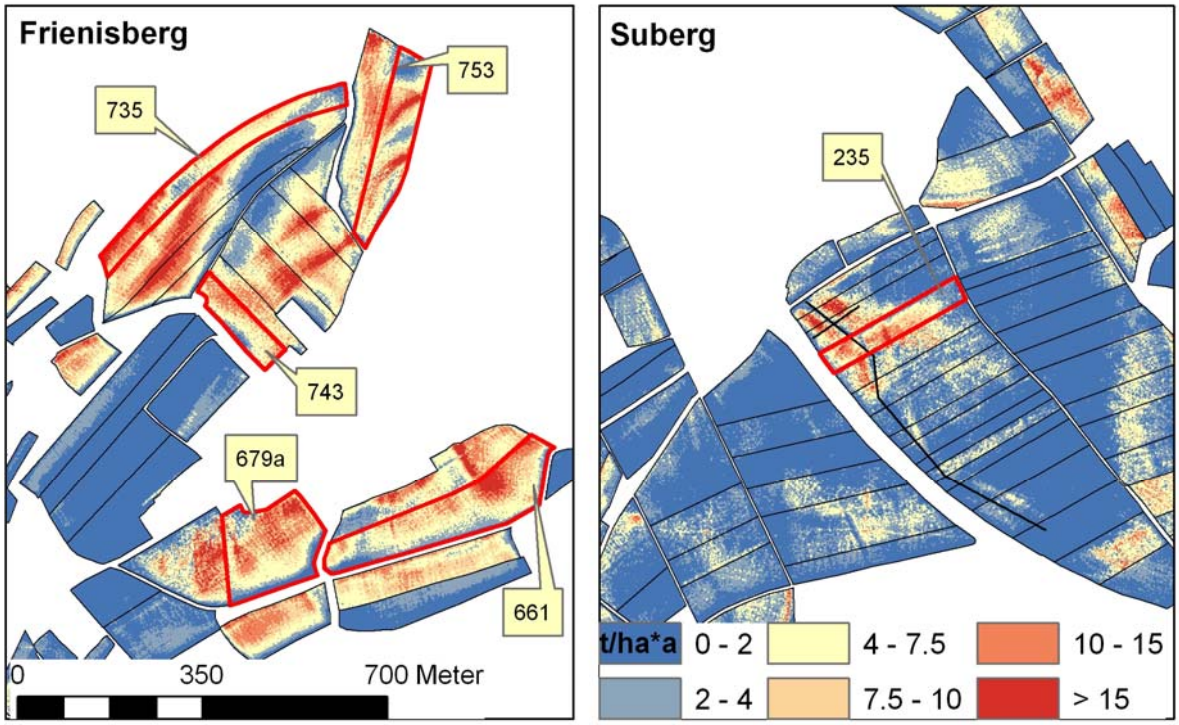


Abbildung 6.2: Ausschnitte der Teilgebiete Frienisberg (links) und Suberg (rechts). Rot markiert und beschriftet sind die sechs ausgewählten Parzellen für die Massnahmenplanung. Grundlage der Karte sind die Abschätzungen der Bruttoerosion von Gisler (2009) mit parzellenscharfen C- und K-Faktoren und dem DTM-AV.

6.1.4 Die Szenarien

Zuerst wurde mit den oben aufgeführten Grundlagedaten eine einzelne Berechnung der CPmax-Werte durchgeführt. Nachdem diese Ergebnisse analysiert wurden, wurden einige Unstimmigkeiten festgestellt. Zum Teil erhielt man vom Programm unrealistische Werte. Diese Unstimmigkeiten betreffen vor allem die Karte mit den gemittelten Werten für die Parzellen. Diese ist für die angestrebten Ziele sinnvoll, denn in der Praxis braucht man nicht für jedes einzelne Pixel einen neuen C-Wert zu bestimmen. Das Ziel sollte ein C-Wert sein, der für die ganze Parzelle genommen werden kann und im Endeffekt den Schwellenwert 7.5 t/(ha*a) nicht überschreitet. Deswegen wurde vor allem diese Karte in Betracht gezogen und auch mit diesen Werten gearbeitet.

Ein grosses Problem, das bei der Berechnung der maximalen Nutzungsintensität (C-Faktor) mit den CPmax-Szenarien von AVErosion auftauchte, waren z.B. bei einigen Parzellen höher berechnete C-Werte, als dies ursprünglich der Fall war, obwohl die Parzelle ursprünglich schon über dem Schwellenwert lag. Das heisst, AVErosion gab für diese Parzellen an, dass sie eigentlich noch intensiver bewirtschaftet werden könnten, obwohl der mittlere Bodenabtrag dieser Parzellen schon über dem Schwellenwert lag. Ursache dafür ist:

- CPmax berechnet für jeden einzelnen Pixel auf Grund seiner potentiellen Erosionsgefährdung und des angegebenen Schwellenwertes einen passenden C-Wert.
- Diese Pixelwerte sind korrekt und machen Sinn.
- Für die Ausgabe der gemittelten Werte für die einzelnen Parzellen wird nun aber einfach der Mittelwert aller neu berechneten C-Werte innerhalb einer Parzelle genommen.
- Bei Parzellen mit unterschiedlichen Erosionsdispositionen, z.B. ein flaches Teilstück mit wenig Erosion und ein steileres Gebiet der gleichen Parzelle mit höherer Erosion, führen diese Mittelwerte teils zu überhöhten Werten.
- Die einzelnen Pixelwerte sind so ausgerichtet, dass bei jedem Pixel der Bodenabtrag gleich dem Schwellenwert ist.
- Schwach betroffenen Pixel erhalten hohe C-Werte und stark betroffene sehr tiefe.
- Der Mittelwert liegt nun deutlich höher als die kleinsten Werte für die stark betroffenen Pixel und führt bei diesen im Endeffekt zu höheren Bodenabträgen als der Schwellenwert erlauben würde.

Diese Problematik ist in folgendem Beispiel noch erklärt:

Ursprünglicher C-Faktor

0.1	0.1	0.1	0.1
0.1	0.1	0.1	0.1
0.1	0.1	0.1	0.1
0.1	0.1	0.1	0.1

Mittel: 0.1

Ursprüngliche Erosion

5	5	5	25
5	5	5	25
5	5	5	25
5	5	5	25

Mittel: 10 t/(ha*a)

Schwellenwert 7.5 t/(ha*a)

7.5	7.5	7.5	7.5
7.5	7.5	7.5	7.5
7.5	7.5	7.5	7.5
7.5	7.5	7.5	7.5

Mittel: 7.5 t/(ha*a)

Neuer C-Wert

0.15	0.15	0.15	0.03
0.15	0.15	0.15	0.03
0.15	0.15	0.15	0.03
0.15	0.15	0.15	0.03

Mittel: 0.12

Erosion mit neuem C-Wert

6	6	6	30
6	6	6	30
6	6	6	30
6	6	6	30

Mittel: 12 t/(ha*a)

(Quelle: eigene Darstellung)

Rechenbeispiel (gelbe Zelle):

Der ursprüngliche C-Faktor ist für jede Zelle innerhalb eines Schlages gleich, da dieser den gleichen Nutzungsbedingungen untersteht. Im Beispiel wurde ein C-Faktor von 0.1 gewählt. Die Erosionsberechnungen mit AVErosion ergaben die Resultate in der Tabelle „Ursprüngliche Erosion“. Für unsere Zelle also 5 t/(ha*a). Hier kann es von Zelle zu Zelle Unterschiede durch das Relief geben[5]. Es wurde dann ein Schwellenwert von 7.5 t/(ha*a) festgelegt. Dieser sollte nachdem CPmax-Szenario von keiner Zelle überschritten werden. Also werden nun die neuen C-Faktoren berechnet und zwar mittels des Faktors, der sich aus der Division des Schwellenwertes mit dem Wert der Ursprünglichen Erosion ergibt (siehe **Schritt 1**). Ein Faktor >1 gibt an, dass diese Zelle in Bezug auf den Schwellenwert intensiver genutzt werden könnte, somit kann der C-Faktor erhöht werden, umgekehrtes gilt für einen Faktor <1. Mittels des Faktors wird nun ein neuer C-Faktor für jede Zelle berechnet (siehe **Schritt 2**). Schritt 1 und 2 werden nun für jede Zelle wiederholt und am Schluss wird das Mittel aller C-Faktoren berechnet (siehe **Schritt 3**). Nun kann man mit dem Verhältnis zwischen dem neuen Mittel des C-Faktors und dem Mittel des ursprünglichen C-Faktors (siehe **Schritt 4**) die neue Erosion ausrechnen. Dazu setzt man dieses Verhältnis mit der ursprünglichen Erosion in Verbindung (siehe **Schritt 5**). Als letzten **Schritt 6** wird nun noch das Mittel der neuen Erosion für die ganze Parzelle berechnet.

Rechenschritte:

Schritt 1 :	7.5 t/ha*a : 5 t/ha*a	= 1.5
Schritt 2 :	0.1 * 1.5	= 0.15 (neuer C-Wert)
Schritt 3 :	(12 * 0.15 + 4 * 0.03) / 16	= 0.12
Schritt 4 :	0.12 / 0.1	= 1.2
Schritt 5 :	5 t/ha*a * 1.2	= 6 t/ha*a
Schritt 6 :	(12 * 6 + 4 *30) / 16	= 12 t/ha*a

[5] So wurde im Beispiel für die Zellen in Spalte 4 ein stärkeres Relief angenommen, was einen Abtrag von 25 t/(ha*a) ergibt.

Das Mittel der neuen Erosion liegt mit 12 t/(ha*a) nun deutlich über dem Schwellenwert und auch höher als der Ausgangswert von 10 t/(ha*a). Dies soll die Problematik des Programms aufzeigen, wenn man versucht die ausgegebenen Werte flächendeckend auf eine ganze Parzelle umzusetzen.

Auf Grund dieser Probleme wurde nun untersucht, wie mit diesen Daten zu Arbeiten ist und welche Resultate sie liefern. Im Folgenden finden sich verschiedene Szenarien, welche aufeinander aufgebaut sind. Die verschiedenen Szenarien bilden die unterschiedlichen Verwendungen der durch das CPmax-Szenario berechneten Werte ab. Das heisst die vom Programm ausgegebenen neuen C-Faktoren wurden in unterschiedlicher Weise für eine erneute Berechnung des Bodenabtrags verwendet. In erster Linie ging es darum, herauszufinden, wie diese CPmax-Daten verwendet werden können und welche Auswirkungen sie auf den Bodenabtrag haben. Weiter sollte der Nutzen für eine Massnahmenplanung erörtert werden. Dies wurde hauptsächlich an den sechs ausgewählten Parzellen getestet. Die Parzelle 679 war ein gutes Beispiel für eine heterogene Parzelle mit unterschiedlichem Erosionspotential, wie es im Rechenbeispiel weiter oben erwähnt wurde. Sie wurde deshalb versuchsweise getrennt, in einen stark betroffenen Teil 679a und einen schwach betroffenen Teil 679b.
Als Grundlagen- und Vergleichsdaten wird hier immer von der Variante 3 mit parzellenscharfen C- und K-Faktoren ausgegangen. Diese Daten lieferten, wie oben schon erwähnt, auch die Grundlage zur Berechnung des CPmax-Szenarios. Diese Variante wird im folgenden Verlauf Variante CK 2m oder kurz Variante CK genannt. CK bezeichnet die parzellenscharf eingesetzten Faktordaten und 2m die Auflösung des verwendeten digitalen Höhenmodells, DTM-AV. Ist von „ursprünglichen Werten“ die Rede, sind ebenfalls die Werte dieser Variante gemeint.

6.2 Szenario 1

6.2.1 Grundlagen für Szenario 1

Die Grundlage für das erste Szenario waren die durch das CPmax-Szenario berechneten neuen C-Werte für die sechs ausgewählten Parzellen. Die schlagbezogene Karte der CPmax-Werte wurde mit dem P-Faktorraster multipliziert, um so die Erosionsschutzmassnahmen von den eigentlichen C-Werten zu trennen. Diese Werte wurden dann für die Parzelle gemittelt, da der P-Faktorraster zellgenau vorlag. Nun hatte man sechs neu berechnete C-Faktorwerte für die ausgewählten Parzellen. Um diese Werte auch mit praxisnahen Bezügen verknüpfen zu können, wurden sie mit der Fruchtfolgefaktor-Berechnung (kurz: C-Faktortool) aus dem Programm „Bodenerosion selber abschätzen“ von MOSIMANN & RÜTTIMANN (2002) ermittelt. Die Prinzipien dieser Berechnung wurden im Kapitel 3.3.3 (unter „Parzellenscharfe C-Faktoren“) schon ausgehend erläutert. Für die sechs ausgewählten Parzellen standen die dort eingesetzten Angaben zur Verfügung. Das heisst, es war bekannt, welche Kulturen und Zwischenkulturen zu welchen Zeitpunkten und mit welchen Bearbeitungsmethoden angepflanzt wurden. Diese Angaben waren die Grundlage für den ursprünglichen C-Wert

dieser Parzellen. Nun wurde versucht, mit Änderungen in der Fruchtfolge und Umstellungen in den Bearbeitungsmethoden für jede Parzelle einen neuen C-Wert zu modellieren, der möglichst nahe an jenem Wert, welcher aus dem CPmax-Szenario stammt, lag. Diese modellierten C-Faktoren wurden dann im ersten Szenario für die entsprechenden Parzellen eingesetzt und erneut mit AVErosion der Bodenabtrag berechnet. Die restlichen Parzellen wurden hier vorerst mit dem ursprünglichen C-Wert belassen. Ebenfalls wurde der schwach betroffene Teil von Parzelle 679 (679b) mit dem ursprünglichen Wert belassen, da dort nach der Aufteilung keine Überschreitung des Schwellenwertes mehr feststellbar war.

6.2.2 Resultate und Interpretation - Szenario 1

Die Tabelle 6.1 zeigt wie sich die neuen Werte auf den Bodenabtrag der Parzellen ausgewirkt haben. Die grün markierten Felder bezeichnen jene Parzellen, bei denen der vom Programm ausgegebene Wert zu einer Senkung des Bodenabtrags unter den Schwellenwert geführt hat. Bei den roten Feldern sind die Werte immer noch zu hoch. Die Parzelle 753 ist weiss, weil ihr Wert sehr nahe an die geforderten 7.5 t/(ha*a) herangekommen ist und somit die Bedingungen fast erfüllt hat. Die Parzelle 679b wurde mit dem ursprünglichen C-Faktor der ganzen Parzelle 679 belassen, da nach der Aufteilung der Wert unter 7.5 t/(ha*a) lag. Auf diesen Teil der Parzelle 679 wird im Folgenden nicht mehr weiter eingegangen.

	Szenario 1 (C-Faktoren nach CPmax-Szenario)		**Variante CK2m** (ursprüngliche C-Faktoren)		**Vergleich der beiden Varianten** (Grundlage ist Variante CK2m)	
Parzelle	Erosionswerte t/(ha*a)	C-Faktor	Erosionswerte t/(ha*a)	C-Faktor	Abnahme der Erosion in %	Abnahme des C-Faktors in %
235	6.63	0.169	8.28	0.211	19.93	19.91
661	10.11	0.092	15.82	0.144	36.09	36.11
679a	12.22	0.107	18.50	0.162	33.95	33.95
679b	7.09	0.162	7.09	0.162	0.00	0.00
735	8.55	0.056	27.78	0.182	69.22	69.23
743	6.93	0.182	9.4	0.247	26.28	26.32
753	7.83	0.113	10.12	0.146	22.63	22.60

Tabelle 6.1: Veränderungen durch die getroffenen Massnahmen beim Szenario 1 für den Bodenabtrag und den C-Faktor. Die C-Werte dieses Szenarios wurden nach den Werten des CPmax-Szenarios der AVErosions-Extension berechnet und mit der Fruchtfolgefaktor-Berechnung von Mosimann und Rüttimann (2002) modelliert. Grundlage waren die Daten der Bodenabtragsberechnungen mit parzellenscharfen C- und K-Faktoren und dem DTM-AV. 679a und 679b, bezeichnen ausgehend von der ursprünglichen Parzelle 679, den stark betroffenen Teil resp. den schwach betroffenen Teil dieser Parzelle mit den entsprechenden umgerechneten Werten.

Bei der Betrachtung der neuen C-Werte im Vergleich zu den ursprünglichen fällt auf, dass alle C-Faktoren jetzt tiefer als vorher liegen. Trotzdem sind nicht alle Parzellen unter den Schwellenwert gebracht worden. Die Vermutung, dass einige Werte des CPmax-Szenarios fehlerhaft sind, hat sich also bestätigt. Die ausgegebenen C-Faktoren liefern zum Teil noch viel zu hohe Bodenabträge, wie beispielsweise bei Parzelle 661 oder 679a, welche deutlich über den angestrebten 7.5 t/(ha*a) liegen (vgl. dazu auch Abbildung 6.3). Ein Abwärtstrend der Bodenabtragswerte lässt sich erkennen, er ist aber teilweise noch zu schwach. Dies hat mit den zu hohen C-Werten zu tun, welche durch die Mittelung der einzelnen Pixelwerte entstehen (siehe Rechenbeispiel weiter oben).

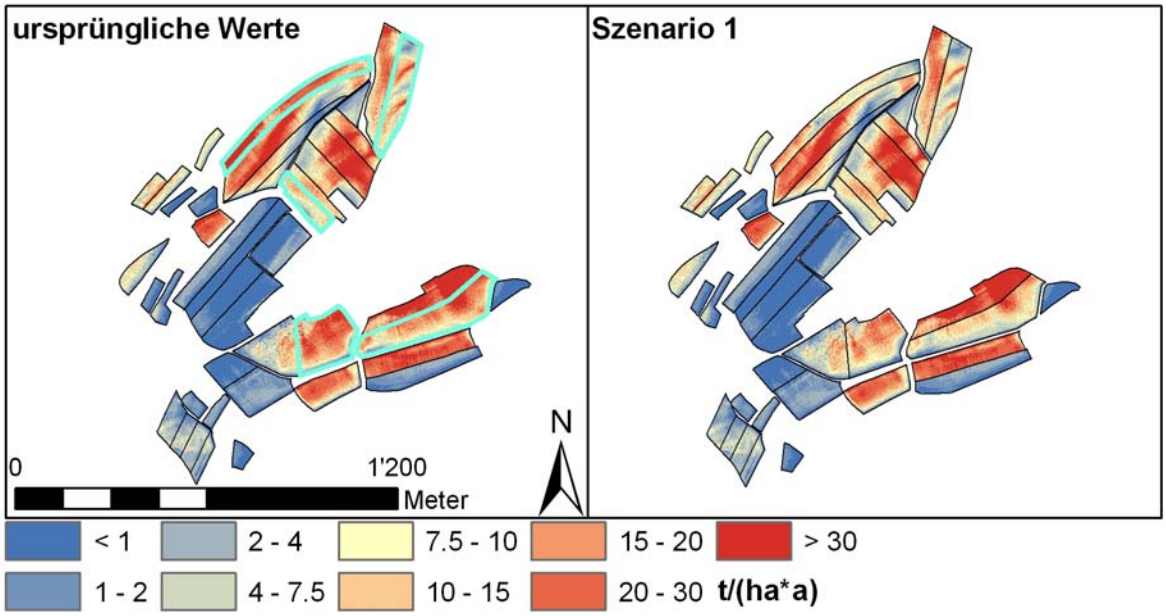


Abbildung 6.3: Ursprüngliche Bruttoerosion im Teilgebiet Frienisberg, mit parzellenscharfen C- und K-Faktoren (links) und das Resultat aus Szenario 1 (rechts). Verwendet wurde jeweils das DTM-AV. (Quelle: eigene Darstellung).

Ein ganz zentraler Punkt bei der Auswertung dieser Variante waren die Erkenntnisse aus den zwei Spalten „Abnahme der Erosion in %“ und „Abnahme des C-Faktors in %“. Vergleicht man die Werte dieser zwei Spalten fällt die hohe Übereinstimmung auf. Dies bedeutet, dass beim Szenario 1 nur die Abnahme des C-Faktors entscheidend war, wie sich der Bodenabtrag entwickelt. Diese Abnahme wirkte sich flächendeckend und gleichermassen aus. Da die Berechungen des Bodenabtrags pro Parzelle aus dem Mittel aller in dieser Parzelle befindlichen Zellen geschieht und diese auch zellenscharf berechnete Daten für andere Faktoren haben, wurde hier ein grösserer Unterschied zwischen gemittelten und zellenscharfen Daten erwartet. Der Grund der grossen Übereinstimmung hier ist, dass der Bodenabtrag mit dem neuen C-Faktor wiederum mit der AVErosion-Extension berechnet wird und somit für die Zellen wieder spezifische Werte berechnet werden, die erst am Schluss zur Übersicht zusammen gefasst werden. Aus diesem Blickpunkt scheint es klar, dass die prozentuale Abweichung des neuen und des ursprünglichen C-Faktors sich fast eins zu eins auf den neuen Bodenabtrag übertragen, da diese Werte die einzigen Veränderungen darstellen. Diese Erkenntnis wird im Szenario 4 benützt und noch ausführlicher behandelt.

Der Nutzen des Programms könnte dann ersichtlich werden, wenn man z.B. höher gelegene angrenzende Parzellen mit einbezieht und durch die dort geänderten Daten auch für die darunterliegenden Flächen ein positiver Effekt entsteht. Auf diesen Punkt wird in Szenario 2 noch weiter eingegangen. Ein anderer Ansatz mit Hilfe der AVErosions-Extension ist die zellenscharfe Ausgabe der Nutzungsintensität. Aus ihr können „Brandherde" der Erosion erkannt werden und somit punktuelle Massnahmen geplant und getroffen werden. Dies könnten z.B. lineare Elemente sein, welche man in das Programm einbringen kann und deren Nutzen man so erfahren würde. Solche Massnahmen werden in Kapitel 6.6 noch weiter verfolgt.

6.3 Szenario 2

6.3.1 Grundlagen für Szenario 2

Da das erste Szenario nicht zum gewünschten Resultat führte, wird nun ein neues Szenario ausprobiert. Beim Szenario 2 werden alle Parzellen mit den neuen Werten versehen. Diese Werte stammen aus der ersten Berechnung mit dem CPmax-Szenario der AVErosions-Extension mit einem Schwellenwert von 7.5 t/(ha*a). Für die 6 ausgewählten Parzellen wurden wiederum die modellierten Werte mit dem C-Faktortool von MOSIMANN & RÜTTIMANN (2002) eingesetzt. Mit dieser Variante erhofft man sich einen „Übertragungseffekt", das heisst höherliegende Parzellen, die mit dem neuen C-Faktor nun einen tieferen Bodenabtragswert erhalten sollten, hätten positive Auswirkungen auf die darunterliegenden Parzellen. Bei Parzelle 735 z.B. liegt oberhalb die stark betroffene Parzelle 731. Eine Reduktion der Erosion bei dieser Parzelle könnte durchaus auch mindernde Effekte auf die darunterliegende Parzelle haben.

6.3.2 Resultate und Interpretation – Szenario 2

Beim Vergleich des Szenario 1 mit 2 fällt auf, dass es immer noch sehr viele stark betroffene Stellen gibt. Betrachtet man aber z.B. die vorher erwähnte Parzelle 731, welche oberhalb der ausgewählten Parzelle 735 liegt, so zeigt sich, dass der neue (vom Programm ausgegebene) C-Wert durchaus zu einer Verbesserung der Situation geführt hat (siehe Abbildung 6.4). So ist die Erosion in diesem Feld von 20.06 t/(ha*a) mit den ursprünglichen Werten auf 11.79 t/(ha*a) gesunken. Dies bedeutet aber anderseits auch wieder, dass der Wert in Hinblick auf den gesetzten Schwellenwert von 7.5 t/(ha*a) immer noch viel zu hoch ist. Wie sieht es nun aber mit dem Effekt auf die darunterliegende Parzelle aus? Dieser „Übertragungseffekt" fand nicht statt. Da die Erosion mit der AVErosions-Extension den Bodenabtrag über das gesamte Einzugsgebiet und nicht nur über die Länge der Parzelle berechnet, hätte man bei einer Reduktion der Erosion der oben liegenden Parzelle eine ebenfalls reduzierte Erosion der sich darunter befindlichen Parzellen erwarten können. Diese Auswirkungen sind aber nicht feststellbar. Die Parzelle 735 zeigt den gleichen Wert wie beim ersten Szenario, 8.55 t/(ha*a). Dies trifft auch auf alle anderen der sechs ausgewählten Felder zu. Weshalb dies so ist, wird in Kapitel 6.9.2 ausführlich besprochen.

Trotzdem wären mit allen neuen C-Werten tiefere Bodenabträge, die im Bereich des Schwellenwertes liegen, zu erwarten gewesen. Dies ist aber nicht der Fall. Es gibt immer noch zu viele Parzellen, welche einen Bodenabtrag von über 7.5 t/(ha*a) aufweisen, was ja eigentlich mit dem berechneten Szenario vermieden werden sollte.

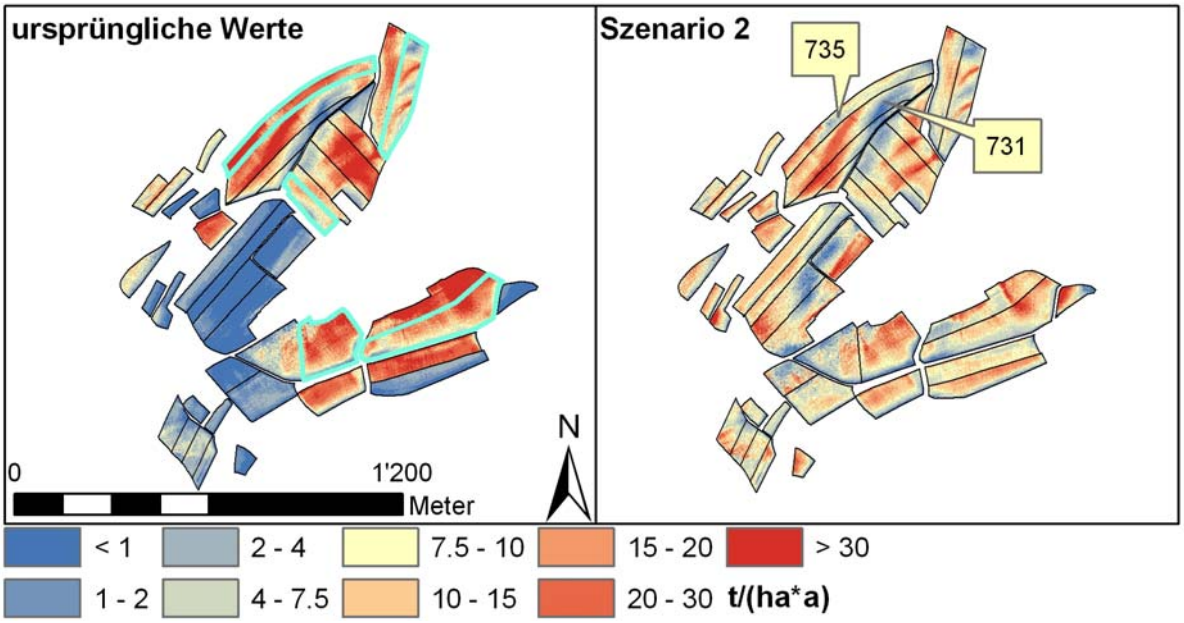


Abbildung 6.4: Ursprüngliche Bruttoerosion im Teilgebiet Frienisberg, mit parzellenscharfen C- und K-Faktoren (links) und das Resultat aus Szenario 2 (rechts). Verwendet wurde jeweils das DTM-AV. (Quelle: eigene Darstellung).

Insgesamt haben 106 der 204 Parzellen einen Abtrag über 7.5 t/(ha*a), 34 davon liegen höher als 10 t/(ha*a), wobei das Maximum bei 15.79 t/(ha*a) liegt (Parzelle 675: ursprünglich 0.51 t/(ha*a), mit einem ursprünglichen C-Wert von 0.007). Markant ist vor allem die Tatsache, dass ursprünglich nur 29 Parzellen über 7.5 t/(ha*a) lagen und jetzt sind es deren 106 (vergleiche Tabelle 6.2). Von diesen 29 stark betroffenen Parzellen wurden nur 7 unter den Schwellenwert gebracht. Ihre Ausgangswerte lagen zwischen 8 und 11 t/(ha*a). Die restlichen 22 haben nun Werte zwischen 7.5 und 14.5 t/(ha*a).

80 C-Werte liegen neu über 0.247, dem Maximalwert der ursprünglichen Daten. Jedoch liegen nur 28 dieser Parzellen über dem Schwellenwert. So wurden also 52 Felder in Bezug auf den C-Faktor nach oben korrigiert ohne den Schwellenwert dabei zu überschreiten. Insgesamt wurden 177 C-Werte nach oben korrigiert, haben also neu einen höheren C-Faktorwert als ursprünglich. 88 dieser Felder haben nun einen Bodenabtrag von über 7.5 t/(ha*a) und nur vier von ihnen lagen vorher schon darüber. Das heisst diese 88 Felder wurden sinnloserweise über den Schwellenwert korrigiert. Bei den anderen 89 Parzellen hat die Erhöhung des C-Wertes nicht zu einer Überschreitung des Schwellenwertes geführt. Sie dürften also, wenn man nur den Schwellenwert als Referenz nimmt, durchaus intensiver bewirtschaftet werden als dies aktuell der Fall ist. In der Praxis wäre es jedoch sicher nicht angebracht, Parzellen mit einer extensiveren Nutzung und tiefer Erosion, neu so zu gestallten, dass der Bodenabtrag erhöht wird und einfach noch unter dem Schwellenwert liegt. Dies wird beim nächsten Szenario berücksichtigt. Diese Parzellen könnten aber z.B. als Tauschparzellen

für stärker betroffene Felder benutzt werden. MOSIMANN (2003) erwähnte bei seinen Bodenabtragsanalysen in Basel-Landschaft die Möglichkeit, dass stark von Erosion betroffene Parzellen extensiver bewirtschaftet werden sollten, dafür aber im Abtausch Parzellen mit geringem Erosionspotential intensiver bebaut werden können. Dies könnte man hier auf jene Felder übertragen, welche trotz der Erhöhung des C-Faktors immer noch unter dem Schwellenwert liegen.

Über alle Parzellen gesehen liegen bei diesem Szenario die Werte aber um einiges tiefer als die ursprünglichen Werte. Der Schwellenwert ist jedoch aus den Resultaten nicht so klar ersichtlich wie erwünscht.

Anzahl Parzellen Szenario 2	**Werte**	
204	Gesamtanzahl	
106 (29)	> 7.5 t/(ha*a)	
davon 34 (16)	>10 t/(ha*a)	
	Max. 15.79 t/(ha*a)	(Max. 42.81 t/(ha*a))
7 der **29** stark betroffenen Parzellen	< 7.5 t/(ha*a)	
177	C-Wert höher als ursprünglich	
davon 88	> 7.5 t/(ha*a)	
davon 89	< 7.5 t/(ha*a)	
80 (0)	C-Wert > max. 0.247	
davon 28	> 7.5 t/(ha*a)	
davon 52	< 7.5 t/(ha*a)	

Tabelle 6.2: Auflistung einiger markanter Fakten der Massnahmenplanung mit dem Szenario 2. Dieses Szenario weist für alle 204 Parzellen einen neuen C-Wert aus dem CPmax-Szenario auf. Zum Vergleich die ursprünglichen Daten der Erosionsabschätzung mit parzellenscharfen C- und K-Faktoren in Klammern.

Diese Variante hat aufgezeigt, dass die mit dem CPmax-Szenario berechneten Werte für unsere Zwecke nicht die erwünschten Resultate liefern. Diesmal wurden allen Parzellen neue C-Werte zugeteilt, was zu einer unsinnigen Erhöhung der Anzahl Felder mit einem Abtrag über dem Schwellenwert führte. Waren es ursprünglich 29 Parzellen mit einer Erosion über den angestrebten 7.5 t/(ha*a), so sind es nun 106 Felder. Das Programm hat also sehr viele Parzellen die im „grünen Bereich“ lagen, in den „roten Bereich“ gebracht, was sicher nicht Sinn und Zweck der Massnahmenplanung ist. Somit wird ein erneut abgeändertes Szenario versucht, welches diesem Problem Rechnung trägt.

6.4 Szenario 3

6.4.1 Grundlagen für Szenario 3

Bei diesem Szenario werden nur die stark betroffenen Parzellen mit neuen C-Faktorwerten versehen. Das heisst die 29 Parzellen, welche über dem Schwellenwert liegen, abzüglich vier Parzellen, die durch das CPmax-Szenario einen höheren Wert erhielten. 25 Feldern wird also ein neuer, tieferer C-Wert zugewiesen, davon sind 6 die ausgewählten Parzellen, welche den mit dem C-Faktortool modellierten Wert bekommen. Die restlichen 179 Parzellen werden mit dem ursprünglichen Wert belassen, um zu verhindern, dass eine Vielzahl von Feldern künstlich über den Schwellenwert gebracht wird und um nur diejenigen zu behandeln, die auch wirklich eine Massnahmenplanung benötigen.
Es ist ein deutlich verändertes Bild zu erwarten, mit der Mehrzahl von Parzellen unter dem Schwellenwert. Ebenfalls sollten einige der behandelten Parzellen unter den Schwellenwert gelangen und die anderen in die Nähe davon.

6.4.2 Resultate und Interpretation - Szenario 3

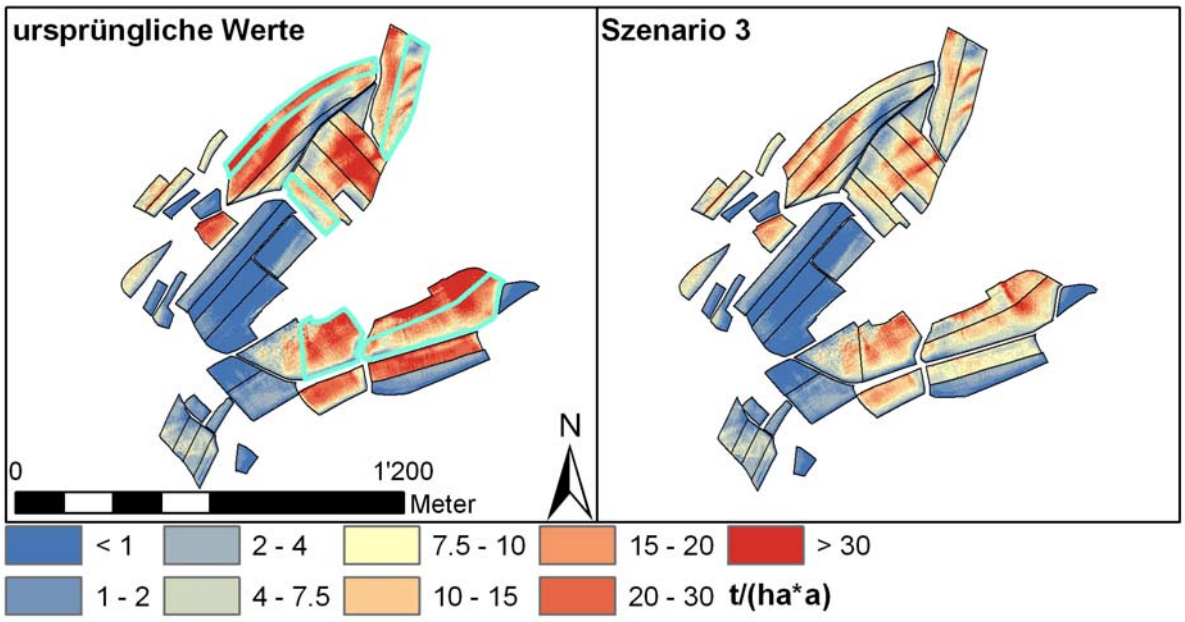


Abbildung 6.5: Die Abbildung zeigt die ursprüngliche Bruttoerosion im Teilgebiet Frienisberg, mit parzellenscharfen C- und K-Faktoren (links) und das Resultat aus Szenario 3 (rechts). Verwendet wurde jeweils das DTM-AV. (Quelle: eigene Darstellung).

22 der 204 Parzellen sind noch immer über dem Schwellenwert von 7.5 t/(ha*a) und das Maximum beträgt 12.22 t/(ha*a) (Parzelle 679a). Von diesen Feldern liegen noch 8 über 10 t/(ha*a). Wie beim Szenario 2 sind von den ursprünglich 29 stark betroffenen Feldern nur 7 unter den Schwellenwert gebracht worden, das heisst die C-Werte für die anderen Parzellen sind immer noch zu hoch. Von den 6 ausgewählten Feldern haben nur 2 die Schwelle unterschritten. Wieder ist über das Ganze gesehen eine starke Korrektur nach unten zu bemerken, was auch am Maximalwert zu sehen ist (siehe Abbildung 6.5). Jedoch liegen immer noch 22 der stark betroffenen Felder über der angepeilten Schwelle. Dies lässt den

Schluss zu, dass für eine gesamthafte Behandlung der einzelnen Parzellen das CPmax-Szenario nicht geeignet ist. Es liefert immer noch zu hohe Werte in Bezug auf den Schwellenwert und hat somit nicht den gewünschten Effekt.
Wie bei Szenario 1 in Tabelle 6.1 schon bemerkt wurde, hängen die prozentuale Abnahme des C-Faktors und die Abnahme des Bodenabtrags fast eins zu eins zusammen. Deswegen wird im nächsten Szenario auf die Werte des CPmax-Szenarios verzichtet. Es werden rein rechnerisch die neuen C-Werte ermittelt.

6.5 Szenario 4

6.5.1 Grundlagen für Szenario 4

Die C-Faktoren der 29 stark betroffenen Parzellen wurden für dieses Szenario rein rechnerisch bestimmt. Um zu wissen, welchen C-Faktor man für eine ganze Parzelle einsetzen sollte, um von einem bestimmten Bodenabtrag unter den Schwellenwert zu kommen, kann dies mit einem einfachen Dreisatz erörtert werden. In Tabelle 6.1 wurde darauf hingewiesen, dass die relative Abnahme des C-Faktors und die resultierende Abnahme des Bodenabtrags fast eins zu eins zusammenhängen. Aus dieser Beobachtung lassen sich Beziehungen zwischen dem ursprünglichen Bodenabtrag, dem ursprünglichen C-Wert, dem Schwellenwert und dem neuen C-Wert herstellen. Diese Beziehungen lassen sich in einem einfachen Dreisatz ausdrücken, welcher zur Berechnung der hier verwendeten C-Faktoren für die 29 stark betroffenen Parzellen verwendet wurde.

Bodenabtrag : ursprünglicher C-Wert = Schwellenwert : neuer C-Wert

Ausser dem neuen C-Wert sind alle Werte bekannt. Somit ergibt sich die Auflösung daraus:

(Schwellenwert/Bodenabtrag) * ursprünglicher C-Wert = neuer C-Wert

Für die 29 Felder wurde der Schwellenwert von 7.5 t/(ha*a) genommen und durch den ursprünglich ausgewiesenen Bodenabtrag bei der Berechnung mit parzellenscharfen C- und K-Faktoren geteilt und anschliessend mit dem C-Wert multipliziert, der ebenfalls bei dieser Variante zu Grunde lag. Einzig bei der neu geteilten Parzelle 679 musste zuerst mittels „zonal statisic“ der Bodenabtrag für den Teil 679a neu berechnet werden, um nicht auf einer falschen Grundlage die Berechnungen des neuen C-Wertes zu machen. Die erhaltenen Werte wurden zusammen mit den alten Werten der restlichen 174 Parzellen, die schon unter dem Schwellenwert liegen, in das AVErosions-Tool eingelesen und der Bodenabtrag wurde berechnet.

6.5.2 Resultate und Interpretation – Szenario 4

Die Erwartung, eigentlich alle Felder unterhalb des Schwellenwertes zu bringen, hat sich bestätigt. Die stark betroffenen Felder liegen nun in einem Bereich von 7.42 – 7.54 t/(ha*a) (siehe Tabelle 6.3) und haben somit den Schwellenwert erreicht. Dies sind die gemittelten Werte über die ganze Parzelle und es ist nicht ausgeschlossen, dass in Teilen der einzelnen Felder noch Stellen zu finden sind, welche Abträge über 7.5 t/(ha*a) aufweisen (vgl. Abbildung 6.6). Dies ist zugleich auch gerade die Schwachstelle dieses Szenarios und der vorangegangen Anwendungen der CPmax-Daten. Alle Parzellen sind nun unterhalb des Schwellenwertes und das Gesamtbild sieht zufriedenstellend aus. Jedoch werden einzelne lineare Formen wie Rinnen und Gräben durch die Mittelung der Werte über eine ganze Parzelle maskiert und kommen so nicht mehr zum Vorschein. Dies könnte bei einer Umsetzung in der Praxis dazu führen, dass Landwirte, welche mit Auflagen kontaktiert wurden, ihren Bodenabtrag mit geeigneten Massnahmen zu senken, einfach ihre Parzellen vergrössern, um den Mittelwert unter den geforderten Schwellenwert zu bringen. Dies wäre aber keine Lösung des Problems, sondern nur eine Maskierung der Tatsachen. Deswegen ist es wichtig, neben der erhaltenen schlagbezogenen Erosion auch die Darstellung der zellenscharf ausgegebenen Bodenabträge anzusehen. Dort lassen sich solche stark hervorgehobenen linearen und oft kleinräumigen Ereignisse erkennen.

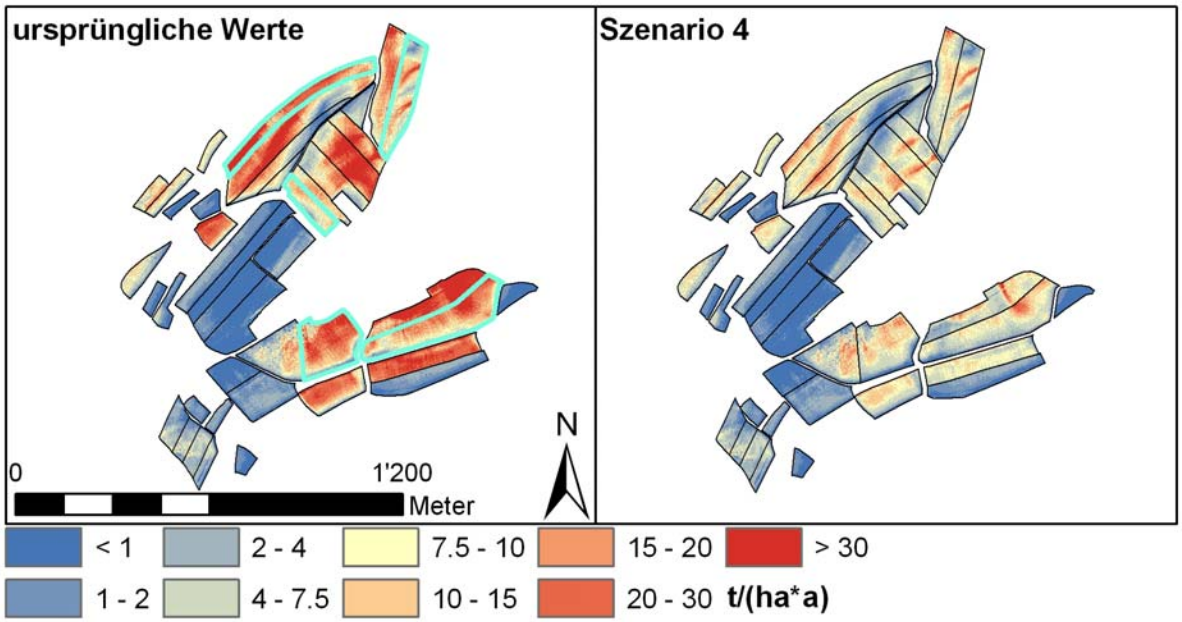


Abbildung 6.6: Ursprüngliche Bruttoerosion im Teilgebiet Frienisberg, mit parzellenscharfen C- und K-Faktoren (links) und das Resultat aus Szenario 4 (rechts). Verwendet wurde jeweils das DTM-AV. (Quelle: eigene Darstellung).

Die hier erarbeiteten Resultate zur Reduktion der Erosion bilden also nur einen ersten Schritt der Massnahmenplanung. Im nächsten Kapitel wird auf die obengenannten Probleme mit kleinräumig auftretenden Erosionsereignissen noch vertieft eingegangen. Es werden neben allgemeinen Massnahmen, die zur flächenhaften Reduktion des Bodenabtrags führen, auch noch gezielte Massnahmen für die ausgewählten Parzellen erarbeitet. Diese sollen helfen, die lineare Erosion noch besser in den Griff zu bekommen.

	Szenario 4 (C-Faktoren nach Berechnung)		**Variante CK2m** (ursprüngliche C-Faktoren)		**Vergleich der beiden Varianten** (Grundlage ist Variante CK2m)	
Parzelle	Erosionswerte t/(ha*a)	C-Faktor	Erosionswerte t/(ha*a)	C-Faktor	Abnahme der Erosion in %	Abnahme des C-Faktors in %
235	7.5	0.191	8.28	0.211	9.42	9.48
661	7.47	0.068	15.82	0.144	52.78	52.78
679a	7.54	0.066	18.50	0.162	59.24	59.26
735	7.48	0.049	27.78	0.182	73.07	73.08
743	7.5	0.197	9.4	0.247	20.21	20.24
753	7.49	0.108	10.12	0.146	25.99	26.03

Tabelle 6.3: Veränderungen durch die getroffenen Massnahmen beim Szenario 4, für den Bodenabtrag und den C-Faktor. Die C-Werte dieses Szenarios wurden nach dem Dreisatz aus Kapitel 6.5.1 berechnet. Grundlage waren die Daten der Bodenabtragsberechungen mit parzellenscharfen C- und K-Faktoren und dem DTM-AV. 679a bezeichnet ausgehend von der ursprünglichen Parzelle 679, den stark betroffenen Teil dieser Parzelle mit den entsprechend angepassten Werten.

6.6 Massnahmenplanung für einzelne Parzellen

Mit der Massnahmenplanung für einzelne Parzellen wird die Arbeit von Kapitel 6.2 – 6.5 noch weitergeführt. Ging es dort darum, flächendeckende Massnahmen zu ergreifen, werden hier spezifische Massnahmen für die sechs anfangs ausgewählten Parzellen geplant und ihre Auswirkungen dargestellt und besprochen. Wie in Kapitel 6.5 gesehen, waren die Resultate mit den berechneten C-Werten (Szenario 4) zufriedenstellend und der Schwellenwert wurde weitgehend eingehalten. Dies muss aber noch nicht heissen, dass es in einer gegebenen Parzelle keine Stellen mit stärkerer Erosion geben kann. Denn der Schwellenwert bezieht sich auf den Mittelwert der Parzellen und verdeckt somit parzelleninterne Unterschiede. Dies kann vor allem bei grösseren Feldern der Fall sein oder bei Parzellen, welche sehr unterschiedliche Teilgebiete aufweisen. So hebt beispielsweise ein grosses flaches Teilstück mit geringer Erosion die Auswirkungen eines steilen, muldenförmigen Bereichs mit starker Erosion beim Mitteln auf. Solche stark betroffenen Teilbereiche gilt es aber trotzdem zu verhindern, auch wenn der Durchschnittswert der Parzelle in Bezug auf den angepeilten Schwellenwert zufriedenstellend ist. Schliesslich können gerade solche räumlich begrenzten Ereignisse zu massiven Schäden am Feld selber oder aber auch an angrenzender Infrastruktur führen, da sich dort das Wasser sammelt und seine erosive Wirkung entfalten kann. Für solche gefährdeten Gebiete gilt es im Rahmen einer erosionsmindernden Massnahmenplanung Möglichkeiten zu finden um die Erosion einzudämmen.

Zu diesem Zweck werden in diesem Teil einige dieser gezielten Massnahmen, die über eine Umstellung der Bodenbearbeitung und -bedeckung hinausgehen, anhand der ausgewählten Parzellen dargestellt und erläutert. Auf der Grundlage des vierten Szenarios der CPmax-Szenarien wurde noch eine Massnahmengrundlage erstellt (Abbildung 6.7), die als Ausgangslage für die gezielten Massnahmen diente. Diese Massnahmengrundlage beinhaltet für die sechs ausgewählten Parzellen modellierte C-Faktoren basierend auf den berechneten Werten des Szenarios 4 (hier wurden die C-Werte rein rechnerisch bestimmt, siehe Kapitel 6.5). Diese modellierten C-Faktoren wurden wiederum mit der Fruchfolgefaktor-Berechnung im Programm „Bodenerosion selber abschätzen“ (EROSION CH V2.02) von MOSIMANN & RÜTIMANN (2002) ermittelt. Das Ziel war es, mit den modellierten C-Werten mit leichten Umstellungen und Anpassungen der Fruchtfolge und Bodenbearbeitungsmethoden, möglichst genau an den ausgerechneten Wert von Szenario 4 heranzukommen. Beim modellieren der C-Faktoren wurde darauf geachtet, dass die Fruchtfolgen falls sie geändert oder angepasst werden mussten, gut abgestimmt wurden. Dies geschah auf der Grundlage des Fruchtfolgekreuzes der Agroscope RAC Changins von VULLIOUD (2005). Diese Anpassung der Fruchtfolgen und die Änderungen der Bodenbearbeitung sind die ersten Schritte der gezielten Massnahmenplanung für die ausgewählten Parzellen. Mit den so getroffenen Massnahmen würde für diese Felder sichergestellt, dass der gemittelte Bodenabtrag den Schwellenwert nicht überschreitet.

Ausgehend von den Resultaten mit diesen neuen C-Faktoren und der sich daraus ergebenden Erosion, wurden dann die weiteren Schritte geplant. Es wurden stärker betroffene und zu behandelnde Teilgebiete ausgewiesen und gezielte Massnahmen für diese Bereiche erarbeitet und modelliert. Diese Massnahmen reichten von linearen Elementen wie Hecken oder Grasstreifen bis hin zu „grassed waterways“ in Grabenstrukturen oder gar einer Umstellung der Parzelle auf Direktsaat. Auf den folgenden Seiten werden nun einige dieser Projekte dargestellt und besprochen.

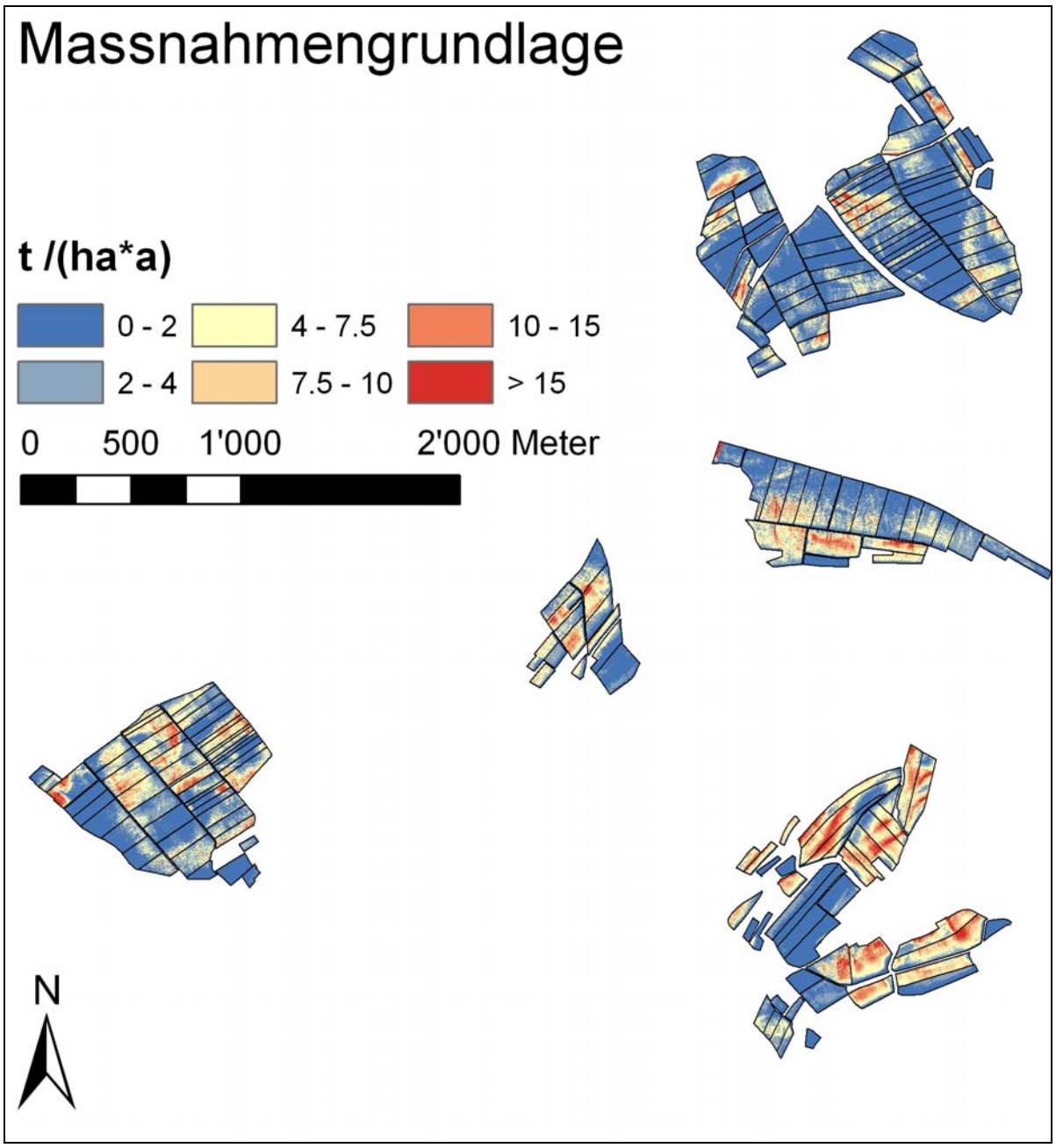


Abbildung 6.7: Massnahmengrundlage. Zellgenaue Erosionsabschätzung mit den neuen C-Faktoren aus Szenario 4. Die C-Werte für die sechs ausgewählten Parzellen wurden mit dem C-Faktortool von MOSIMANN & RÜTTIMANN (2002) modelliert. Verwendet wurden hier das DTM-AV und die gleichen Grundlagendaten wie bei Variante 3. (Quelle: eigene Darstellung).

6.7 Massnahmen

6.7.1 Projekt 743

Überblick und geplante Massnahme

Parzelle 743 liegt im Teilgebiet Frienisberg am südöstlich abfallenden Hang nördlich des Dorfkerns. Sie ist die erste Parzelle an diesem Hang und Teil einer Serie von Parzellen, welche durch Erosion betroffen sind. Die hier auftretenden Erosionsereignisse sind vergleichsweise gering, somit war das Ziel, eine angepasste Massnahme zur Erosionsminderung anzusetzen, welche auch nicht viel Platz in Anspruch nimmt.
Mehrere verschiedene Möglichkeiten wurden ausprobiert, um dem Problem entgegen zu wirken. Schliesslich fiel die Entscheidung auf ein lineares Element, eine Hecke. Diese wurde vom westlichen Ende bis ungefähr in die Mitte der Parzelle gezogen, oberhalb des stark betroffenen Teils (siehe Abbildung 6.8, rechts oben). Die Massnahme sollte verhindern, dass es grössere Gebiete gibt, welche einen Abtrag über 10 t/(ha*a) aufweisen und wenn möglich auch noch einen positiven Effekt auf die anschliessende Parzelle haben. Die Hecke wurde als aneinander gereihte Punkte in AVErosion im Parzellenplan eingefügt. Dort wirken sich solche eingefügten Punkte, Linien oder auch Flächen als No-Data Werte aus. Diese No-Data Pixel führen dazu, dass die Berechnung der erosiven Hanglänge und der Fliesswege neu beginnt. Somit wird die erosive Wirkung des Wassers oberhalb des eingefügten Hindernisses von jenem Element gänzlich aufgenommen und hat auf die nachfolgende Ackerfläche keinen Einfluss mehr. Der LS-Faktor startet unterhalb des eingefügten linearen Elements neu mit dem Wert 0 (mehr dazu im Kapitel 6.9).

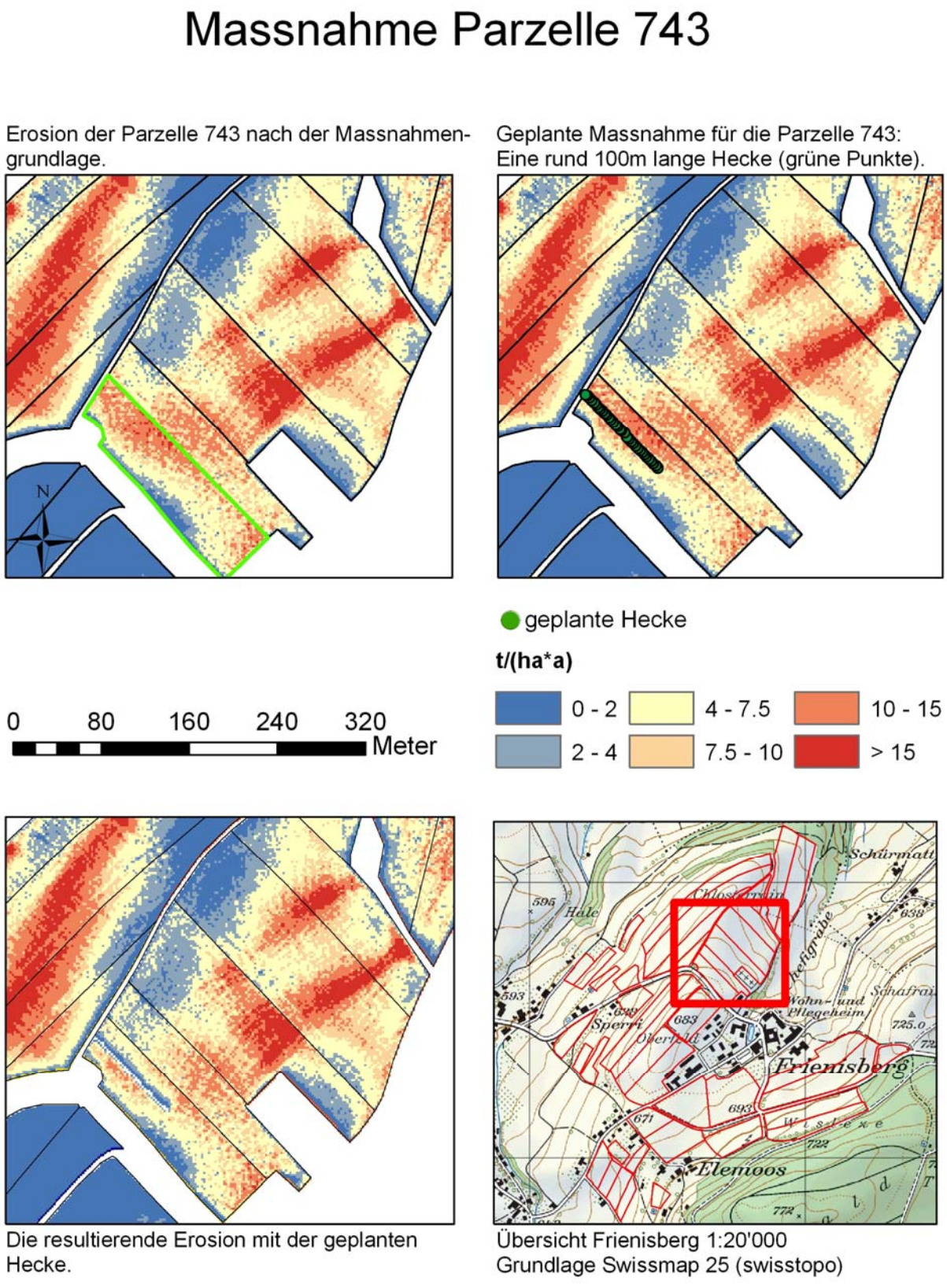


Abbildung 6.8: Erosion der Massnahmengrundlage, die geplante Massnahme für die Parzelle 743 und deren Auswirkungen auf den Bodenabtrag, sowie eine Übersicht von Frienisberg zur Orientierung. In der Karte oben links grün markiert die Parzelle 743.

Auswertung

Die Auswirkungen der Massnahme sind in der Abbildung 6.8 (unten) zu sehen. Die Hecke erfüllt ihren Zweck und reduziert die Erosion der darunter liegenden Ackerfläche stark und hat weiter auch noch Auswirkungen auf die nächst folgende Parzelle. Dieser Effekt ist jedoch recht klein, da die Dimension der Hecke klein ist und die Hangneigung dazu beiträgt, dass auch auf kurzer Strecke die Kraft des Wassers wieder zunimmt. Zumal die Hecke am oberen Rand der Parzelle angebracht ist, und sie so die Hanglänge der darunterliegenden Felder nicht markant verkürzt. Aber die Wirkung auf die behandelte Parzelle 743 ist klar ersichtlich und schlägt sich auch im resultierenden Bodenabtrag nieder. Die gemittelte Erosion beträgt noch 6.08 t/(ha*a) im Gegensatz zu 7.41 t/(ha*a) nach der Massnahmengrundlage (siehe Tabelle 6.4). Die Fruchtfolge konnte gleich belassen werden wie bei der Massnahmengrundlage und die rund 100 m lange Hecke nimmt nicht viel der produktiven Fläche in Anspruch. Auf beiden Seiten der Hecke ist noch rund 20 m Platz und somit ist die Bearbeitbarkeit gewährleistet. Diese Massnahme könnte also in der Praxis so durchgeführt werden.
Die Hecke, welche als aneinander gereihte Punkte bei AVErosion eingefügt wurde, hatte zudem die realistischsten Auswirkungen. Andere Varianten wie zwei 6 m breite Grasstreifen im betroffenen Gebiet hatten nur stärkere Effekte, wenn man am unteren Ende jeweils noch eine Linie eingefügt hat, welche wiederum als No-Data Werte in den Parzellenplan einging. Das Problem fehlender Wirkung von Grasstreifen ohne lineare Elemente wird in Kapitel 6.9.1 und 6.9.2 noch besprochen.

Daten zu Parzelle 743

Ursprünglich	Fläche	10'324 m^2
	K-Faktor	0.20
	L-Faktor	1.53
	S-Faktor	1.31
	C-Faktor	0.247
	Erosion	9.4 t/(ha*a)
Massnahmengrundlage	C-Faktor	0.1946
	Erosion	7.41 t/(ha*a)
Massnahme 743 (Hecke)	L-Faktor	1.27
	S-Faktor	1.27
	C-Faktor	0.1946
	Erosion	6.08 t/(ha*a)

Tabelle 6.4: Übersicht der Parzelle 743 mit den wichtigsten Zahlenwerten.

6.7.2 Projekt 679

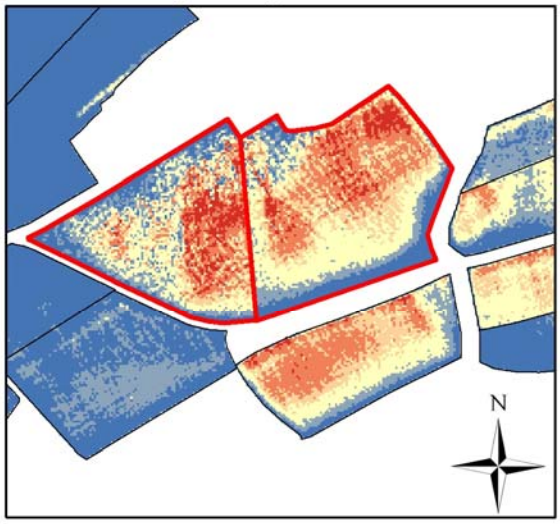
Überblick und geplante Massnahmen

Parzelle 679 wurde anfangs in einen stark (679a) und einen schwach (679b) von Erosion betroffenen Teil aufgeteilt. Dies mit dem Hintergrundwissen, dass beim CPmax-Szenario unterschiedlich stark betroffene Bereiche zu Problemen führen können. Deshalb wurde diese Parzelle dort versuchsweise getrennt. Der stark betroffene Bereich 679a ist rund 28'600 m^2 gross und liegt Nahe des Dorfkerns von Frienisberg oberhalb der Strasse, welche nach Baggwilgrabe führt. Am nordöstlichen Ende der Parzelle steht der dazugehörige Hof mit Haus und einem grösseren Gemüsegarten.
Das Problem bestand bei dieser Parzelle einerseits darin, dass es auf dem Feld trotz der Massnahmengrundlage teils noch zu erhöhter Erosion kam (>10t(ha*a)), andererseits zeigten die Fliessrichtung geradewegs auf den Hof zu, so dass Infrastrukturschäden in Betracht gezogen werden mussten. Es findet hier zwar keine Kanalisierung der Fliesswege wie in einer Grabenstruktur statt, aber das Wasser fliesst flächig Richtung Haus und Hof ab. In diesem Bereich liegen die S-Faktorwerte zwischen 2 und 3.5, also deutlich über dem Schnitt (vgl. Tabelle 6.5 weiter unten). Dies macht die Erosionsgefährdung dort aus. Ebenfalls gab es auf dem schwächer betroffenen Teil 679b, welcher bei der Massnahmengrundlage mit den ursprünglichen Werten belassen wurde, teils noch erhöhte Werte. Um den Bodenabtrag noch weiter senken zu können, wurde die Bodenbearbeitung und –bedeckung verändert. Dies wurde nach der Auswertung für die Parzelle 679a auch für die Parzelle 679b übernommen, um so für die ganze Fläche eine einheitliche Fruchtfolge zu haben und auch in diesem Teil die Erosion noch stärker zu reduzieren. Dazu wurden die Kartoffeln, eine durch ihre Bearbeitungsmethode und verspätete Bodenbedeckung (ARBEITSGRUPPE BODENEROSION NORDWESTSCHWEIZ) erosionsfördernde Kultur, aus der Fruchtfolge herausgenommen und die Bearbeitung wurde bei den übrigen Kulturen (vorwiegend Gerste, Mais, Rüben, Weizen) auf Mulchsaat mit einem Bedeckungsgrad von über 30% umgestellt. Um der Beeinträchtigung der nahen Infrastruktur durch Bodenerosion vorzugreifen, wurde zusätzlich noch ein Filterstreifen am nördlichen Ende des Feldes angelegt, um allfällige Erosionsereignisse aufzufangen und die Gebäude zu schützen (grüner Streifen in Abbildung 6.9, rechts oben).

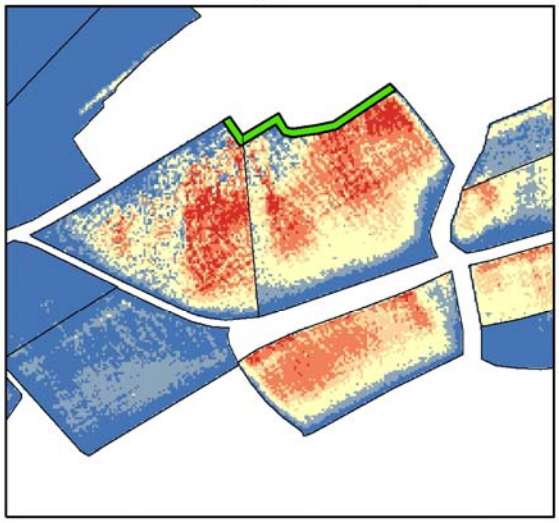
Abbildung 6.9 (nächste Seite): Erosion der Massnahmengrundlage, die geplante Massnahme für die Parzelle 679 und deren Auswirkungen auf den Bodenabtrag, sowie eine Übersicht von Frienisberg zur Orientierung. In der Karte oben links rot markiert, die Parzellen 679a und 679b.

Massnahme Parzelle 679

Erosion der Parzelle 679 nach der Massnahmengrundlage.



Geplante Massnahme für die Parzelle 679: Änderungen am C-Faktor und ein rund 8 m breiter Filterstreifen (grüne Fläche).

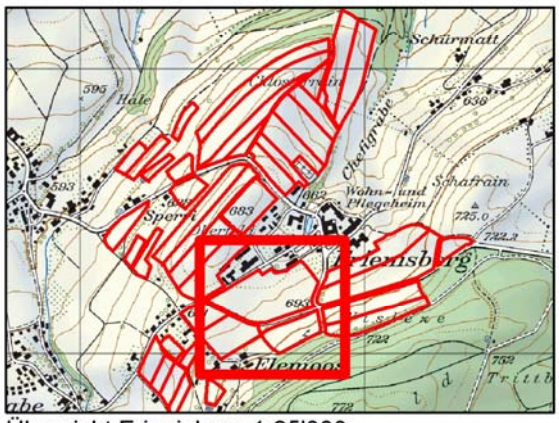


geplanter Filterstreifen

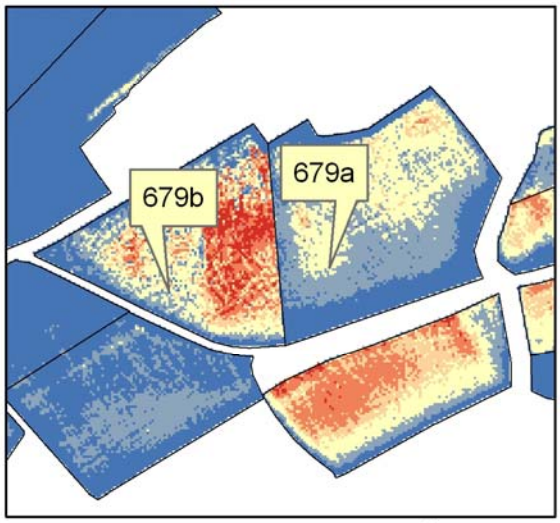
t /(ha*a)

0 - 2	4 - 7.5	10 - 15
2 - 4	7.5 - 10	> 15

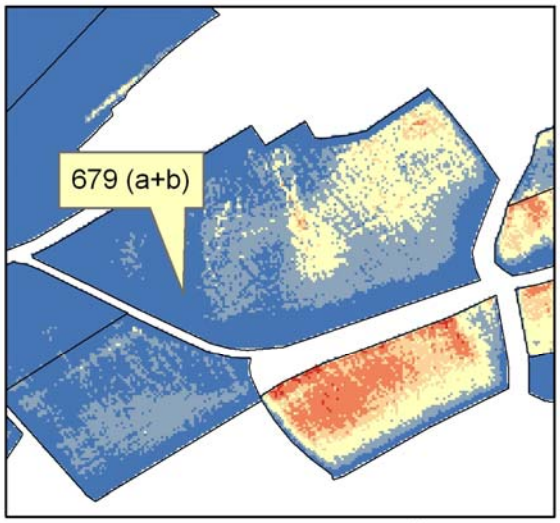
0 90 180 270 360 Meter



Übersicht Frienisberg 1:25'000
Grundlage Swissmap 25 (swisstopo)



Die resultierende Erosion mit den Änderungen in der Fruchfolge und der Bodenbearbeitung für die **Parzelle 679a** und dem Filterstreifen.



Die Erosion mit vorhergehenden Änderungen für die **ganze Parzelle 679** (mit Filterstreifen).

Auswirkungen

Im Bild links unten auf der Abbildung 6.9 (vorderen Seite) sind die Auswirkungen der beiden Massnahmen (C-Faktoränderung, Filterstreifen) für die Parzelle 679a zu sehen. Diese beiden Eingriffe wurden für die ganze Parzelle 679 übernommen und daraus resultierte das Bild rechts unten in der Abbildung 6.9. Man sieht deutlich die flächenhafte Verbesserung gegenüber der Massnahmengrundlage (oben links). Nun sind fast ausschliesslich Gebiete mit maximal 7.5 t/(ha*a) zu erkennen, wo es vorher noch grössere Bereiche mit über 15 t/(ha*a) gegeben hat. Dies wurde durch die Umstellung der Bodenbearbeitung und der Fruchtfolge erreicht. Diese Veränderungen hatten zur Folge, dass der C-Faktor von 0.0663 bei der Massnahmengrundlage, auf 0.0287 reduziert werden konnte (siehe Tabelle 6.5).
Der Bereich des Filterstreifens am nördlichen Ende des Feldes (in AVErosion eingefügt als Grasfläche mit C-Faktor 0.002) wird als dunkelblauer Streifen ohne Erosion dargestellt. Der Zweck ist aber nicht in erster Linie, dass es in diesem Bereich nicht zu Erosionsereignissen kommt, sondern der Filterstreifen soll die Fliessgeschwindigkeit und somit auch die erosive Wirkung des Wassers von oberhalb bremsen und die darin gelösten Bodenpartikel aufhalten (vgl. dazu SCHWERTMANN et al. (1990)), damit sie nicht in Richtung der Infrastruktur weiter gelangen können. Dieses Projekt beinhaltet somit Massnahmen gegen On-Site- wie auch Off-Site-Schäden.

Daten zu Parzelle 679

		679a	**679 (ganz)**
Ursprünglich	Fläche	28'608 m^2	50'424 m^2
	K-Faktor	0.25	0.25
	L-Faktor	2.69	2.41
	S-Faktor	1.84	1.44
	C-Faktor	0.162	0.162
	Erosion	18.50 t /(ha*a)	13.56 t /(ha*a)
Massnahmengrundlage	C-Faktor	0.0663	
	Erosion	7.57 t /(ha*a)	
Massnahme 679 (C-Faktoränderung und Filterstreifen)	C-Faktor	0.0287	0.0287
	Erosion	3.18 t/(ha*a)	2.35 t /(ha*a)

Tabelle 6.5: Übersicht der Parzelle 679 mit den wichtigsten Zahlenwerten.

6.7.3 Projekt 235

Überblick und geplante Massnahmen

Die Parzelle 235 liegt in Suberg, am nördlichen Ende der Ackerfläche auf der östlichen Seite der Autobahn A6 Richtung Lyss-Biel. Es lässt sich eine leichte Muldenform erkennen, welche sich durch mehrere Parzellen bewegt. An den Hängen zur Mulde hin sind stärkere Erosionsvorkommen festzustellen (siehe Abbildung 6.11, oben und unten links). Das Problem scheint also nicht die Tiefenlinie der Mulde selbst zu sein, sondern die Hänge, welche zu dieser Tiefenlinie führen. Deswegen war es hier schwierig, ein lineares Element zu platzieren, da die Fliessrichtungen nicht alle in eine einheitliche Richtung weisen. Deshalb wurde eine flächenhafte Massnahme gewählt.
Zu Versuchszwecken wurde zwischenzeitlich ausprobiert, welche Auswirkungen Direktsaat auf den sechs ausgewählten Parzellen hätte. Auf der Grundlage dieser Resultate zeigte sich eine positive Wirkung bei Parzelle 235. Deshalb wurde diese Variante umgesetzt. Die Bearbeitungsmethoden wurden hier auf Direktsaat umgestellt und die Fruchtfolge für die Direktsaat optimiert. Dies geschah nach den „goldenen Regeln für Direktsaat“ (DIREKTSAAT ABC). Diese besagen unter anderem, dass bei der Direktsaat ein steter Wechsel zwischen Halm- und Blattfrüchten sehr zu empfehlen ist. Darauf wurde bei der Umgestaltung der Fruchtfolge geachtet. Die Fruchtfolge besteht aus Mais-Gerste-Rüben-Weizen und Zwischenkulturen nach Getreide. Alle diese Kulturen wurden mit Direktsaat angebaut. Diese Daten wurden wiederum mit dem C-Faktortool von MOSIMANN & RÜTTIMANN (2002) modelliert (vgl. Abbildung 6.10).
Bei der Direktsaat ist nach einer Umstellungszeit von wenigen Jahren mit gleich hohen Erträgen zu rechnen, wie mit herkömmlichen Bearbeitungsmethoden. Der Vorteil der Direktsaat liegt vor allem bei der höheren Stabilität des Bodens, da die Aggregate nicht durch ständiges Pflügen wieder auseinander gerissen werden und die im Boden verbleibenden Wurzeln zusätzlich noch stabilisierend wirken. Des Weiteren wird die Bodenfauna nicht gestört und kann somit ihre positiven Effekte fortlaufend aufrechterhalten. Ein weiterer zentraler Punkt, welcher für die Direktsaat spricht, ist die fast ganzjährige Bodenbedeckung. Diese wirkt sich sehr stark erosionsmindernd aus und ist im hohen Masse auch für die tiefen Werte des C-Faktors verantwortlich.

Abbildung 6.10: Aussschnitt aus dem C-Faktortool für die Berechnung des C-Faktors der Parzelle 235 mit Direktsaat. (Quelle: eigene Darstellung aus dem Programm EROSION CH V2.02 von MOSIMANN & RÜTIMANN (2002).

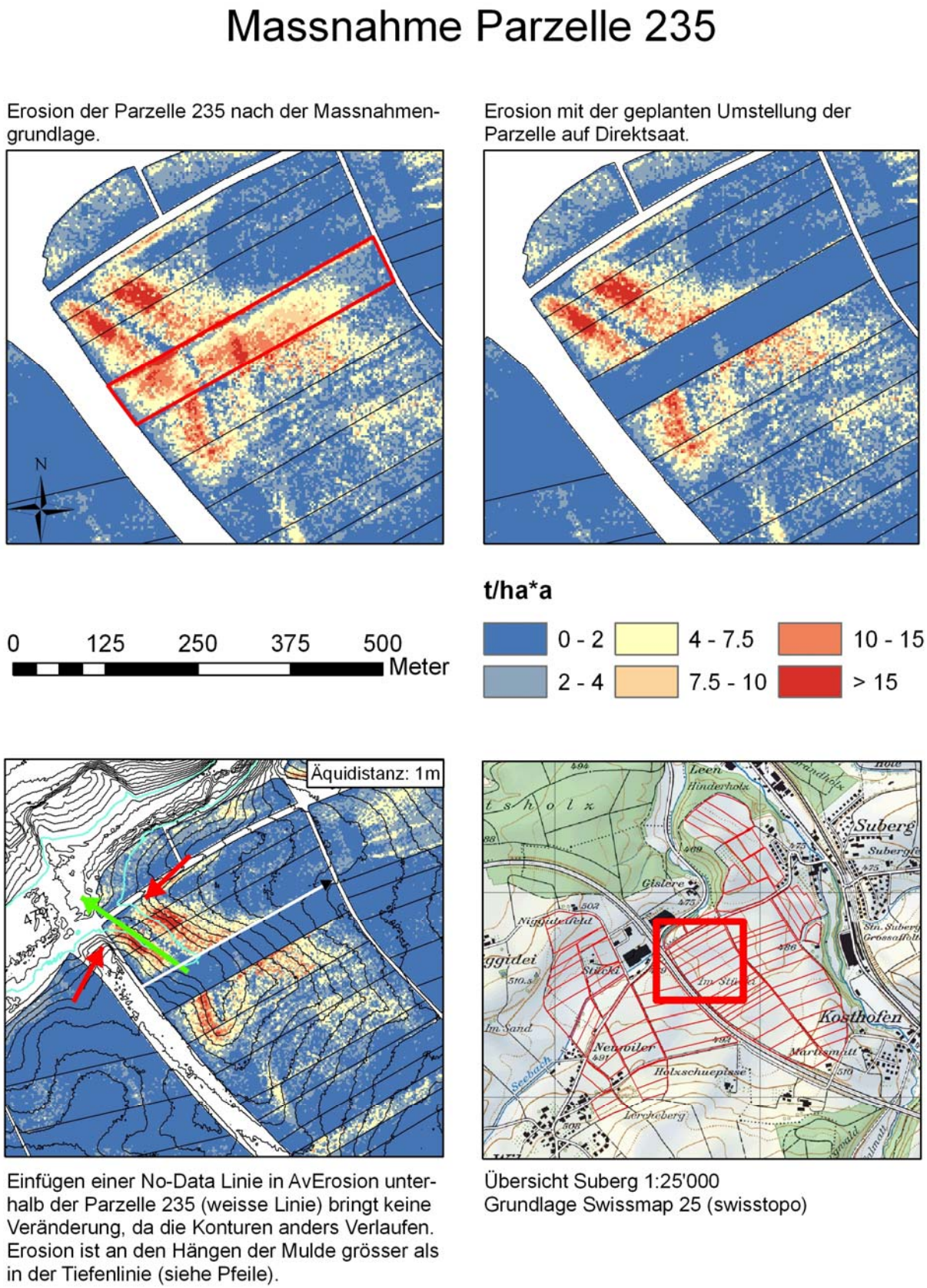


Abbildung 6.11: Erosion der Massnahmengrundlage, die Auswirkungen der Direktsaat auf den Bodenabtrag, die Konturen des Gebietes und die fehlende Wirkung eines linearen Elements (unten links), sowie eine Übersicht von Suberg zur Orientierung. In der Karte oben links rot markiert die Parzelle 235.

Auswirkungen

Die Auswirkungen der getroffenen Massnahme sind in Abbildung 6.11 (oben rechts) deutlich zu sehen. Während nach der Massnahmengrundlage (oben links) noch grössere Gebiete über 10 oder gar 15 t/(ha*a) lagen, sind diese Gebiete nun fast gänzlich von Erosion befreit, was die Blautöne optisch gut veranschaulichen. Die Umstellung auf Direktsaat führte im Endeffekt zu einem sehr geringen C-Faktor von 0.0249, gegenüber 0.1900 bei der Massnahmengrundlage (siehe Tabelle 6.6). Dieser Effekt überträgt sich dann auch auf das Endergebnis der Bodenabtragsabschätzung, welche mit einem Wert von 0.94 t/(ha*a) sehr tief liegt.
Beim Bild unten links (Abbildung 6.11) wird noch verdeutlicht, dass ein lineares Element, etwa eine Hecke oder ein Grassstreifen, in dieser Situation keine grossen Auswirkungen gehabt hätte. Bei diesem Bild ist am nördlichen Rand der Parzelle 235 eine weisse Linie zu erkennen, welche ein eingefügtes lineares Element repräsentiert. Vergleicht man dieses Bild mit dem Bild oben rechts, fallen kaum Unterschiede auf. Dies liegt am Relief und dem Verlauf der Parzellen. Mit den angefügten Konturlinien wird aufgezeigt, wie das Relief in diesem Gebiet beschaffen ist und wo die stark betroffenen Gebiete liegen. Der grüne Pfeil verläuft in der Tiefenlinie der Mulde, wo kaum Erosion auftritt, die roten Pfeile markieren stärkere Erosionsvorkommnisse. Sie liegen an den abfallenden Seiten der Mulde und deswegen hat das lineare Element keinen Einfluss darauf, da die Fliessrichtung des Wassers nicht von Parzelle 235 herkommt, sondern jeweils von den Seiten der Mulde bei jeder Parzelle. Somit hätte ein solches Element keine Auswirkungen. Die Variante mit der Direktsaat bringt dementsprechend bessere Ergebnisse.

Daten zu Parzelle 235

Ursprünglich	Fläche	13’804 m^2
	K-Faktor	0.41
	L-Faktor	1.65
	S-Faktor	0.66
	C-Faktor	0.211
	Erosion	8.28 t/(ha*a)
Massnahmengrundlage	C-Faktor	0.1900
	Erosion	7.46 t/(ha*a)
Massnahme 235 (Direktsaat)	C-Faktor	0.0249
	Erosion	0.94 t/(ha*a)

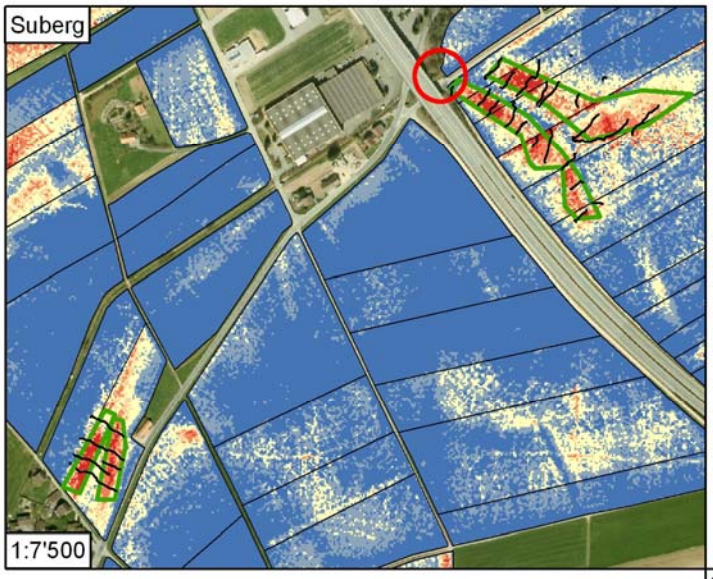
Tabelle 6.6: Übersicht der Parzelle 235 mit den wichtigsten Zahlenwerten.

6.8 On- und Off-Site-Schäden

Die Karte mit den On- und Off-Site-Schäden (Abbildung 6.12) soll aufzeigen, welche Auswirkungen weitere Erosionsereignisse in diesem Gebiet haben könnten und wo diese Ereignisse stattfinden. Grundlage der unten aufgeführten Karten sind die Resultate der Bodenabtragsabschätzungen nach der Massnahmengrundlage. Die hier abgebildeten Erosionsrisiken sind trotz verringertem C-Faktor gegenüber den ursprünglichen Werten noch vorhanden. Es sind meist kleinräumige Schäden, welche nur auf Teilen der Parzellen auftreten. Solche Ereignisse würden im Zuge einer gezielten Massnahmenplanung, wie sie in den vorhergehenden drei Beispielen besprochen wurden, angegangen. Massnahmen zur Verhinderung dieser Schadensfälle könnten gesucht werden. Die Abbildung 6.12 zeigt die Gebiete Suberg, Lobsigen und Frienisberg und die dort modellierten Bodenabträge. Grün markiert sind die On-Site-Schäden, welche nur Schäden auf den Feldern selbst verursachen. Rot eingekreist sind Gebiete, bei welchen Infrastruktur in Mitleidenschaft gezogen wird (Off-Site-Schäden). Solche Gebiete sind von besonderem Interesse, weil sie auch Benachteiligungen und Kosten für Dritte mit sich bringen, sei es durch Reinigungsarbeiten auf Strassen oder beim Eindringen von Erdmassen in private Gebiete (Häuser, Gärten usw.). Eine solche Karte könnte für die zuständigen Behörden einen Hinweis geben, wo evtl. mit Problemen gerechnet werden muss und somit auch Planungsgrundlage für Gegenmassnahmen sein.

Abbildung 6.12 (nächste Seite): Potentielle On- und Off-Site Schadensgebiete. Erosion betroffener Gebiete und ihre Auswirkungen. Grundlage der dargestellten Bodenabträge sind die Abschätzungen nach der Massnahmengrundlage. Verwendet wurden parzellenscharfe C- und K-Faktoren, so wie das DTM-AV. Die Karten sind mit Luftbildern aus Google Earth hinterlegt.

Potentielle On- und Off-Site Schadensgebiete



Suberg hat generell eher schwaches Erosionsrisiko. Jedoch kommt es vor, dass Erdmaterial in den nahe gelegenen Bach gelangt (roter Kreis). Sonst bleiben die Schäden meist auf den Feldern und es werden keine Gebäude oder andere Infrastruktur in Mitleidenschaft gezogen.

Bei **Lobsigen** sieht das Bild ähnlich aus wie bei Suberg. Nur geringes Erosionsrisiko ist vorhanden, jedoch ist es im nordwestlichsten Teil möglich, dass eine Strasse durch Erosionsmaterial betroffen wird. Die Fliesswege zeigen einen direkten Abfluss Richtung Strasse an.

Erosion der Massnahmengrundlage

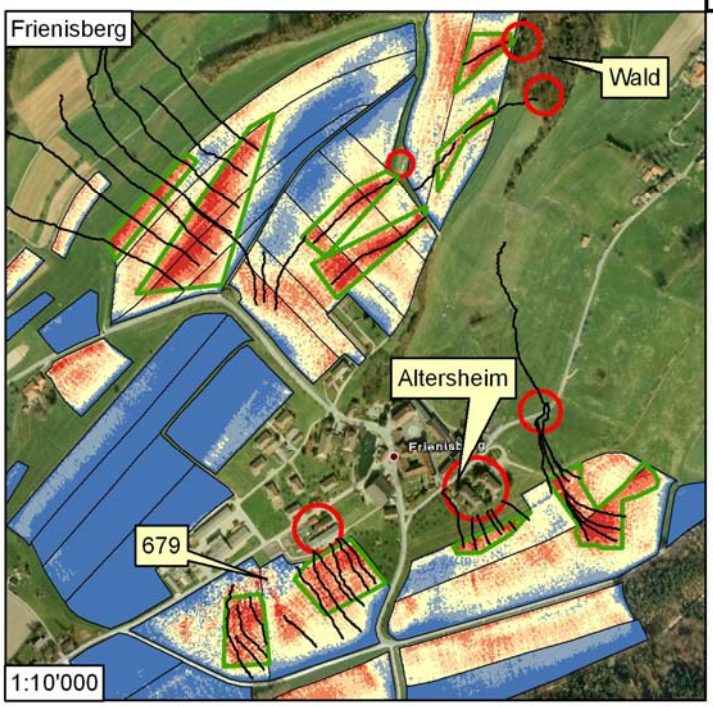
t/ha*a

- 0 - 2
- 2 - 4
- 4 - 7.5
- 7.5 - 10
- 10 - 15
- < 15

On-Site Schäden grösseren Ausmasses

Mögliche Off-Site Schäden

Steilster Pfad von einem bestimmten Punkt aus



Frienisberg ist das am stärksten betroffene Gebiet im gesamten Untersuchungsraum. Es gibt zahlreiche Felder welche trotz der Massnahmengrundlage immer noch stärker betroffene Teilbereiche aufweisen, sei es in Mulden- oder Grabenstrukturen oder besonders steilen Abschnitten. Bei einigen dieser Teilbereiche ist es möglich, dass auch Infrastruktur von den Folgen betroffen wird. Dies z.B. beim Altersheim, wo schon eine Schutzmauer errichtet wurde, bei der Strasse ein Stück weiter unten oder beim Bauernhof unterhalb der Parzelle 679 (siehe rote Kreise). Im nordöstlichen Teil ist es zudem möglich, dass Erdmaterial in den Wald gelangt und dort zu Off-Site-Schäden führt.

6.9 Probleme bei der Modellierung der CPmax-Szenarien und der getesteten Massnahmen

6.9.1 Lineare Elemente

Bei der gezielten Massnahmenplanung für die Parzelle 743 wurde das Problem mit den linearen Elementen schon angesprochen. Dies ist ein generelles Problem beim Modellieren mit AVErosion. Dies soll am Beispiel der Parzelle 749 kurz erklärt werden (Abbildung 6.13). Hier wurde versuchsweise die Wirkung einer eingefügten Grasfläche getestet. Ziel war es, die Erosion in der Muldenform einzudämmen und zusätzlich auch für tiefer liegende Bereiche positive Effekte zu generieren. Zu diesem Zweck wurde im betroffenen Bereich der Parzelle 743 im C-Faktorraster eine Grasfläche (C-Faktor 0.002) eingefügt (vgl. Abbildung 6.13, mitte). Das Resultat war, dass der von der Grassfläche bedeckte Bereich keine Erosion mehr zeigte, aber die darunter liegenden Bereiche keinerlei Veränderung aufwiesen (vgl. Abbildung 6.13 mitte). Die Erwartung war, dass eine starke Reduzierung des C-Wertes die erosive Wirkung des Wassers auch für tiefer liegende Gebiete massgeblich abschwächen würde. Die Funktionsweise des Programms lässt einen solchen Übertragungseffekt aber nicht zu. Die erosive Hanglänge und damit auch die erosive Wirkung des Wassers werden stets vom letzten No-Data Pixel (z.B. Strasse am oberen Ende der Parzelle oder Aussengrenze der Parzellen) im DHM oder dem Parzellenplan berechnet. Der Autor des Programms beschreibt dies folgendermassen:

„Diese No-Data Werte haben eine hydrologische Relevanz […] sie wirken als unüberwindliche Barrieren bei der Berechnung des LS-Faktors, d.h. die Berechnung von Einzugsgebiet/Hanglänge stoppt und beginnt hangabwärts wieder von neuem bei einem Wert von 0.“ (SCHÄUBLE, H. (2005))

Dies ist nur in den Rastern des digitalen Höhenmodells und des Parzellenplans gültig. Da ein stark verminderter C-Wert kein No-Data Wert darstellt und auch keine Auswirkungen im Höhenmodell und dem Parzellenplan aufweist, hat er auf die Fliesswege und die erosive Wirkung des Wassers nur für die betroffenen Bereiche eine Auswirkung. Dort fliesst der tiefe C-Wert über die Gleichung der MUSEL87 in das Resultat mit ein. Die erosive Wirkung des Wassers und die Hanglänge werden durch diesen Bereich für tiefer liegende Gebiete aber nicht beeinflusst. Deshalb muss z.B. eine geplante Grasfläche, wie beim Beispiel 749, mit einer eingefügten Linie am unteren Ende ergänzt werden, um seine positiven Effekte für tiefer liegende Parzellen zu simulieren (Abbildung 6.13, rechts). Dies ist dann aber ein subjektiver Eingriff, der recht starke Auswirkungen hat. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass eine Grasfläche zu einer starken Verminderung der Fliessgeschwindigkeit und –menge des Wassers und somit auch zu einer Reduktion der Erosion führt. Dies auf der Grundlage von verschiedenen Quellen (AUERSWALD & SCHRÖDER (2001), FIENER & AUERSWALD (2003)), welche den Grasstreifen eine stark erhöhte Infiltrationsrate und erosionsmindernde Wirkung zuschreiben. Der wirkliche Nutzen der Grasfläche würde in der Realität wohl zwischen den beiden Extremen liegen, also zwischen den Auswirkungen in der Mitte und rechts in Abbildung 6.13. Der Anwender muss aber selbst entscheiden, ob er ein lineares Element einfügen möchte oder nicht.

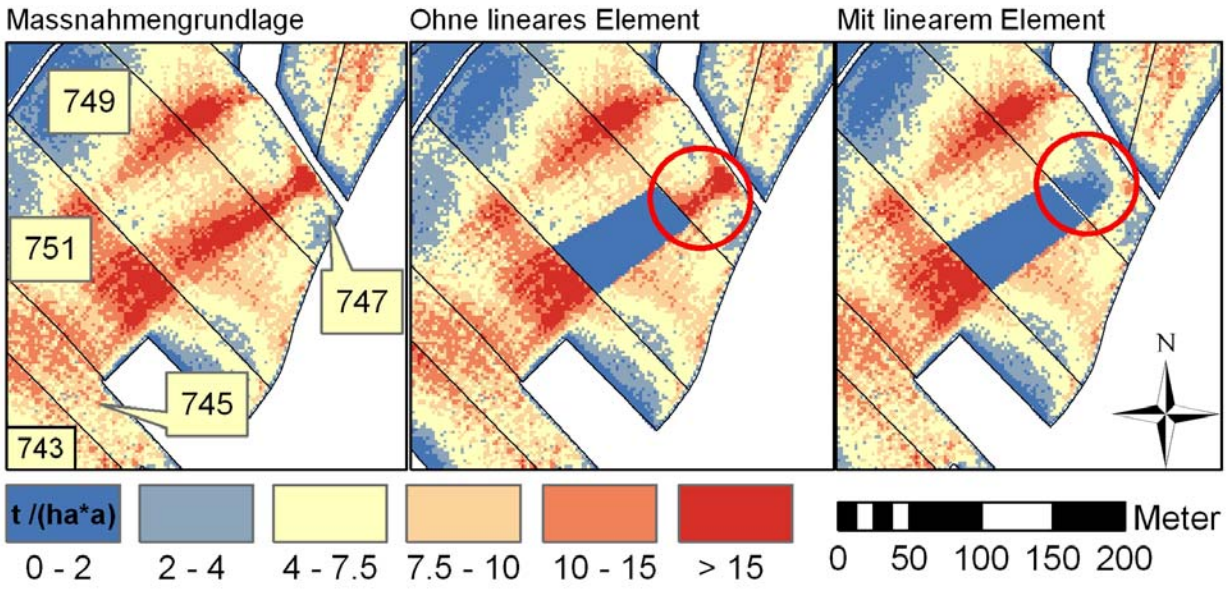


Abbildung 6.13: Auswirkungen einer Grasfläche, mit und ohne linearem Element am unteren Ende, auf die hangabwärts folgenden Bereiche (Beispiel Parzelle 749, Friensberg). Grundlage ist die resultierende Erosion der Massnahmengrundlage. Das mittlere Bild zeigt die eingefügte Grasfläche mit C-Faktor 0.002 ohne lineares Element am unteren Ende (roter Kreis). Das Bild rechts zeigt die Grasfläche mit linearem Element am unteren Ende und die entsprechende Änderung der Erosion.

6.9.2 Übertragungseffekte

Im Kapitel 6.3, Szenario 2, war die Rede von einem Übertragungseffekt. Damit war ein positiver Effekt gemeint, der bei einer Reduktion des Bodenabtrags einer höher liegenden Parzelle auf die darunterliegenden Gebiete erfolgen sollte. Wie im Kapitel 6.3 gesehen, fand dieser Übertragungseffekt nicht statt. Der Grund, weshalb dies nicht funktionierte, wurde bei den Problemen mit den linearen Elementen schon angesprochen. Man ist davon ausgegangen, dass eine Reduktion der Erosion durch Änderungen im C-Faktor Auswirkungen auf die Fliesseigenschaften des Wassers hätte. Wenn man Beispielsweise zwischen zwei Parzellen mit Mais eine Parzelle mit Kunstwiese hat, so sollte diese Parzelle sich positiv auf den Verlauf der Erosionswege auswirken und zur Minderung der Erosion in der tiefer liegenden Parzelle verhelfen. Dies trifft aber nicht zu. Diese Änderungen geschehen nur im C-Faktorraster und haben somit keine Auswirkungen auf das digitale Höhenmodell und den Parzellenplan. Da nur diese zwei Raster Einfluss auf hydrologische Prozesse haben (siehe No-Data Pixel in 6.9.1), bringt die Veränderung des C-Faktors in der Parzelle mit Kunstwiese keine positiven Effekte auf die danach folgenden Gebiete. Es wird lediglich die Erosion in der Kunstwiesenparzelle reduziert. Dies ist meiner Meinung nach ein starker negativer Punkt des Programms AVErosion.

Mit diesem Problem einhergehend ist ein weiteres Problem, welches die Generierung und den Einsatz der C-Faktoren betrifft. Da dieser Übertragungseffekt nicht stattfindet, werden solche Entscheidungen der Landwirte, ein Kunstwiesefeld zwischen zwei Maisfelder zu pflanzen, nicht berücksichtigt. Dies wird aber auch schon bei der Bestimmung des C-Faktors vernachlässigt. Dort wird zwar geschaut was der Landwirt in den letzten 10 Jahren angebaut hat und mit welchen Bearbeitungsmethoden er gearbeitet hat, diese genauen Daten werden aber nur benutzt, um einen Mittelwert über 10 Jahre zu berechnen. Das heisst, es wird nicht darauf

geachtet, wann auf Feld A Mais und auf dem darunterliegenden Feld B Kunstwiese angebaut wird, sondern es wird nur der Mittelwert beider Felder über die 10 Jahre als Berechnungsgrundlage genommen. Damit werden Überlegungen der Landwirte zur Minimierung der Erosion mittels gegenseitiger Anpassung der Fruchtfolgen auf angrenzenden Parzellen ausgeklammert (vgl. Abbildung 6.14). Zusammen mit den fehlenden Übertragungseffekten ist dies mit ein Grund, weshalb die Bodenabtragsabschätzungen mit dem Programm AVErosion tendenziell zu hoch sind.

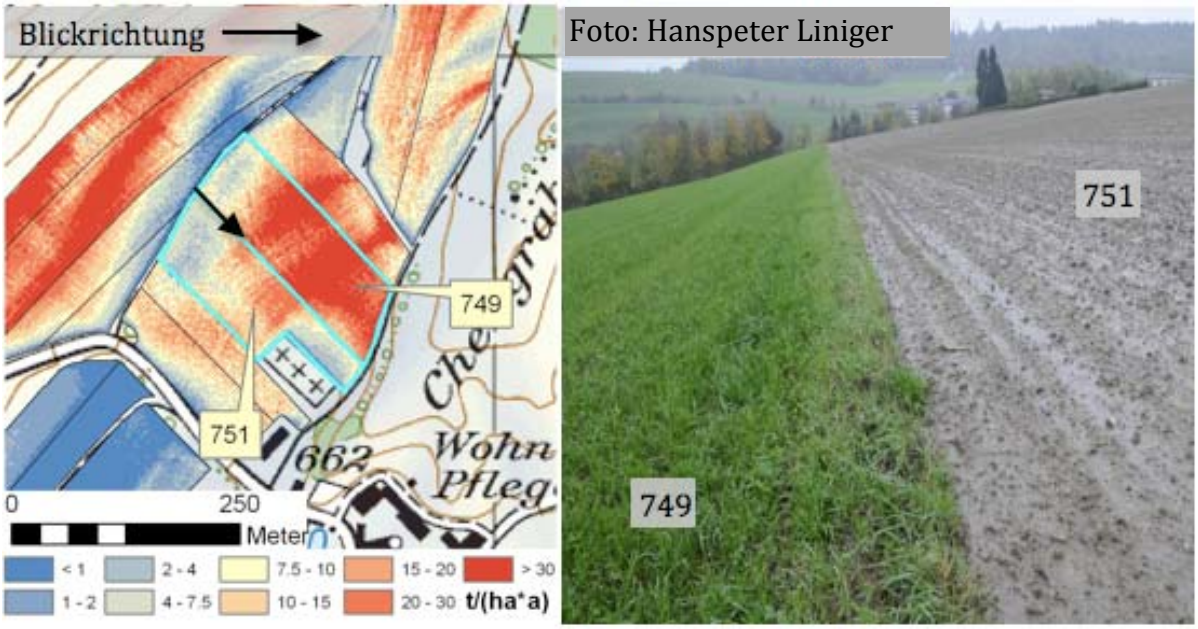


Abbildung 6.14: Parzelle 751 und 749 in Frienisberg mit entsprechender modellierter Erosion (links) und ein Foto von einer gemeinsamen Feldbegehung im Oktober 2008 (rechts). Der positive Effekt der Parzelle 749 mit der Kunstwiese wird im Programm AVErosion nicht erfasst. (Quelle: eigene Darstellung).

7. DISKUSSION UND SYNTHESE

Während der Präsentation der Resultate, deren Besprechung und Interpretation wurden schon einige Schlüsse gezogen und Anmerkungen zum Programm und der Verwendbarkeit gemacht. In diesem Kapitel sollen nun noch Ergänzungen angebracht werden und einige wichtige Punkte nochmals aufgegriffen werden und eine Diskussion der erarbeiteten Resultate stattfinden. So soll auch geklärt werden, ob die anfangs formulierten Ziele erreicht wurden.

Nach der ersten Arbeit durch CHISHOLM (2008), die sich mit dem Programm AVErosion beschäftigt hat, war dies der zweite Versuch die Funktionsweisen und Möglichkeiten der Extension für ArcView 3.x weiter zu testen. Neben den Gegenüberstellungen von parzellenscharfen und gemittelten Faktordaten und dem Einsatz der CPmax-Szenarien wurden Bodenabtragsabschätzungen erarbeitet, welche auch für weitere Arbeiten oder Analysen der Erosionsverhältnisse im Gebiet Frienisberg herangezogen werden können.

Da diese Arbeit in grösserem Rahmen an die COST-Aktion 634 angegliedert war, konnte durch die Mitarbeit des Centre for Development und Environment (CDE) und der Agroscope Reckenholz-Tännikon (ART) von sehr aufschlussreichem Datenmaterial profitiert werden. Es wurden parzellenscharfe C- und K-Faktoren zur Verfügung gestellt, welche im Gegensatz zur vorhergegangenen Arbeit von CHISHOLM (2008), eine deutliche Verbesserung der Datenlage darstellten. Weiter konnte das sehr detaillierte digitale Höhenmodell DTM-AV an der ART benutzen werden. Dieses DTM bietet die Möglichkeit, sehr hoch aufgelöste Resultate und Karten mit einer Auflösung von 2x2 m zu modellieren. Die verwendeten Daten dienten einerseits dem Zweck des Vergleichs zwischen den hier erzielten Resultaten und den Ergebnissen aus CHISHOLM (2008). Andererseits wurde im zweiten Teil versucht, eine Massnahmenplanung zu erarbeiten und modellhaft Lösungen für erosionsanfällige Parzellen zu finden. Dies waren die zwei Hauptziele der Arbeit. Der Vergleich der Ergebnisse der Bodenabtragsabschätzungen mit den kartierten Werten hatte keine vorrangige Stellung, da dies einerseits in einem ersten Schritt bei CHISHOLM (2008) schon geschehen ist und detaillierter noch von Volker Prasuhn an der ART gemacht werden wird.

7.1 Parzellenscharfe Faktordaten und Bodenabtragsabschätzungen

Der Vergleich der parzellenscharfen Faktordaten mit den gemittelten Werten hat gezeigt, dass es nicht immer nötig ist, möglichst detaillierte Faktordaten zu erheben. Die Abschätzungen des K-Faktors, welche durch FRIEDLI (2006) aus digitalen Bodenkarten generiert wurden, lieferten sehr gute Resultate. Bei den C-Faktoren wurde jedoch klar, welche grossen Auswirkungen detaillierte Daten haben können. Da der C-Faktor von Parzelle zu Parzelle stark variieren kann und er zusammen mit den Relieffaktoren die Höhe der Erosion zum grössten Teil bestimmt, sind dort für detailliertere Aussagen hoch aufgelöste Daten zwingend notwendig.

In erster Linie geht es dabei nicht um die Höhe der absoluten Erosionswerte in t/(ha*a), sondern darum, die Grössenordnung zu bestimmen. Während gemittelte Daten von einer gleichbleibenden Bewirtschaftung über ganze Gemeinden ausgehen und dabei individuelle Entscheidungen von Landwirten übergehen, tragen die parzellenscharfen C-Faktordaten diesen Überlegungen Rechnung. So werden zum Beispiel extensiver bewirtschaftete Parzellen im Gebiet in der Datengrundlage auch als solche ausgewiesen und erkannt, was sich auch in den entsprechend modellierten Bodenabträgen widerspiegelt. Diese Modellierungen bilden aber schon den zweiten Schritt einer Bodenabtragsabschätzung und sind bei der detaillierten Erhebung mit wesentlich höherem Zeitaufwand verbunden.
Als ersten Schritt einer solchen Abschätzung wäre eine potentielle Abschätzung der Erosionsgefährdung vorzuschlagen. Dort spielen die C-Faktoren keine Rolle und müssen nicht erhoben werden. Die so erhaltenen Resultate würden die potentielle Gefährdung von Parzellen hervorheben. Somit könnte man einige Gebiete, welche nicht von Erosion betroffen sind, bei einer genaueren Analyse ausschliessen. Bei den als „stark betroffen“ ausgewiesenen Gebieten könnte man die genaue Bewirtschaftung und bereits getroffene Erosionsschutzmassnahmen abklären und so die aktuelle Erosionssituation abschätzen und eventuell weiterführende Massnahmen planen.

Da AVErosion, wie bereits CHISHOLM (2008) in seinen Versuchen zeigte und sich auch bei den ersten Vergleichen dieser Arbeit herausstellte, zu hohe Werte für die Erosion ausgibt, ist mit den absoluten Werten vorsichtig umzugehen. Wie oben erwähnt, geht es mehr um eine Übersicht der gefährdeten Bereiche, als um eine absolute Abschätzung des Bodenabtrags. Trotz der viel detaillierteren Ausgangslage (C-Faktoren auf 1/1000 genau), sind die Erosionswerte nicht als absolute Werte zu verwenden. Die Überschätzung der Erosion liegt nicht am Programm AVErosion, sondern an den verwendeten Modellen und Faktorwerten. Das Modell der MUSLE87, welches von HENSEL & BORK (1988) erarbeitet wurde und dieser Arbeit zu Grunde liegt, neigt bei der Erhebung der einzelnen Faktoren zur Überschätzung. Dies wurde auch vom Autor von AVErosion, Dr. Holger Schäuble, bestätigt. Die Berechnung der einzelnen Faktoren der USLE wurden von SCHWERTMANN et al. (1990) an mitteleuropäische Verhältnisse angepasst. Diese Anpassungen sind nicht über jeden Zweifel erhaben, da sie, wie jedes Modell, Abschätzungen und Vereinfachungen der Natur abbilden.

Der Vergleich der vorliegenden Resultate mit den kartierten Daten von Volker Prasuhn hat aber gezeigt, dass AVErosion die Grössenordnungen sehr gut abschätzt. D.h. hohe kartierte Werte fanden sich an den Stellen, wo auch das Programm hohe Werte ausgegeben hat und umgekehrt. Die Lokalisierung der gefährdeten Gebiete funktioniert recht gut. Deswegen dürfen die Erosionsabschätzungen mit AVErosion abschliessend, trotz der teilweise starken Überschätzung der Werte, aus obengenannten Gründen als gut und brauchbar bezeichnet werden.

7.2 Toleranzwert

Aus den in Kapitel 7.1 gezogenen Erkenntnissen muss der im zweiten Resultat-Teil, den CPmax-Szenarien, gesetzte Toleranzwert von 7.5 t/(ha*a) in Frage gestellt werden. Wie gezeigt wurde, waren die modellierten Abschätzungen gegenüber den kartierten Werten, sehr viel höher. Bei der Festlegung des Schwellenwertes bei 7.5 t/(ha*a) wurde von einer Überhöhung der Werte durch das Programm ausgegangen. Deswegen wurde der Wert auch fast auf das doppelte des Richtwertes aus der Verordnung über die Belastung von Böden (VBBo 1998) von 4 t/(ha*a) gesetzt. In Anbetracht der sehr viel höher erzielten Resultate mit AVErosion, könnte man sich überlegen, diesen Wert noch höher zu setzen. Da der erste Vergleich von kartierten Daten von Volker Prasuhn und den vorliegenden Daten erst nach der Festlegung des Toleranzwertes stattfand, standen diese Resultate noch nicht zur Verfügung. Auf eine nachträgliche Korrektur wurde wegen des schon fortgeschrittenen Arbeitsverlaufes verzichtet. Einerseits kann man so zur Aussage kommen, dass man mit einem eher zu tief angesetzten Toleranzwert auf der sicheren Seit ist, was bei einer Modellierung eine durchaus positive Eigenschaft ist. Andererseits kann man sich auch generell die Frage stellen, wieso in der VBBo der Toleranzwert auf 4 t/(ha*a) gesetzt wurde? Wieso liegt der Wert nicht tiefer? Wieso nicht höher? Bei dieser grundsätzlichen Frage geht es, neben Überlegungen zu Off-Site-Schäden[6], eigentlich um die Inwertsetzung der Ressource Boden durch die Gesellschaft und die Bedeutung und die Wahrnehmung, welche diese für ökologische Nachhaltigkeit aufbringt. Der Toleranzwert für einen mittleren jährlichen Bodenabtrag hat die Aufgabe, den bewirtschafteten Boden vor Ausbeutung und Übernutzung zu schützen, um ihn auch nachfolgenden Generationen zu erhalten.
Geht man davon aus, dass ein mittlerer jährlicher Bodenabtrag von 10 t/(ha*a) etwa einem Abtrag von 1 mm Boden pro Hektar entspricht, so würden 0,4 mm pro Hektar mit einem Schwellenwert von 4 t/(ha*a) toleriert. Führt man diese Überlegung weiter, wären in 100 Jahren 4 cm und in 500 Jahren 20 cm des fruchtbaren Oberbodens verschwunden, falls der Schwellenwert tatsächlich auch eingehalten würde. Im Zeichen der Nachhaltigkeit wären der Fortbestand des Bodens und seine Fruchtbarkeit über 500 Jahre hinweg gesichert. Nun kann man sich Fragen, wieso soll man den Boden solange schützen oder weswegen nicht noch

[6] Bei der Festlegung der Toleranzwerte von 2 bzw. 4 t/(ha*a) spielte nicht nur der Verlust der Bodenfruchtbarkeit über mehrer Generationen eine Rolle, sondern auch Off-Site-Schäden mit Gewässerbelastung. Bei > 4 t/(ha*a) ist mit nicht akzeptierbaren bzw. nachhaltigen Off-Site-Schäden zu rechnen. (Volker PRASUHN)

länger? Weshalb erlaubt man überhaupt Bodenabtrag? Da Nachhaltigkeit nach allgemeinem Verständnis nicht nur eine ökologische, sonder auch eine ökonomisch und eine soziokulturelle Komponente beinhaltet, muss man bei der Festlegung des Schwellenwertes den Landwirten auch einen gewissen Spielraum belassen, damit sie ihren Lebensunterhalt bestreiten können. Würde man den Schwellenwert auf 0 t/(ha*a) herabsetzen, würde dies bedeuten, dass auf allen gefährdeten Parzellen, welche ein gewisses Gefälle aufweisen, kein Ackerbau mehr betrieben werden dürfte. Dies wäre aus Sicht der ökonomischen und soziokulturellen Komponente der Nachhaltigkeit nicht zu verantworten. Somit widerspiegelt ein solcher Schwellenwert das Resultat einer gesellschaftlichen Diskussion über Nachhaltigkeit und die Wertschätzung der Ressource Boden. Dies bedeutet für den hier verwendeten Schwellenwert, dass die Höhe in dem Sinn auch nicht so eine starke Rolle spielt, da die Bestimmung der Toleranzgrösse nicht eine eindeutige Sache ist. Die in der Arbeit berechneten Szenarien und Karten sind als Auswertung des Programms und seiner Funktionen zu sehen und so spielen die exakten Zahlenwerte in diesem Teil nicht so eine grosse Rolle.

7.3 Massnahmenplanung

Bei der Erarbeitung der Massnahmenplanung ging es auch im Hinblick auf die Diskussion über den Schwellenwert (Kapitel 7.2), mehr darum, die Möglichkeiten und die Verwendung des Programms für diese Zwecke zu testen, als absolute Aussagen zu machen. Bei der Umgestaltung der Bewirtschaftung (C-Faktortool), welche Änderungen bei den Bearbeitungsmethoden sowie den angepflanzten Kulturen beinhaltete, sollte eine Reduktion des C-Wertes auf einen berechneten Wert erreicht werden. Der Faktor wurde auf 1/1'000 genau berechnet. In Anbetracht der Überschätzung der Erosion, welche daraus resultierte, scheinen diese genau modellierten Faktordaten ziemlich überflüssig zu sein. Andererseits bietet gerade das C-Faktortool aus der Arbeit von MOSIMANN & RÜTTIMANN (2002) die Möglichkeit, Auswirkungen der betrieblichen Umgestaltung zu beobachten. So konnten Erkenntnisse darüber gewonnen werden, welche Werte verändert werden müssten, um den C-Faktor leicht oder stark herabzusetzen. So sollten die C-Werte nicht als absolute Zahlen, sondern als Grössenordnung angesehen werden, welche mit geeigneten Eingriffen mehr oder weniger stark gesenkt werden können. In einem konkreten Fall würde auf der Grundlage der aktuellen Bodenabtragsabschätzung einer Parzelle festgelegt, um wieviel Prozent der Abtrag gesenkt werden sollte. Aus den Erkenntnissen, welche bei der Massnahmenplanung gewonnen wurden, könnte bei der Umgestaltung der Bewirtschaftung mit dem C-Faktortool begonnen werden. So könnte abgesehen von den absoluten Werten, der C-Faktor, mit Eingriffen in die Bearbeitungsmethoden und die Fruchtfolge, gesenkt werden. Zusätzlich könnten dann auch noch gezielte Veränderungen auf der Parzelle selbst in Betracht gezogen werden, um kleinräumig auftretende Erosionsereignisse in den Griff zu bekommen. Diese Umgestaltungen können durchgeführt werden ohne mit absoluten Werten arbeiten zu müssen.
Ein gewichtiger Nachteil scheinen jedoch die Probleme mit den linearen Elementen und den Übertragungseffekten zu sein, welche in Kapitel 6.9 besprochen wurden. Da extensive

Flächen mit tiefem C-Faktor, welche als Massnahmen bei der Minimierung der Erosion eingesetzt wurden, keinerlei Auswirkungen auf die erosive Wirkung des Wassers haben, mussten subjektiv abgeschätzte lineare Elemente eingefügt werden, um die angedachten Effekte der umgestalteten Flächen zu simulieren. Die eingesetzten Elemente hatten teils sehr starke Auswirkungen und überschätzten so den Effekt der eingesetzten Flächen. Die Wahrheit wird wohl irgendwo zwischen diesen Extremen liegen. Eine mögliche Lösung wäre, dass die Werte des C-Faktors in der Berechnung der hydrologischen Daten irgendwie Einfluss bekommen würden.
Trotz der angesprochenen Probleme darf auch bei diesem Teil abschliessend ein positives Fazit gezogen werden. Die CPmax-Szenarien waren zwar für den hier nötigen Einsatz nicht sinnvoll zu gebrauchen (siehe Kapitel 7.4 und Kapitel 6), jedoch halfen die Modellierungen mit AVErosion zusammen mit dem C-Faktortool von MOSIMANN & RÜTTIMANN (2002), geeignete Massnahmen zur Reduktion der Erosionsaufkommen zu finden.

7.4 Anwendungsempfehlungen für die Massnahmenplanung mit AVErosion

Ursprünglich sollten die Grundlagen für die Massnahmenplanung mit den CPmax-Szenarien von AVErosion bereitgestellt werden. Wie in Kapitel 6 besprochen wurde, hat dies nicht wunschgemäss funktioniert. Die Szenarien lieferten fragwürdige Resultate, welche als Grundlage nicht zu gebrauchen waren. Nach einigen abgeänderten Versuchen wurde schliesslich auf die Anwendung der CPmax-Szenarien verzichtet und eigene Berechnungen herangezogen. Diese basieren auf einem einfachen Dreisatz, der hier nochmals kurz aufgeführt wird.

Bodenabtrag : ursprünglicher C-Wert = Schwellenwert : neuer C-Wert

Ausser dem neuen C-Wert sind alle Werte bekannt. Somit ergibt sich die Auflösung daraus:

(Schwellenwert/Bodenabtrag) * ursprünglicher C-Wert = neuer C-Wert

Diese Berechnungen lieferten gute Grundlagen für die weitere Massnahmenplanung. Sie sind einfach zu berechnen und effizient, wenn man einen neuen C-Wert für die ganze Parzelle sucht. Die hier neu berechneten C-Werte führen dazu, dass die gemittelten Bodenabträge der behandelten Parzellen auf die Höhe des angegebenen Schwellenwertes fallen. Dies wird mittels Umgestaltung der Bodenbearbeitung und der Fruchtfolge erreicht (flächenhafte Massnahmen). Diese Massnahmen verhindern jedoch nicht parzelleninterne Unterschiede beim Erosionspotential. Gebiete, welche immer noch erhöhtes Erosionsaufkommen zeigen, können aus der neu berechneten Bodenabtragsabschätzung in rasterzellenschärfe lokalisiert werden. Für solche räumlich eingegrenzten Teilgebiete können dann weitere Massnahmen geplant werden. Einerseits kann der C-Faktor durch weiterführende Änderungen der Bearbeitungsmethoden und der Fruchtfolge gesenkt werden. Andererseits können lineare

Elemente, wie Hecken oder Baumreihen, gezielt eingesetzt werden. Weiter Möglichkeiten sind z.B. „grassed waterways“ oder Filter- und Grasstreifen, welche im C-Faktorraster eingefügt werden können, um deren Auswirkungen zu testen. Hierbei sei aber auf die Probleme mit solchen Elementen hingewiesen (Kapitel 7.3 und 6.9).
Somit bietet die AVErosion-Extension von der Abschätzung des Bodenabtrags bis hin zur Anwendung von Massnahmen vielerlei Möglichkeiten. Das Programm ist aber nicht fehlerfrei und die Werte sind stets mit einem kritischen Auge zu betrachten und nicht als absolute Werte zu sehen. Abschliessend soll auch noch die Berechnung des Fruchtfolgefaktors aus dem Programm „Bodenerosion selber abschätzen“ (EROSION CH V2.02) von MOSIMANN & RÜTIMANN (2002) erwähnt werden. Dieses Tool bietet die Möglichkeit, mit Angaben zu Fruchtfolge und Bearbeitungsmethoden und –zeitpunkten über 10 Jahre einen gemittelten C-Faktor für jede Parzelle zu berechnen. Gerade für die gezielte Massnahmenplanung ist dieses C-Faktortool sehr nützlich und bietet eine gute Ergänzung zur AVErosion-Extension.

7.5 Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Bruttoerosion berechnet und auch die tolerierbaren Nutzungsintensitäten wurden verwendet. Nun stünde mit der Stoffbilanz noch eine weitere Option in der AVErosion-Extension zur Verfügung. Aus zeitlichen und vor allem auch thematischen Gründen wurde auf diesen Bereich in der vorliegenden Arbeit verzichtet.
Mit der Stoffbilanz kann die Nettoerosion berechnet werden. Im Gegensatz zur Bruttoerosion zeigt die Stoffbilanz die Auswirkungen aller erosiven Vorgänge (Kappung des Bodenprofils, Akkumulation oder ein unbeeinflusstes Bodenprofil). Es werden also Gebiete mit Materialverlust- und -gewinn ausgewiesen. Zur Berechnung der Stoffbilanz werden nur zwei Raster benötigt. Ein vorher berechneter rasterzellenscharfer Datensatz der Bruttoerosion und ein digitales Höhenmodell. Als Ausgabe erfolgt ein Stoffbilanzraster, der zellgenau Aufschluss über Gebiete mit effektivem Gewinn, kein Gewinn und kein Verlust, oder effektiver Verlust an Bodenmaterial angibt. Hier bestünde sicher noch weiteres Potential um die AVErosion-Extension einzusetzen (vgl. SCHÄUBLE 2005).

Im Weiteren wird dieser Masterarbeit ein Projekt für das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) angeschlossen. Wie in Kapitel 1 schon angesprochen, wurden Fachpersonen des BLW auf Resultate dieser Arbeit aufmerksam und sahen einen Verwendungszweck für solche Bodenabtragsabschätzungen. So wurde ein Projekt aufgegleist, welches zum Ziel hat, für das schweizerische Mittelland potentielle Erosionsabschätzungen im Massstaab 1:5'000 herzustellen. Die Resultate könnten dann als Grundlage für die Beurteilung von gegebenen Erosionspotentialen dienen und für Kantone ein Instrument für die Umsetzung der in der VBBo (1998) gemachten Bestimmungen bieten. Weitere Angaben können zu diesem Projekt im Moment nicht gemacht werden. Startpunkt wird voraussichtlich September 2009 sein und mit dem Abschluss wird Ende 2010 gerechnet.

Nun hoffe ich, dass ich für weitere Arbeiten oder andere Nutzer von AVErosion einige aufschlussreiche Resultate erarbeiten konnte und mit meinen Ergebnissen nachfolgende Projekte unterstützen kann. Trotz der angesprochenen Probleme scheint mir die AVErosion-Extension - gerade wegen der Benutzerfreundlichkeit und einfachen Handhabung - ein geeignetes Tool für eine rasche Abschätzung der Bodenabträge und Erosionspotentialen zu sein. Abschliessend ist noch zu erwähnen, dass eine angekündigte Version von AVErosion für ArcGIS 9.x wohl nicht mehr realisiert wird. Dies wurde mir vom Autor des Programms, Dr. Holger Schäuble, bestätigt. Somit bleibt dem Anwender der Transfer von Daten zwischen ArcView 3.x und ArcGIS 9.x auch weiterhin nicht erspart.

8. LITERATURVERZEICHNIS

ARBEITSGRUPPE BODENEROSION NORDWESTSCHWEIZ**.** Erosion – eine schleichende Gefahr. Kanton Basel-Landschaft. Boden: Merkblätter.URL: http://www.baselland.ch/fileadmin/baselland/files/docs/ bud/boden/merkblatt/merkblatt-bodenerosion.pdf. Zugriff: 9. April 2009.

AUERSWALD, K., SCHRÖDER R. (2001). Simulation von verschlämmungsgesteuertem Abfluss heterogen genutzter Einzugsgebiete. In: Wasser & Boden, 53/10, S. 17-20 (2001). Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin. Von URL: http://www.wzw.tum.de/gruenland/people/Au_d-Dateien/au_publ-dateien/2001_Auerswald-WuB.pdf. Zugriff: 25.02.2009.

BFS – BUNDESAMT FÜR STATISTIK [Hrsg.] (2002, 2003, 2004). Eidgenössische Betriebszählungen (Sektor 1) 02/03/04. Servicestelle GEOSTAT.

BFS – BUNDESAMT FÜR STATISTIK [Hrsg.] (2000). Generalisierte Bodeneignungskarte 1:200'000, Servicestelle GEOSTAT.

BFS – BUNDESAMT FÜR STATISTIK [Hrsg.] (1997). Arealstatistik 1992/97. Servicestelle GEOSTAT.

BLUME, H.-P. (Hrsg.) (2004). Handbuch des Bodenschutzes – Bodenökologie und –belastung, Vorbeugende und abwehrende Schutzmassnahmen. Ecomed Verlagsgsellschaft, Landsberg am Lech.

BODE, M. (1989). Bodenverbreitung und Schwermetallgehalt der Böden unter dem Einfluss von Bodenerosion und landwirtschaftlichen Betriebstypen im Gebiet Frienisberg-Grossaffoltern-Rapperswil (Schweizer Mitteland). Diplomarbeit Geografisches Institut Universität Hannover.

CHISHOLM, M. (2008). Analyse der Bodenerosion mit der AVErosion-Extension für ArcView. Diplomarbeit, Geographisches Institut Bern, Abteilung Entwicklung und Umwelt (CDE).

DIREKTSAAT ABC – Tips zu Direktsaat von Praktikern für Praktiker. Fruchtfolge/Kulturenfolge. URL: http://www.no-till.ch/direktsaat/ABC_Fruchtfolge.htm. Zugriff: März 2009.

DHM25 © 2005 Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), Bern.

DTM-AV © 2005 Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), Bern.

FAP (Eidgenössische Forschungsanstalt für landw. Pflanzenbau) (1979). Bodenkart/Bodenhydrologie Hardern, Grossafoltern. 1:10'000, FAP 0146.

FELDWISCH, N., DANKELMANN, E., MOLLENAUER, K., SCHOLTEN, T., SCHOLZ, K. (2006). Bodenerosion durch Wasser, Bewertungsmethodik und Instrumente der deutschen Bundesländer. Hrsg. Bundesverband Boden, BVB-Materialien, Band 14. Erich Schmith Verlag.

FIENER, P.; AUERSWALD, K. (2003): Effectiveness of grassed waterways in reducing runoff and sediment delivery from agricultural watersheds. J. Environ. Qual. 32: 927-936. Von URL: http://jeq.scijournals.org/cgi/reprint/32/3/927. Zugriff: 25.02.2009.

FORMEN DER WASSEREROSION. URL: http://www.baselland.ch/fileadmin/baselland/ files/docs/bud/boden/fotos/erosion/ formen-wassererosion.pdf. Zugriff: 27. Mai 2009.

FRIEDLI, S. (2006). Digitale Bodenerosionsgefährdungskarte der Schweiz im Hektarraster – Unter Besonderer Berücksichtigung des Ackerlandes. Diplomarbeit, Geographisches Institut Bern, Abteilung Entwicklung und Umwelt (CDE).

HADES. Hydrologischer Atlas der Schweiz. URL: www.hades.unibe.ch/hades_d/.

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.

HUDSON, N. (1995). Soil Conservation, Third Edition. BT Batsford Limited, London.

LEDERMANN, Th., HERWEG, K., LINIGER, H., SCHNEIDER, F., HURNI, H., PRASUHN, V. (2008). Erosion Damage Mapping: Assessing Current Soil Erosion Damage in Switzerland. Catena Verlag, Reiskirchen.

MOSIMANN, Th. (2003). Erosionsgefährdung und Schutz der Böden durch die Bewirtschaftung im Kanton Basel-Landschaft – Entwicklungstrends aus dem Monitoring 1982-2002 und Folgerungen für die Beratung. Amt für Umweltschutz und Energie(AUE), Liestal. Link: http://www.baselland.ch/fileadmin/baselland/files/docs/bud/boden /fachperson/bericht-2004-1.pdf.

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

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

MOSIMANN, T., CROLE-REES, A., MAILLARD, A., NEYROUD, J-A., THÖNI, M., MUSY, A., ROHR, W. (1990). Bodenerosion im Schweizerischen Mitteland - Ausmass und Gegenmassnahmen. Bericht 51 des Nationalen Forschungsprogrammes „Nutzung des Bodens in der Schweiz“. Liebefeld, Bern.

PEYER, K. u. v. a.; BODENKARTEN 1:25'000 (versch. Jahre). Eidgenössische Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau Zürich-Reckenholz, 13 Exemplare.

PRASUHN, V. (2008). Parzellenscharfe C- und K-Faktoren für die Region Frienisberg. Unveröffentlichte Daten.

PRASUHN, V. (2005). Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Erosion. In: Schriftreihe der FAL 57, Agroscope FAL, Reckenholz : 108-119.

PRASUHN, V. & MOHNI, R. (2003). GIS-gestützte Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeingräge aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Zürich-Reckenholz (FAL), Interner Bericht Agroscope FAL Reckenholz.

PRASUHN, V. & GRÜNIG, K. (2001). Evaluation der Ökomassnahmen – Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Bodenerosion. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Zürich-Reckenholz (FAL), Schriftreihe der FAL 37.

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). Agriculture Handbook Number 703, U.S. Dept. Of Agriculture.

ROGLER, H., SCHWERTMANN, U. (1981). Erosivität der Niederschläge und Isoerodentkarte von Bayern. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung, 22 : 99-112.

ROHR, W. (1999). Bodenerosion auf Ackerflächen. NFP 22 Boden, Untersuchungsergebnisse; unveröffentlicht.

RÜTTIMANN, M. (2005). Kulturkalender und kulturspezifische Teil-C-Faktoren (Saat bis Ernte) für ausgewählte Hauptfrüchte im zentralen Mittelland (Standardtermine), unveröffentlicht.

SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (1998). Lehrbuch der Bodenkunde. F. Enke Verlag, Stuttgart.

SCHWERTMANN, U., VOGL, W., KAINZ, M. (1990). Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmassnahmen. Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart.

SCHÄUBLE, H. (2006): AVErosion 1.0 für ArcView – Berechnung von Bodenerosion und –akkumulation nach den Modellen USLE und MUSLE87. URL: http://www.terracs.de/ArcView_3_x/AVErosion/averosion.html. Zugriff: Mai 2008.

SCHÄUBLE, H. (2005). AVErosion 1.0 für ArcView – Berechnung von Bodenerosion und –akkumulation nach den Modellen USLE und MUSLE87. URL: http://www.terracs.com/averosion_deu.pdf

SCHÄUBLE, H. (1999). Erosionsprognosen mit GIS und EDV – Ein Vergleich verschiedener Bewertungskonzepte am Beispiel einer Gäulandschaft. Diplomarbeit, Geographischen Institut Eberhard-Karls-Universität, Tübingen.

SwissMap 25 © 2000 Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), Bern.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, USDA. URL: ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NCGC/products/nri/2003nri/nri03ch19.pdf. Zugriff: 4. Nov. 2008.

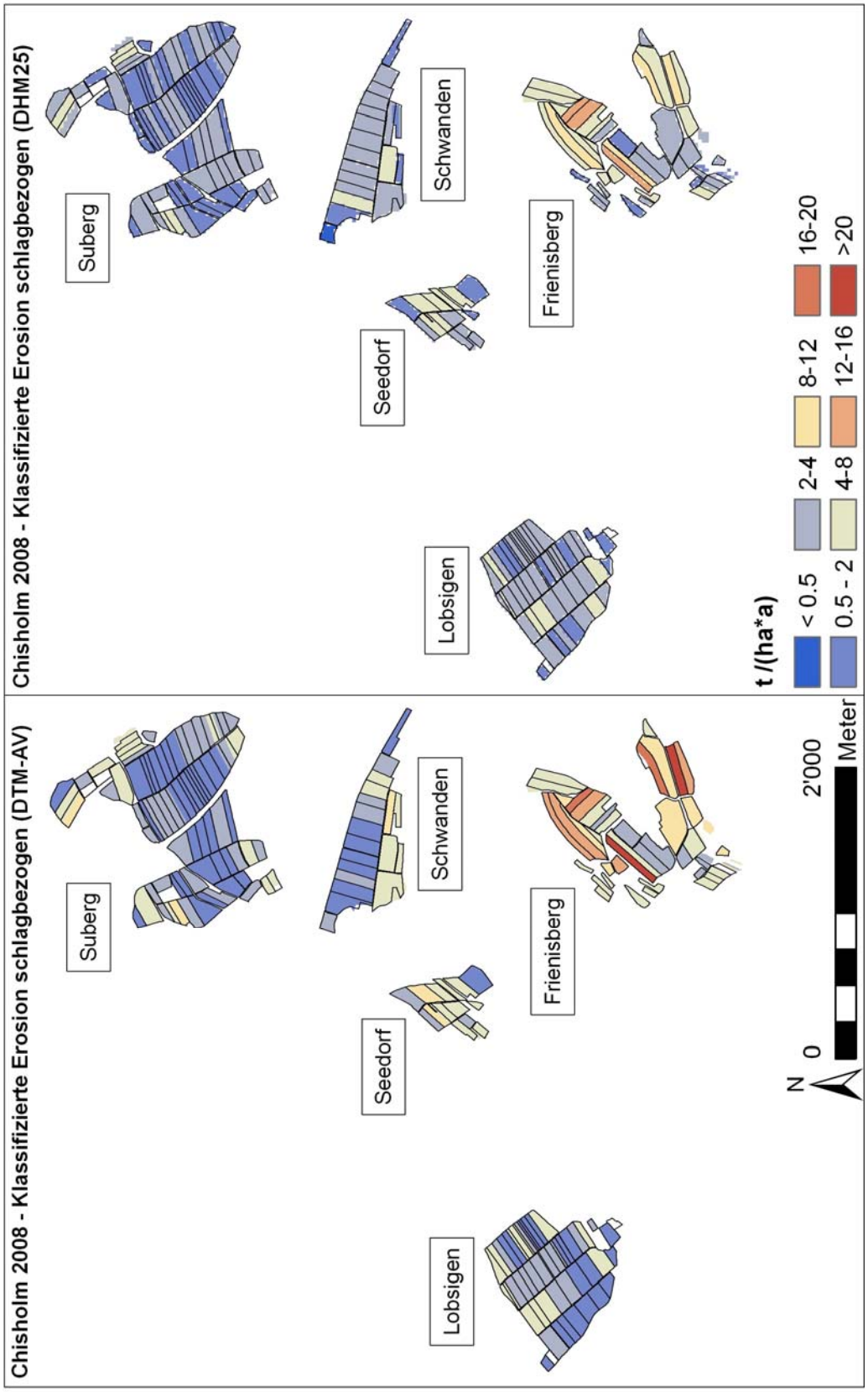
VBBo – Verordnung über Belastung des Bodens (1998). 814.12. Stand 1. Juli 2008.

VULLIOUD, P. (2005). Optimale Fruchfolgen im Feldbau (3. Auflage) Agroscope RAC Changins. In: Agrarforschung 12 (7) : 2005. URL: www.db-acw.admin.ch/ch_cha_05_tap_RSA_37_4_rotation_d.pdf. Zugriff: 4. Feb. 2009.

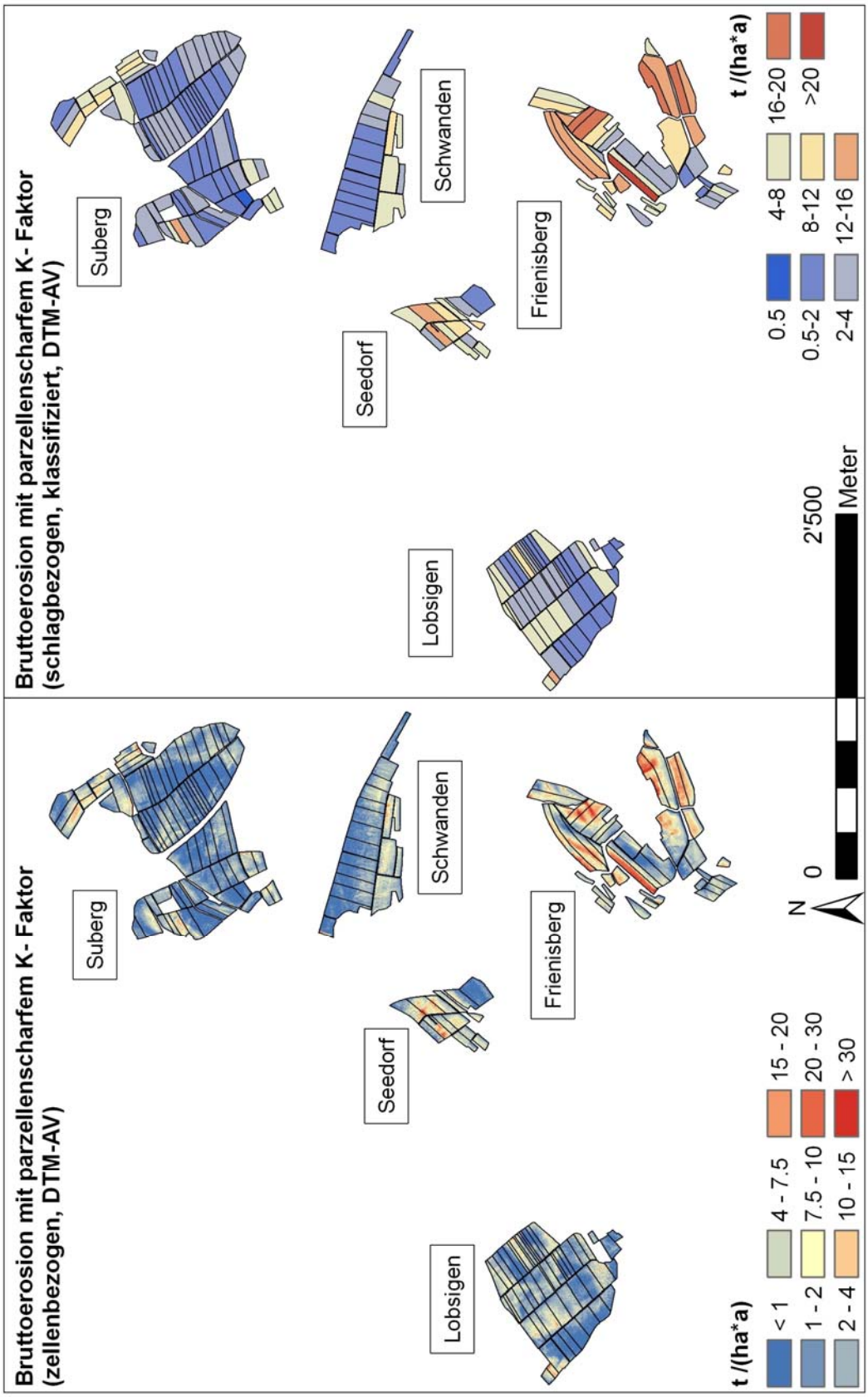
WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses – a Guide to Conservation planning. U.S. Dep. Of Agriculture, Handbook No. 537. Washington. URL: http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/ad_hoc/36021500USLEDatabase/AH_537.pdf. Zugriff: 4. Nov. 2008.

9. ANHANG

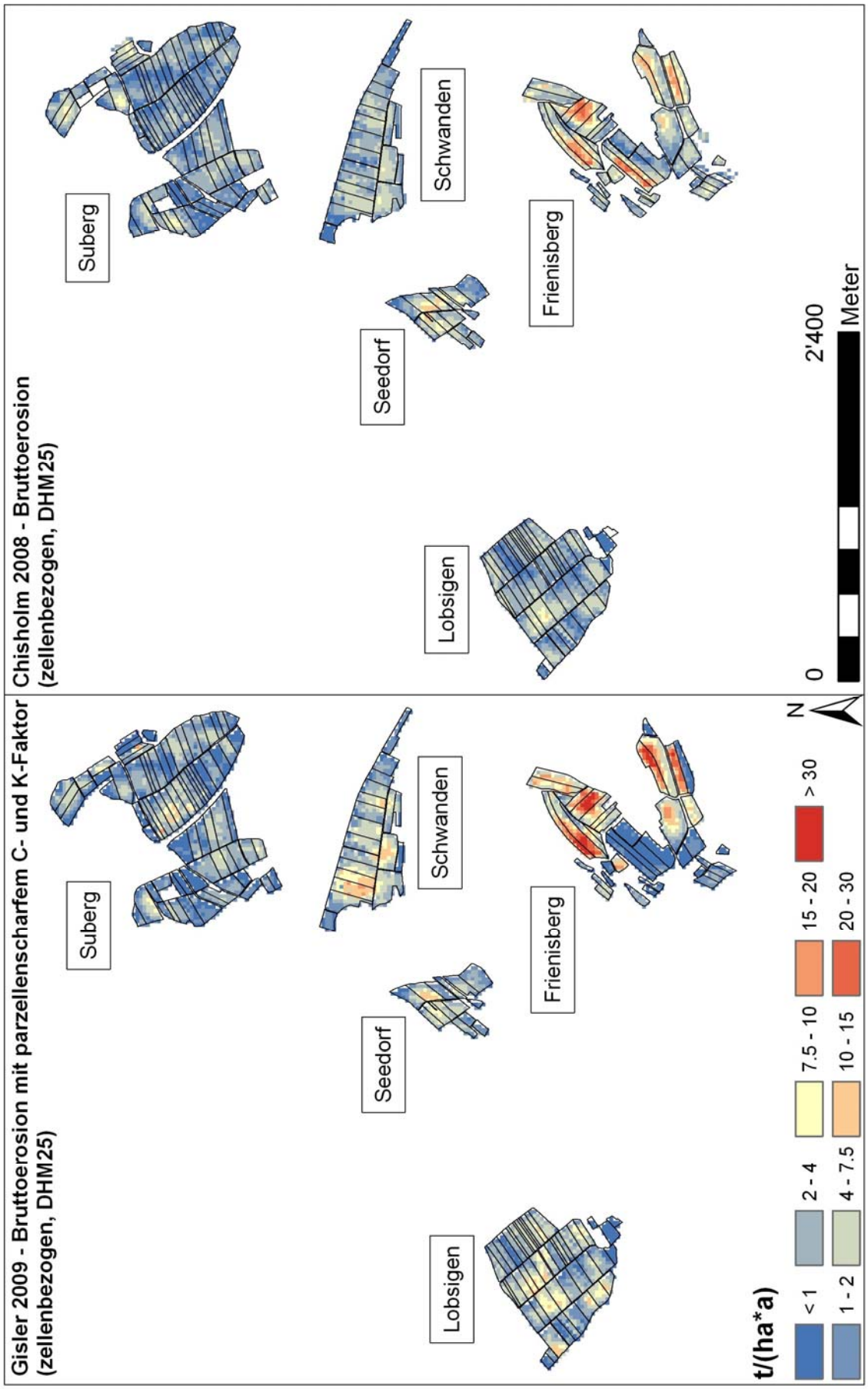
Anhang 1



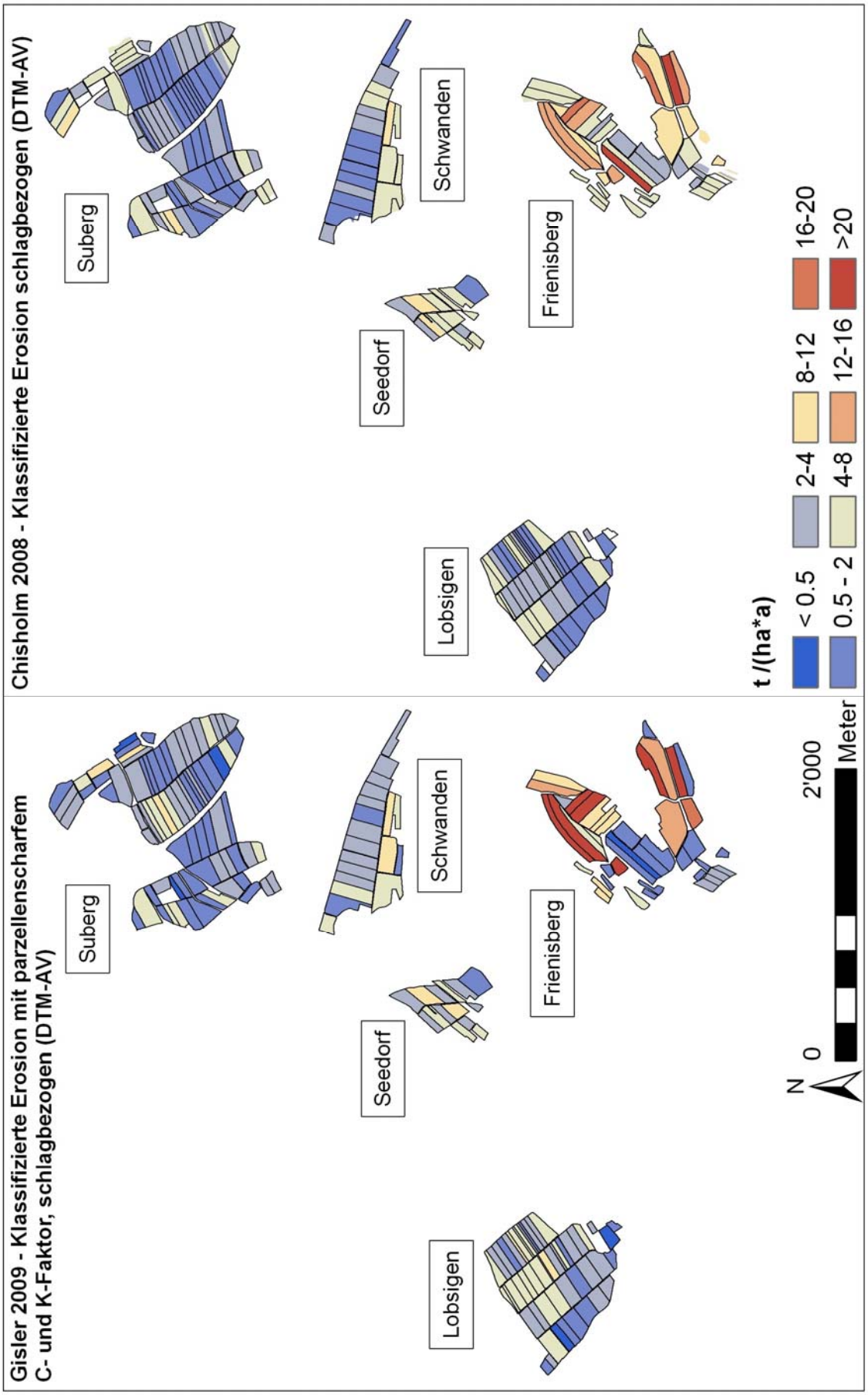
Anhang 2


Bruttoerosion mit parzellenscharfem K- Faktor
(zellenbezogen, DTM-AV)
Suberg
Schwanden
Seedorf
Lobsigen
Frienisberg
t /(ha*a)
< 1
1 - 2
2 - 4
4 - 7.5
7.5 - 10
10 - 15
15 - 20
20 - 30
> 30
N
0
2'500
Meter
Bruttoerosion mit parzellenscharfem K- Faktor
(schlagbezogen, klassifiziert, DTM-AV)
Suberg
Schwanden
Seedorf
Lobsigen
Frienisberg
t /(ha*a)
0.5
0.5-2
2-4
4-8
8-12
12-16
16-20
>20

Anhang 3


Gisler 2009 - Bruttoerosion mit parzellenscharfem C- und K-Faktor
(zellenbezogen, DHM25)
Chisholm 2008 - Bruttoerosion
(zellenbezogen, DHM25)
Suberg
Schwanden
Seedorf
Lobsigen
Frienisberg
t/(ha*a)
< 1
1 - 2
2 - 4
4 - 7.5
7.5 - 10
10 - 15
15 - 20
20 - 30
> 30
N
0
2'400
Meter

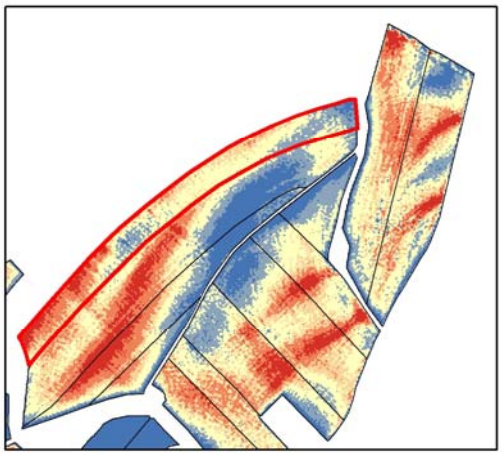
Anhang 4


Chisholm 2008 - Klassifizierte Erosion schlagbezogen (DTM-AV)
Suberg
Schwanden
Seedorf
Lobsigen
Frienisberg
t /(ha*a)
< 0.5
0.5 - 2
2-4
4-8
8-12
12-16
16-20
>20
Gisler 2009 - Klassifizierte Erosion mit parzellenscharfem
C- und K-Faktor, schlagbezogen (DTM-AV)
Suberg
Schwanden
Seedorf
Lobsigen
Frienisberg
N
0
2'000
Meter

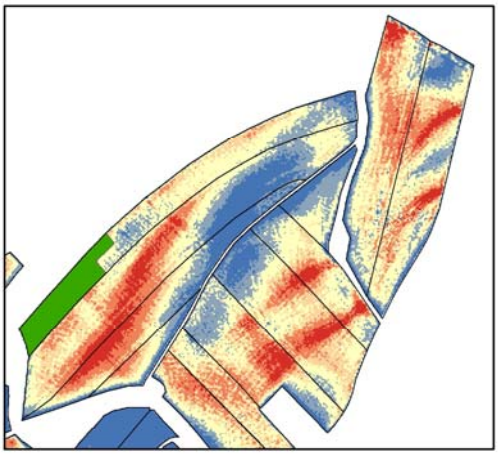
Anhang 5

Massnahme Parzelle 735

Erosion der Parzelle 735 nach der Massnahmen-grundlage



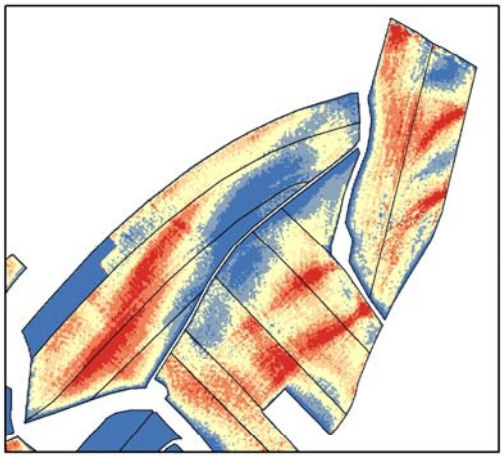
Geplante Massnahme für die Parzelle 735
Ein 180 x 40 m grosser Grünstreifen (grüne Fläche)



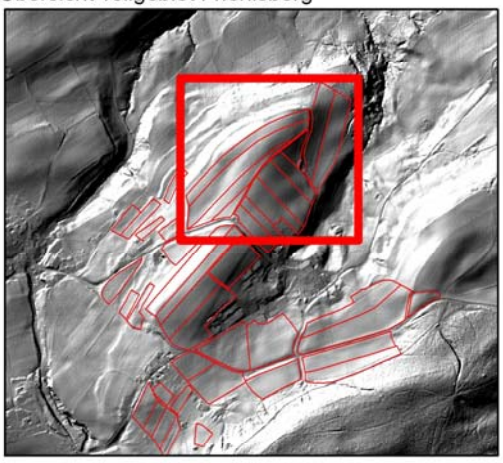
t/ha*a

- 0 - 2
- 2 - 4
- 4 - 7.5
- 7.5 - 10
- 10 - 15
- > 15

Die resultierende Erosion mit der geplanten Grünfläche



Übersicht Teilgebiet Frienisberg



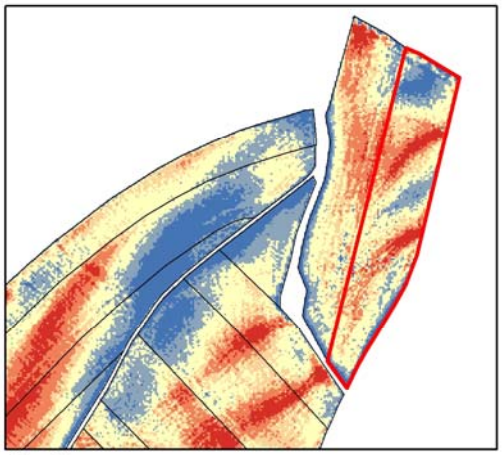
0 125 250 375 500 Meter

N

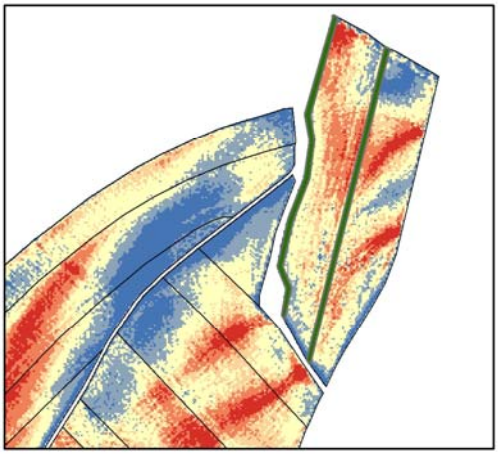
Anhang 6

Massnahme Parzelle 753

Erosion der Parzelle 753 nach der Massnahmen-grundlage



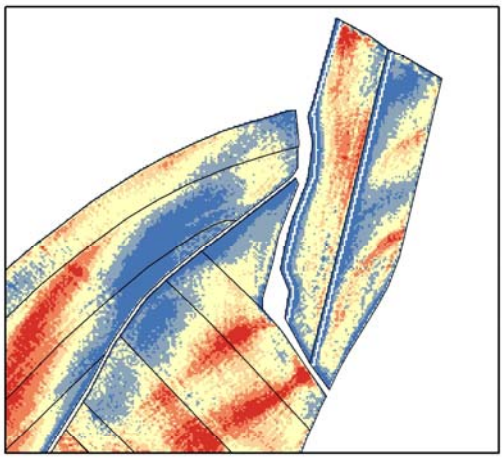
Geplante Massnahme für die Parzelle 753
Zwei rund 350m lange Grassstreifen (grüne Streifen)
Je ein Streifen in Parzelle 646 und 753



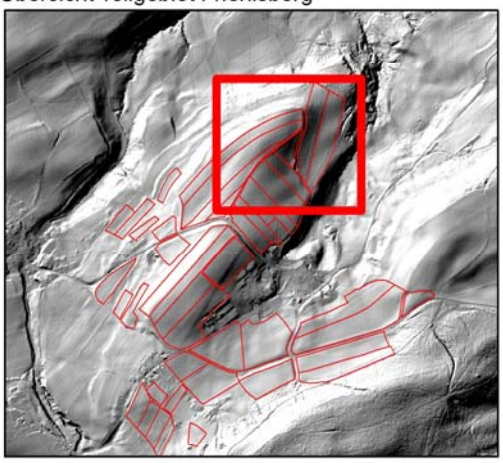
t/ha*a

- **0 - 2**
- **2 - 4**
- **4 - 7.5**
- **7.5 - 10**
- **10 - 15**
- **> 15**

Die resultierende Erosion mit den geplanten Grassstreifen. Es wurden hier entlang der Streifen Linien eingefügt in AvErosion.



Übersicht Teilgebiet Frienisberg



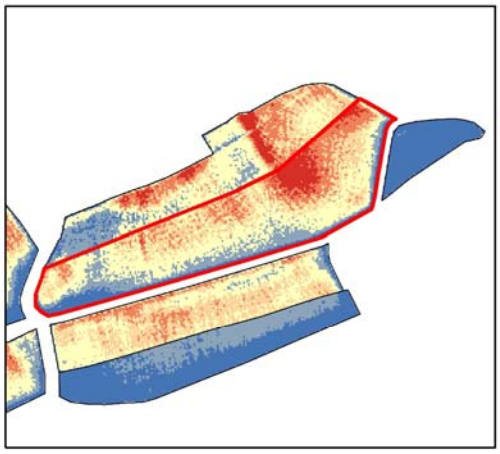
0 50 100 200 300 400 Meter

N

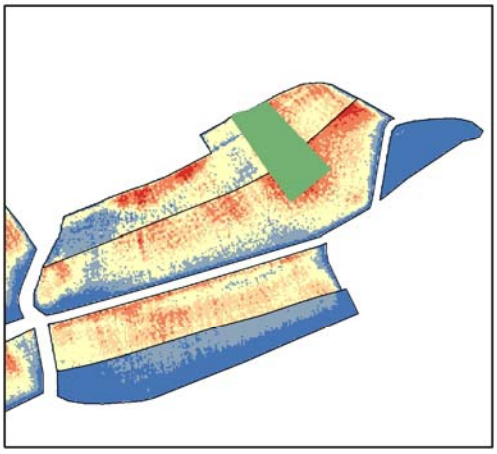
Anhang 7

Massnahme Parzelle 661

Erosion der Parzelle 661 nach der Massnahmen-grundlage



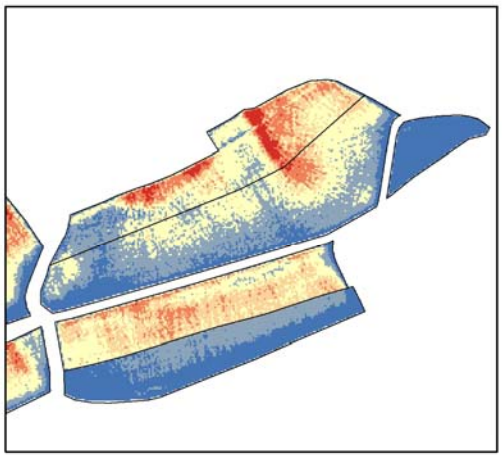
Geplante Massnahme für die Parzelle 661
Änderungen der Fruchtfolge und Bodenbearbeitung
Eine 120 x 50 m grosse Grasfläche (grüne Fläche)



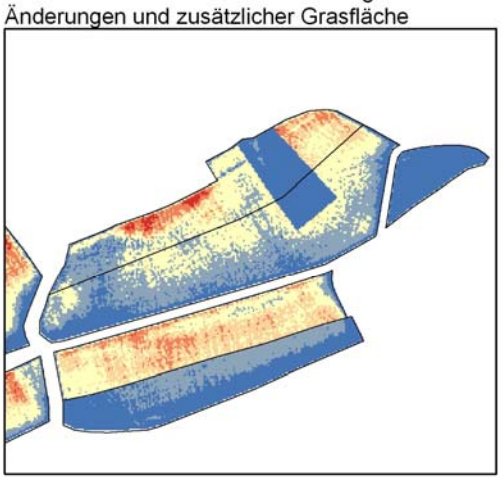
t/ha*a

- 0 - 2
- 2 - 4
- 4 - 7.5
- 7.5 - 10
- 10 - 15
- > 15

Die resultierende Erosion nur mit den Änderungen in der Fruchfolge und der Bodenbearbeitung



Die resultierende Erosion mit vorhergehenden Änderungen und zusätzlicher Grasfläche



0 50 100 200 300 400 Meter

N