

Masterarbeit
an der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der
Universität Bern

**Konzeptionierung und Operationalisierung einer
aktuellen und schweizweit verwendbaren
Berechnungsweise des USLE C-Faktors**

**Schaffung der inhaltlichen und technischen Grundlagen
zur individuellen Integration des C-Faktors
in die Erosionsrisikokarte der Schweiz**

vorgelegt von
Patrick Kupferschmied

2018

Leitung der Arbeit
PD Dr. Andreas Heinimann

Geographisches Institut der Universität Bern
Abteilung Integrative Geographie

Masterarbeit von:

Patrick Kupferschmied

Matr.-Nr: 09-110-479

Baldismoosstrasse 40

6043 Adligenswil

Email: patrick.kupferschmied@gmail.com

Geographisches Institut, Universität Bern

Abgabe: Oktober 2018

Leitung der Arbeit:

PD Dr. Andreas Heinimann

Geographisches Institut und Centre for Development and Environment, Universität Bern

Co-Leitung der Arbeit:

Dr. Volker Prasuhn

Forschungsanstalt Agroscope, Zürich-Reckenholz

Dr. Hanspeter Liniger

Geographisches Institut und Centre for Development and Environment, Universität Bern

Zusätzliche Betreuung der Arbeit:

Pascal Bircher, PhD Student

Centre for Development and Environment, Universität Bern

Zusammenfassung

Für die Schweiz liegt eine Erosionsrisikokarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche (ERK2) auf Basis des Erosionsmodells Universal Soil Loss Equation (USLE) vor. Die Karte zeigt das potentielle Erosionsrisiko unabhängig von der Bewirtschaftung. Die jeweilige Vegetationsbedeckung und Bewirtschaftung, im Modell der USLE durch den C-Faktor ausgedrückt, ändert sich laufend und kann deshalb nicht in einem schweizweiten Datensatz erfasst werden. Allerdings überschätzt die ERK2 durch das Fehlen des C-Faktors das Erosionsrisiko erheblich, was ihren Nutzen in der Praxis einschränkt.

Im Rahmen der Überarbeitung der ERK2 durch den PhD Studenten Pascal Bircher an der Universität Bern ist die individuelle Integration des C-Faktors in die ERK2 durch eine WebGIS-Applikation geplant. In besagter Applikation soll es möglich sein, den C-Faktor für eine individuelle Fläche aus bestimmten Benutzereingaben zu berechnen und für diese Fläche das aktuelle Erosionsrisiko unter Berücksichtigung der Bewirtschaftung zu erhalten.

Um eine solche WebGIS-Applikation unter Verwendung der aktuellsten Datengrundlage zu realisieren, bedarf es einer überarbeiteten Berechnungsweise des C-Faktors. Einerseits ist eine inhaltliche Überarbeitung der C-Faktor-Berechnung notwendig, um möglichst viele Informationen zur Bewirtschaftung, welche neue Datensätze bieten, in die Berechnung einfließen zu lassen. Andererseits ist eine Anpassung der herkömmlichen, tabellenbasierten Berechnungsweise nötig, um diese technisch in Form eines automatisierten Software-Tools umzusetzen.

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurden die aktuellsten in der Schweiz verfügbaren Datensätze zur Berechnung des C-Faktors analysiert und auf deren Basis eine angepasste Berechnungsweise konzeptioniert. Diese wurde anschliessend in Form eines C-Faktor-Tools technisch operationalisiert und damit berechnete C-Faktoren auf ihre Plausibilität hin überprüft.

Die ausgearbeitete Berechnungsweise kann den C-Faktor für individuelle Fruchtfolgen aus allen wichtigen Ackerkulturen berechnen. Dabei sind Angaben zur geographischen Region möglich und es kann für jedes Jahr der Fruchtfolge eine Hauptkultur und Zwischennutzung sowie das jeweilige Bodenbearbeitungsverfahren definiert werden. Darüber hinaus berücksichtigt die Berechnung allfällige Korrekturfaktoren für positive und negative Carry-over-Effekte. Das entwickelte C-Faktor-Tool liegt als Python-Script vor und ist für die Integration in eine WebGIS-Umgebung geeignet. Mit dem Tool berechnete C-Faktoren

wurden in einem systematischen und einem praxisorientierten Vergleich mit Werten von zwei ähnlichen Tools verglichen und sind als plausibel zu beurteilen.

Damit schafft diese Masterarbeit mit der Konzeptionierung und Operationalisierung einer angepassten Berechnungsweise des C-Faktors die inhaltlichen und technischen Grundlagen für die geplante WebGIS-Applikation zur individuellen Integration des C-Faktors in die ERK2.

Vorwort

Mit der weiterhin rasch voranschreitenden Digitalisierung unserer Gesellschaft wird für uns Geographen die Arbeit mit Geographischen Informationssystemen (GIS) zunehmend wichtiger. Aus einer Generation stammend, welche die Anschaffung des ersten Computers im Haushalt erlebt hat und diese Geräte mit kindlicher und jugendlicher Neugierde entdecken durfte, hege ich ein besonderes Interesse für die Arbeit mit GIS und die neuen Möglichkeiten, welche sich einem dadurch eröffnen. Neben der Anwendung von GIS und Software im Allgemeinen, fasziniert mich in letzter Zeit die Idee ein eigenes Programm zu entwickeln.

Während eines Praktikums bei Agroscope kam Volker Prasuhn mit einem spannenden Vorschlag für eine Masterarbeit auf mich zu. Für die Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2) soll eine technische Lösung gefunden werden, um den fehlenden Faktor zur Bedeckung und Bewirtschaftung für individuelle Flächen bestimmen und bei der Berechnung des Erosionsrisikos berücksichtigen zu können. Ich war begeistert von der Idee und versprach mir davon eine Gelegenheit, um meine im Studium angeeigneten Grundkenntnisse im Programmieren an einem interessanten Projekt vertiefen und weiterentwickeln zu können.

Zusammen mit Andreas Heinimann und Hanspeter Liniger von der Universität Bern wurde aus der Idee ein Konzept für eine Masterarbeit. Ursprünglich hatte ich geplant eine WebGIS-Applikation zu entwickeln und erklärte das Aneignen der dazu nötigen Kenntnisse zu meinen persönlichen Lernzielen im Rahmen der Arbeit. Allerdings musste ich bald feststellen, dass einerseits die Entwicklung des C-Faktor-Tools an sich bereits komplexer und aufwändiger ausfällt als gedacht und dass sich hinter dem Begriff WebGIS ein zu grosses Gebiet verbirgt, um im Rahmen einer Masterarbeit zusätzlich von Grund auf erlernt zu werden.

Stattdessen beschränkte ich mich für diese Arbeit auf die Schaffung der inhaltlichen und technischen Grundlagen, welche für die Entwicklung besagter WebGIS-Applikation benötigt werden. Ein Produkt der Arbeit ist dabei das C-Faktor-Tool, welches aktuell lediglich als Python-Script für die Integration in eine WebGIS-Umgebung vorliegt. Im Anschluss an die Arbeit möchte ich daraus noch ein alleine lauffähiges Programm entwickeln und mich wenn möglich an der Entwicklung der WebGIS-Applikation beteiligen. Denn das Entwickeln des C-Faktor-Tools hat mir grosse Freude bereitet meinen Wunsch bekräftigt diese Art von Arbeit beruflich weiterzuverfolgen.

Verfügbarkeit des C-Faktor-Tools

Das C-Faktor-Tool wird als alleine lauffähiges Programm zusammen mit einer Dokumentation auf Anfrage verfügbar sein. Auch das Python-Script ist gegebenenfalls erhältlich.

Alle Anfragen bezüglich des C-Faktor-Tools sind an folgende Adresse zu richten:

Volker Prasuhn

Agroscope

Reckenholzstrasse 191

8046 Zürich

Tel. +41 58 468 71 45

Email: volker.prasuhn@agroscope.admin.ch

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken ohne deren Hilfe und Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Ein grosses Dankeschön geht an die Leiter und Betreuer meiner Arbeit. Es ist überaus wertvoll und nicht selbstverständlich mit einem so erfahrenen, hilfsbereiten und engagierten Betreuerteam zusammenarbeiten zu dürfen. Ganz besonders möchte ich mich bei Volker Prasuhn bedanken, welcher mir jede Frage postwendend beantwortet hat und sich viel Zeit für lange und ausführliche Besprechungen nahm. Dank seiner Expertise und den produktiven Sitzungen ist es mir gelungen die komplexe, angepasste Berechnungsweise des C-Faktors auszuarbeiten. Andreas Heinimann ist es unter anderem zu verdanken, dass aus der Idee ein funktionierendes C-Faktor-Tool entstanden ist. Sein grosser Erfahrungsschatz und sein technisches Know-how waren besonders in der Anfangsphase der Entwicklung des Tools wegweisend und eine grosse Hilfe bei der Wahl der technischen Ressourcen. Hanspeter Liniger verdanke ich viele wertvolle Ratschläge und Ideen. Mit seiner langjährigen Erfahrung half er stets das "Big Picture" im Auge zu behalten und die Arbeit im wissenschaftlichen Diskurs zu situieren. Seine methodischen Tipps förderten eine zielgerichtete Arbeit und ersparten mir im Verlauf der Arbeit wohl so manche Stresssituation. Ein spezielles Dankeschön geht auch an Pascal Bircher, welcher mir besonders beim Programmieren des Tools eine unverzichtbare Hilfe war. Viele Stunden lang haben wir zusammen über möglichen Lösungen zu immer wieder neuen technischen Herausforderungen gebrütet. Als Doktorand hatte er zudem zahlreiche wertvolle Ratschläge und Hinweise rund um das Schreiben einer Masterarbeit, welche mir eine grosse Hilfe waren.

Bei der Entwicklung des C-Faktor-Tools erhielt ich neben Andreas Heinimann und Pascal Bircher auch Unterstützung von weiteren Experten. Ganz besonders möchte ich mich bei Lukas Vonlanthen vom Centre for Development and Environment (CDE) bedanken. Dank seiner Erfahrung in der Entwicklung von Software-Tools konnten die Anforderungen der geplanten WebGIS-Applikation an das C-Faktor-Tool berücksichtigt und das Programm für eine Web-Integration optimiert werden. Zudem verdanke ich seinen Fähigkeiten und Tipps die Lösung von zwei besonders harten Knacknüssen in der Programmierung des Tools. Bei Matthias Fries, ebenfalls vom CDE, möchte ich mich für seine hilfreichen Ratschläge zur Erstellung der Datenbank und der Kommunikation zwischen Python und PostGIS bedanken. Weiter verdanke ich ihm ebenfalls wertvolle Hinweise zur geplanten Web-Integration des Tools. Auch aus meinem privaten Umfeld durfte ich von Expertenwissen bei

der Entwicklung des C-Faktor-Tools profitieren. Lukas Grimm, System Engineer bei Puzzle ITC und ehemaliger Mitbewohner von mir, verdanke ich grundsätzlich den Einstieg ins Programmieren und er unterstützte mich mit generellen Tipps rund um das Programmieren mit Python unter Linux Ubuntu. Aaron Schmocker, ebenfalls System Engineer bei Puzzle ITC, war mir mit Ratschlägen zur web-orientierten Programmierung und der Verwendung von Web-Frameworks wie Django eine grosse Hilfe.

Weiter möchte ich mich bei Chinwe Ifejika Speranza, Professorin in Geographie und Nachhaltiger Entwicklung an der Universität Bern, bedanken. Sie hat mich beim Schreiben der Disposition beraten und war damit bei der Konkretisierung des Forschungsthemas eine wichtige Unterstützung.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Menschen in meinem Umfeld bedanken, welche mich in dieser Zeit begleitet haben. Ein ganz herzliches Dankeschön möchte ich gegenüber meiner Familie aussprechen, mit welcher ich gerade in der intensivsten Phase der Arbeit viel Zeit verbringen durfte. Speziell bedanke ich mich bei meinen Eltern Rita und Herbert, welche mir das Studieren überhaupt erst möglich gemacht haben und mir als Lektoren eine grosse Hilfe waren. Weiter möchte ich mich bei meinen Mitbewohnern, Kommilitonen und Freunden bedanken, mit denen ich stundenlang über meine Arbeit fachsimpeln oder auch mal auf andere Gedanken kommen durfte.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Vorwort	III
Verfügbarkeit des C-Faktor-Tools	IV
Danksagung	V
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Forschungslücke	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Forschungsfragen	6
2 Konzeptueller Rahmen und Stand der Forschung	7
2.1 Bodenerosion und Erosionsforschung	7
2.1.1 Definition und Problematik der Bodenerosion	7
2.1.2 Schäden durch Bodenerosion	8
2.1.3 Erosionsforschung und Politik	10
2.1.4 Methoden der Erosionsforschung	11
2.2 Universal Soil Loss Equation (USLE)	13
2.2.1 Faktoren der USLE	14
2.2.2 Wichtige Derivate der USLE	15
2.3 C-Faktor der USLE	17
2.3.1 Kulturperioden	18
2.3.2 Relativer Bodenabtrag (RBA)	19
2.3.2.1 RBA-Werte in der Literatur	23
2.3.3 Relativer R-Anteil (RRA)	25
2.3.4 Berechnungsweisen des C-Faktors	27
2.3.4.1 Software-Tools zur C-Faktor-Berechnung	33
2.3.5 Relevanz und Sensitivität des C-Faktors	38
2.4 Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2)	40
3 Methoden	47
3.1 Methodik zur Konzeptionierung der Berechnungsweise des C-Faktors	47
3.1.1 Verwendete Datengrundlagen	49

3.2	Verwendete Ressourcen zur Entwicklung des C-Faktor-Tools	53
3.2.1	Programmiersprache: Python	53
3.2.2	Datenbank: PostGIS	54
3.2.3	Webserver zu Testzwecken: Apache2	54
3.3	Methodik zur Überprüfung der Plausibilität	55
3.3.1	Methodik des systematischen Vergleichs	55
3.3.2	Methodik des praxisorientierten Vergleichs	57
4	Resultate	59
4.1	Auswahl und Überprüfung eines geeigneten Modellansatzes und der techni- schen Ressourcen	60
4.1.1	Wahl des Modellansatzes und der technischen Ressourcen	60
4.1.2	Überprüfung der Umsetzbarkeit von Modellansatz und Ressourcenwahl	62
4.2	Konzeptionierung und Operationalisierung einer angepassten Berechnungs- weise des C-Faktors	68
4.2.1	Konzept der angepassten Berechnungsweise des C-Faktors	68
4.2.2	Technische Grundstruktur und Verfügbarkeit des C-Faktor-Tools . .	70
4.2.3	Berechnung Schritt 1: Benutzereingaben	72
4.2.3.1	Zwischennutzung Fall 1: keine Zwischennutzung	73
4.2.3.2	Zwischennutzung Fall 2: Stoppelbrache vor Winterhaupt- kultur	74
4.2.3.3	Zwischennutzung Fall 3: Stoppelbrache im Winter	74
4.2.3.4	Zwischennutzung Fall 4: Schwarzbrache im Winter	74
4.2.3.5	Zwischennutzung Fall 5: Zwischenkultur abfrierend/winterhart	75
4.2.3.6	Zwischennutzung Fall 6: Herbstzwischenkultur vor Schwarz- brache im Winter	76
4.2.3.7	Zwischennutzung Fall 7: Herbstzwischenkultur vor Winter- kultur (technisch nicht umgesetzt!)	77
4.2.3.8	Zwischennutzung Fall 8: Kunstwiese	77
4.2.4	Berechnung Schritt 2: Erstellung des Kulturkalenders	79
4.2.5	Berechnung Schritt 3: Berechnung der Relativen R-Anteile (RRA) .	85
4.2.6	Berechnung Schritt 4: Ermittlung der Relativen Bodenabträge (RBA)	87
4.2.7	Berechnung Schritt 5: Bestimmung und Verrechnung der Korrektur- faktoren	92
4.2.8	Berechnung Schritt 6: Berechnung des C-Faktors der Fruchtfolge . .	97
4.2.9	Output des C-Faktor-Tools	98
4.3	Überprüfung der Plausibilität von mit der angepassten Berechnungsweise errechneten C-Faktoren	100
4.3.1	Systematischer Vergleich von C-Faktoren nach Tool und Variable . .	101
4.3.1.1	Referenzfruchtfolge des systematischen Vergleichs	101

4.3.1.2	Vergleichs-Variable: Region	104
4.3.1.3	Vergleichs-Variable: Bodenbearbeitungsverfahren	106
4.3.1.4	Vergleichs-Variable: Zwischennutzung	107
4.3.1.5	Vergleich der Korrekturfaktoren	111
4.3.1.6	Vergleich einer Fruchtfolge mit 40% Kartoffelanteil	114
4.3.2	Praxisorientierter Vergleich von C-Faktoren nach Tool und Fruchtfolge	116
4.3.2.1	Fruchtfolge mit 20% Kartoffeln (1) bei 50% Blattfruchtanteil und konventioneller Bodenbearbeitung	117
4.3.2.2	Fruchtfolge mit 20% Kartoffeln (2) bei 60% Blattfruchtanteil, teils konservierender Bodenbearbeitung und Kunstwiese	119
4.3.2.3	Fruchtfolge mit 60% Blattfruchtanteil und konventioneller Bodenbearbeitung	121
4.3.2.4	Fruchtfolge mit 80% Blattfruchtanteil und mehrheitlich konservierender Bodenbearbeitung	123
4.3.2.5	Fruchtfolge mit 70% Getreideanteil	124
4.3.2.6	Fruchtfolge mit einer fünfjährigen Kunstwiese	126
5 Beantwortung der Forschungsfragen und Schlussfolgerung		129
5.1	Fazit zur Konzeptionierung einer angepassten Berechnungsweise des C-Faktors	130
5.2	Fazit zur Operationalisierung der angepassten Berechnungsweise	132
5.3	Fazit zur Plausibilität von berechneten C-Faktoren	135
Literaturverzeichnis		i
Internetquellen		v
Anhang		vii
A1: Tabellen zum Kulturkalender		viii
A1.1: Kulturkalender der Hauptkulturen im Talgebiet		viii
A1.2: Kulturkalender der Hauptkulturen im Hügelgebiet		ix
A1.3: Kulturkalender der Zwischenkulturen im Talgebiet		x
A1.4: Kulturkalender der Zwischenkulturen im Hügelgebiet		xi
A1.5: Kulturkalender der Herbstzwischenkulturen im Talgebiet		xii
A1.6: Kulturkalender der Herbstzwischenkulturen im Hügelgebiet		xiii
A1.7: Hilfstabelle – Datum zu Tag im Jahr		xiv
A2: Tabellen zum Relativen Bodenabtrag (RBA)		xvi
A2.1: RBA der Kulturen bei Pflugverfahren und Zuordnung der Zwischenkulturen		xvi
A2.2: RBA der Kulturen bei Mulchsaat mit 10-30% Bodenbedeckung		xvii
A2.3: RBA der Kulturen bei Mulchsaat mit über 30% Bodenbedeckung		xviii
A2.4: RBA der Kulturen bei Direktsaat		xix

A3: Tabellen zu den Summenprozenten der R-Faktor-Anteile	xx
A3.1: Summenprozente der R-Anteile im Talgebiet	xx
A3.2: Summenprozente der R-Anteile im Hügelgebiet	xxiii
A4: Tabellen zu den Korrekturfaktoren	xxvi
A4.1: Korrekturfaktoren	xxvi
A4.2: Zuordnung der Kulturen zur Bestimmung der Korrekturfaktoren . . .	xxvii
A5: Tabelle zum systematischen Vergleich des C-Faktors	xxviii

1 Einleitung

Böden sind die dünne und verletzbare Haut der Erde, der belebte, äusserste Teil der Erdkruste (Scheffer & Schachtschabel 2010: 1). Sie beherbergen eine unvorstellbare Anzahl an Lebewesen und liefern dank wertvollen Bodenprozessen auch dem Leben an der Oberfläche eine Lebensgrundlage. Doch leider klaffen in der Haut der Erde auch Wunden und der Mensch ist durch sein Handeln für viele davon verantwortlich.

1.1 Problemstellung und Forschungslücke

Eine solche Wunde in der Haut der Erde ist die Bodenerosion durch Wasser (vgl. Abb. 2.2). Darunter wird die Ablösung von Bodenteilchen und deren Transport durch (Regen-)wasser verstanden. Die Erosion von Oberboden verringert die Gründigkeit der Böden, reduziert dadurch ihre Speicherkapazität für Nährstoffe und Wasser dramatisch und verschlechtert somit die Bodenfruchtbarkeit (Scheffer & Schachtschabel 2010: 139, 506; Herweg 1999: 261; Prasuhn et al. 2007: 120; Pimentel et al. 1995: 1118). Während Bodenerosion an sich ein natürlicher Prozess ist, sind sich Experten darüber einig, dass Ackerbau die Erosion stark fördert. Denn mit der Bearbeitung durch den Menschen werden die Böden zeitweilig von Vegetation entblösst und künstlich offen gehalten (Scheffer & Schachtschabel 2010: 279, 506, 512; Neufang et al. 1989: 233; Gisler et al. 2010: 1). Zu den wichtigsten Folgen von Bodenerosion in der Landwirtschaft zählen neben On-site-Schäden auf dem betroffenen Feld wie dem Verlust von Nährstoffen oder die verringerte Bodenfruchtbarkeit auch Off-site-Schäden wie Beschädigungen durch die Erosionsmassen auf benachbarten Flächen, an Gebäuden oder Infrastruktureinrichtungen wie Strassen und Kanalisation, sowie die Gewässerverschmutzung durch mitgetragene Pestizide und Nährstoffe wie Stickstoff oder Phosphor aus Düngemitteln (Herweg 1999: 261; Prasuhn et al. 2007: 120; Gisler et al. 2010: 1). Weiter ist Bodenerosion deshalb so problematisch, weil die Bildung von Boden je nach Region hunderte bis tausende von Jahren dauert und entsprechend die Bodenabtragsrate durch Erosion im Schnitt circa 10x höher liegt als die Bodenbildungsrate. Somit verursacht Bodenerosion irreversible Langzeitschäden an der in diesem Sinne nicht-erneuerbaren Ressource Boden (Scheffer & Schachtschabel 2010: 506; Guo et al. 2015: 1877). Folglich wird Bodenerosion weltweit als eine der grössten Umweltgefahren und als wichtigste Bodenbeschädigung überhaupt angesehen (Jain & Kothyari 2000: 771f; Scheffer & Schachtschabel 2010: 512).

In der Schweiz ist Bodenerosion auf Ackerflächen spätestens seit dem Nationalen Forschungsprogramm Boden (NFP22) anfangs der 1990er Jahre als ernstzunehmendes Problem von der Öffentlichkeit und Politik erkannt worden (Prasuhn et al. 2011: 75; Prasuhn et al. 2017: 28). Aufgrund der durch Erosion verursachten Umweltproblemen und den damit verbundenen Kosten ist die Verminderung von Bodenerosion als Ziel in zahlreichen gesetzlichen Grundlagen verankert (Ogermann et al. 2006: 209; Prasuhn et al. 2014: 75). So sind bspw. in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) Richtwerte für Bodenerosion auf Ackerflächen festgehalten (SR 814.12 1998: Art 6, Anhang 3). Zusätzlich werden Landwirte in der Direktzahlungsverordnung (DZV) dazu verpflichtet im Falle von relevanten, bewirtschaftungsbedingten Erosionsereignissen in Eigenverantwortung oder mit Hilfe der Beratung entsprechende Massnahmen umzusetzen (SR 910.13 2013: Art. 16, 17, Anhang 1). Mögliche Massnahmen zum Erosionsschutz wie Fruchtfolgegestaltung, Zwischenfruchtanbau, reduzierte Bodenbearbeitung oder standortgerechte Bewirtschaftung sind laut Prasuhn et al. (2017: 28) allgemein bekannt.

Der Vollzug dieser gesetzlichen Grundlagen obliegt grundsätzlich den Kantonen. Jedoch zeigte sich, dass die Umsetzung in der Praxis häufig ungenügend war. Daraufhin wurde mit der Erosionsrisikokarte (ERK2) im Auftrag des Bundesamts für Landwirtschaft (BLW) ein Hilfsmittel für den Vollzug entwickelt. Die ERK2 zeigt das langjährig gemittelte potentielle Erosionsrisiko von landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz abhängig von Relief, Bodeneigenschaften und Niederschlag und unabhängig von Vegetation und Bewirtschaftung (vgl. Abb. 2.13 in Kapitel 2.4). Vereinfacht ausgedrückt zeigt die ERK2 die theoretisch mögliche Erosion auf einer brachen Ackerfläche. Dank der hohen räumlichen Auflösung von 2x2-Metern sind erosionsgefährdete Bereiche auf Parzellenebene deutlich erkennbar. So soll die ERK2 den Vollzug der Gesetze unterstützen indem potentiell erosionsgefährdete Gebiete und Stellen leichter erkannt werden können und dank ihrer detaillierten Informationen mögliche Ansätze für Massnahmen aufgezeigt werden. Darüber hinaus soll die ERK2 Landwirte für die Problematik der Bodenerosion sensibilisieren (Gisler et al. 2010: 3; Gisler et al. 2011: 148, 149; Prasuhn et al. 2014: 75).

Die ERK2 basiert auf einem Derivat des weit verbreiteten Erosionsmodells Universal Soil Loss Equation (USLE), welches von Wischmeier & Smith (1978) entwickelt und seither mehrfach überarbeitet wurde (Gisler et al. 2010: 7). Die USLE ist eine Produktgleichung, welche anhand von sechs Standortfaktoren den langjährig zu erwartenden mittleren Bodenabtrag $[A]$ in $t/(ha * a)$ errechnet.

$$\text{USLE:} \quad A = R * K * L * S * C * P$$

Der R-Faktor gibt die Erosivität des Niederschlags und Oberflächenabflusses an. K ist die Erodibilität des Bodens abhängig von Bodeneigenschaften wie z.B. der Körnung. Die Faktoren L und S sind topographische Faktoren und beschreiben die Hanglänge (L) und die Hangneigung (S). P ist der Erosionsschutzfaktor und bezeichnet strukturelle

Massnahmen zur Minimierung der Erosion wie z.B. der Bau von Terrassen in Rebbergen. Der C-Faktor ist der Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor und beschreibt die Auswirkungen der Vegetationsbedeckung und der mechanischen Bodenbearbeitung auf den Bodenabtrag. Der C-Faktor nennt das Verhältnis des Bodenabtrags einer Fläche unter bestimmter Bewirtschaftung (Kulturpflanze, Bedeckungsgrad, Bearbeitungsverfahren) zu dem einer gepflügten Schwarzbrache (Wischmeier & Smith 1978: 3, 4; Schwertmann et al. 1987: 9, 10; Mosimann & Rüttimann 2006: D1).

Die Faktoren R, K, L und S konnten mittels schweizweit verfügbaren Datensätzen ermittelt werden und ermöglichten dadurch die Entwicklung der ERK2 für alle landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz. Der C-Faktor hingegen ist ein variabler Faktor und es existiert kein schweizweiter Datensatz, weil es nicht möglich ist die sich ständig ändernden Fruchtfolgen und Bearbeitungsverfahren zu erfassen. Auch der P-Faktor enthält mit der Angabe zur Bearbeitungsrichtung eine variable Information. Entsprechend sind die Faktoren C und P in der ERK2 mit dem Standardwert 1.0 vertreten, was dem Referenzwert einer in Gefällsrichtung gepflügten Schwarzbrache entspricht. Somit zeigt die ERK2 nicht das aktuelle sondern lediglich das potentielle Erosionsrisiko ohne Berücksichtigung der Bodenbedeckung und des Bearbeitungsverfahrens (Gisler et al. 2010: 10, 11). Damit überschätzt die ERK2 das aktuelle Erosionsrisiko meist um mehr als den Faktor 10, wobei dieses in der Regel je nach Bewirtschaftung auf Schweizer Ackerflächen 3 – 50 mal geringer ausfallen kann als das von der ERK2 gezeigte potentielle Erosionsrisiko (Prasuhn et al. 2007: 124; Mosimann & Rüttimann 2006: D1). Dies deutet auf eine hohe Sensitivität des C-Faktors in der USLE hin, was auch von Auerswald (1987: 36) gestützt wird.

Im Umkehrschluss bedeutet die hohe Sensitivität des C-Faktors, dass Bodenerosion auf kritischen Flächen durch Änderungen bei der Bewirtschaftung sehr effektiv reduziert werden kann. Das ist vorteilhaft, da die Bewirtschaftungsweise einfacher vom Menschen beeinflusst werden kann als bspw. die Hangneigung. Entsprechend beziehen sich die meisten der eingangs erwähnten Massnahmen zur Reduzierung von Bodenerosion auf die Bewirtschaftung, wie z.B. schonendere Bodenbearbeitung oder veränderte Fruchtfolgen (Koster-Marbot et al. 2017: 4-6). Da der C-Faktor in der ERK2 allerdings fehlt, mag diese zwar hilfreich für die Identifizierung von potentiell gefährdeten Flächen sein, bietet jedoch keine direkte Hilfe bei der Analyse der Wirksamkeit von Massnahmen. Folglich wird nach einer Studie von Hänni (2017: 5, 24, 25) zur Nutzung der ERK2 in der Praxis die Berücksichtigung des C-Faktors in der ERK2 „ausdrücklich erwünscht“.

Der naheliegendste Ansatz zur Integration des C-Faktors in die ERK2 ist eine auf WebGIS (GIS = Geoinformationssystem) basierende Applikation. Mit WebGIS können GIS-Anwendungen und Geodaten über einen Server online zugänglich gemacht werden. Der Benutzer benötigt nebst einem Internetbrowser keine zusätzliche GIS-Software oder GIS-Anwenderkenntnisse. Die ERK2 ist bereits in einer WebGIS-Umgebung, dem Geoportal

des Bundes¹, verfügbar. Eine WebGIS-Applikation zur Integration des C-Faktors in die ERK2 könnte durch ein implementiertes C-Faktor-Tool den individuellen C-Faktor einer lokalen Fläche berechnen und diesen für die entsprechende Fläche automatisch in die ERK2 integrieren. Dazu würde ein Benutzer in der ERK2 ein Feld auswählen und in einer sich öffnenden Eingabemaske Angaben zur Bewirtschaftung der gewählten Fläche machen. Das C-Faktor-Tool ermittelt aus diesen Eingaben automatisch den C-Faktor der Fläche und verrechnet ihn mit der ERK2. Dem Benutzer wird anschliessend für die gewählte Fläche das aktuelle Erosionsrisiko unter Berücksichtigung der Bewirtschaftung angezeigt. So liesse sich für eine Parzelle das aktuelle Erosionsrisiko von verschiedenen Bewirtschaftungsszenarien ermitteln und vergleichen. Dadurch könnten die Auswirkungen unterschiedlicher Massnahmen zur Reduzierung des Erosionsrisikos von Landwirten selbständig analysiert werden. Die Entwicklung einer solchen WebGIS-Applikation zur individuellen Integration des C-Faktors in die ERK2 ist im Rahmen der aktuell laufenden Überarbeitung der ERK2 geplant (Bircher et al. 2017, unveröffentlicht: 29).

Für die manuelle Berechnung von individuellen C-Faktoren existieren tabellenbasierte Berechnungsschlüssel wie z.B. vom Agrarumweltindikator (AUI) Erosionsrisiko (Prasuhn 2017, unveröffentlicht) und Software-Tools wie ErosionCH von Mosimann & Rüttimann (2006). Diese können jedoch aus verschiedenen Gründen nicht für eine WebGIS-Applikation verwendet werden. Sie sind entweder nicht digital automatisiert, können technisch nicht in eine WebGIS-Umgebung integriert werden, können keinen C-Faktor für mehrjährige Fruchtfolgen berechnen, verfügen nicht über aktuelle Datengrundlagen, sind nicht schweizweit einsetzbar oder die Berechnungsweise ist intransparent und nicht rekonstruierbar. Hier öffnet sich eine Forschungslücke, denn es mangelt folglich an einer schweizweit gültigen und auf aktuellen Datengrundlagen basierenden Berechnungsweise, um den C-Faktor lokal für Fruchtfolgen auf individuellen Flächen zu ermitteln. Zudem müsste für die Entwicklung einer WebGIS-Applikation eine solche Berechnungsweise auch in Form eines Software-Tools operationalisiert und für WebGIS optimiert verfügbar sein. Durch die Schaffung dieser zur WebGIS-Entwicklung nötigen Grundlagen soll mit der vorliegenden Masterarbeit die bestehende Forschungslücke nun geschlossen werden.

1.2 Zielsetzung

Zu Beginn sollte das Ziel der Arbeit die inhaltliche Ausarbeitung und technische Umsetzung einer WebGIS-Applikation zur individuellen Integration des C-Faktors in die ERK2 sein. Der Autor verfügte im Vorfeld über Basiskenntnisse zur Programmierung mit einer objektorientierten Programmiersprache und zu relationalen, räumlichen Datenbanken. Das

¹ERK2 im Geportal des Bundes: https://map.geo.admin.ch/?initialState=ERK&reset_session%E2%8C%A9=de&topic=blw&lang=de&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&layers=ch.blw.erosion-mit-bergzonen&layers_opacity=0.75 [20.10.2018]

autodidaktische Erlernen aller zur Entwicklung einer WebGIS-Applikation nötigen Kenntnisse im Rahmen der Arbeit war ein vom Autor selbstdefiniertes Lernziel. Jedoch zeigte sich im Verlauf der Arbeit, dass der Web-Aspekt zu umfangreich und komplex ausfällt, um im Rahmen einer Masterarbeit selbständig erlernt und umgesetzt zu werden. Entsprechend wurde das Ziel der Arbeit in Absprache mit den Betreuenden revidiert.

Als Grundlage für die Entwicklung einer WebGIS-Applikation zur individuellen Integration des C-Faktors in die ERK2 bedarf es einer angepassten Berechnungsweise des C-Faktors, welche:

- den C-Faktor von mehrjährigen Fruchtfolgen unter Angabe von Zwischennutzung und Bodenbearbeitung berechnen kann,
- dazu die aktuellsten Datensätze verwendet,
- schweizweit einsetzbar ist,
- transparent und rekonstruierbar ist,
- in Form eines Software-Tools operationalisiert zur Verfügung steht,
- die Berechnung des C-Faktors somit vollständig automatisiert und
- technisch in eine WebGIS-Applikation integriert werden kann.

Gegenstand dieser Arbeit ist nun das Schaffen der inhaltlichen und technischen Grundlagen, welche für die Entwicklung einer solchen WebGIS-Applikation nötig sind. Die Entwicklung der WebGIS-Applikation selbst ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Ein inhaltliches **Rahmenziel** der Arbeit ist dabei das Aufzeigen des Wissensstands zum C-Faktor und dessen Relevanz bei der Berechnung des Erosionsrisikos. Ebenfalls soll die Arbeit Aufschluss über die in der Schweiz verfügbaren Datengrundlagen zur Berechnung des C-Faktors und deren Herkunft geben. Damit möchte die Arbeit mehr Klarheit zum gegenüber den anderen Faktoren der USLE eher wenig erforschten C-Faktor schaffen.

Das **Oberziel** der vorliegenden Masterarbeit ist das Ausarbeiten einer aktuellen, schweizweit verwendbaren und transparenten Berechnungsweise für den C-Faktor von Fruchtfolgen und deren technische Operationalisierung in Form eines Software-Tools. Die Arbeit kann dabei in drei Unterziele unterteilt werden:

1. Das **Ausarbeiten einer angepassten Berechnungsweise** für den C-Faktor von mehrjährigen Fruchtfolgen inklusive Zwischennutzung und Bodenbearbeitungsverfahren, welche transparent und schweizweit einsetzbar ist sowie auf den aktuellsten in der Schweiz verfügbaren Datengrundlagen basiert.
2. Die **technische Operationalisierung** der Berechnungsweise in Form eines Software-Tools, welches die Berechnung des C-Faktors automatisiert und sich technisch in eine WebGIS-Umgebung integrieren lässt.

3. Das **Überprüfen der Plausibilität** der Berechnungsweise bzw. des Tools durch den Vergleich mit ähnlichen Berechnungsweisen bzw. Programmen.

1.3 Forschungsfragen

Ausgehend von obiger Zielsetzung ergeben sich folgende Forschungsfragen:

1. *Wie muss die Berechnungsweise des C-Faktors angepasst werden, damit sie verschiedene Bewirtschaftungsszenarien abbilden kann, die aktuellsten Datensätze verwendet, schweizweit einsetzbar und technisch operationalisierbar ist?*
2. *Welche Ressourcen eignen sich zur Entwicklung eines C-Faktor-Tools und wie ist dieses zu programmieren, um in eine WebGIS-Umgebung integriert werden zu können?*
3. *Wie sind C-Faktoren, welche mit dem neuen C-Faktor-Tool auf Basis der angepassten Berechnungsweise errechnet werden, hinsichtlich ihrer Plausibilität im Vergleich mit C-Faktor-Werten anderer C-Faktor-Tools zu beurteilen und wie lassen sich allfällige Unterschiede erklären?*

2 Konzeptueller Rahmen und Stand der Forschung

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Konzepte und Begriffe der vorliegenden Masterarbeit näher erklärt sowie der jeweilige Stand der entsprechenden Forschung aufgezeigt. In der Einleitung wurden die Bodenerosion, die Universal Soil Loss Equation (USLE) und deren C-Faktor, sowie die Erosionsrisikokarte (ERK2) bereits für das Verständnis der Problemstellung thematisiert und werden nun vertieft.

2.1 Bodenerosion und Erosionsforschung

2.1.1 Definition und Problematik der Bodenerosion

Als Bodenerosion wird die Ablösung von Bodenteilchen und deren Transport entlang der Bodenoberfläche bezeichnet. Je nach Transportmedium wird dabei in Wasser- und Winderosion unterschieden. Winderosion ist grundsätzlich nur in Küstennähe oder grossen Ebenen bei hohen Windgeschwindigkeiten und sandigen Böden relevant und wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Bei Wassererosion werden die Bodenteilchen zuerst durch die Aufprallkraft von Regentropfen, der sog. Planschwirkung (vgl. Abb 2.1b), losgelöst und mit den oberflächlich abfliessenden Wassermassen als Sedimentfracht abtransportiert. Dabei werden weitere Bodenteilchen losgelöst und mitgerissen und es kommt im Ablagerungsgebiet zur Verschlammung der Bodenoberfläche. Diese drei Schritte des Erosionsverlaufs, Ablösung, Transport und Ablagerung von Bodenmaterial, sind in Abbildung 2.1c entlang eines Hanges schematisch dargestellt. Die Erosion findet dabei einerseits flächenhaft wie bei der Tropfenerosion und andererseits linienförmig als Rillen- oder Rinnenerosion durch den Oberflächenabfluss statt (Scheffer & Schachtschabel 2010: 506, 507, 508, 512; Herweg 1999: 262).

Bodenerosion ist ein natürlicher Prozess, wird aber durch die anthropogene Bewirtschaftung des Bodens, wie bspw. Ackerbau, stark gefördert und erst so zum Problem (Siebrecht et al. 2009: 4; Neufang et al. 1989: 233). Beim Ackerbau wird der Oberboden mechanisch aufgelockert, was die Aggregatstabilität verringert (Scheffer & Schachtschabel 2010: 279). Weiter führt die Bewirtschaftung mit schweren Maschinen zu Bodenverdichtung, was die Versickerung von Wasser reduziert und somit den Oberflächenabfluss erhöht. Zusätzlich ist

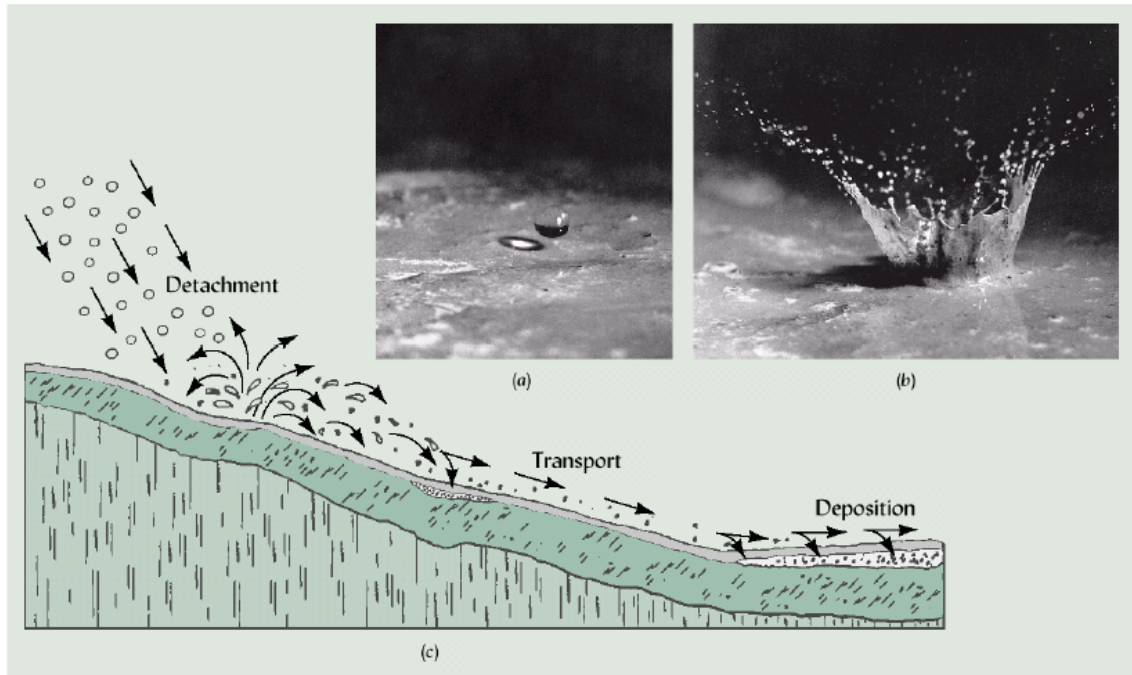


Abbildung 2.1: Veranschaulichung der Tropfenerosion (a und b), sowie schematische Darstellung des Erosionsverlaufs (c) (NPTEL)

der Boden zeitweise ganz oder teilweise von Vegetation befreit, wodurch Regentropfen ungehindert auf den Boden auftreffen können (Siebrecht et al. 2009: 4; Scheffer & Schachtschabel 2010: 506, 512; Hiller 2007: 7). Wenn also Ackerböden bewirtschaftungsbedingt in einem erosionsanfälligen Stadium sind und gleichzeitig starke Regenfälle auftreten, kommt es zu Bodenerosion. In der Schweiz konnten wiederholt sehr hohe Erosionsraten auf Ackerflächen nachgewiesen werden (Gisler et al. 2010: 1).

2.1.2 Schäden durch Bodenerosion

Die durch Bodenerosion auftretenden Schäden werden in On-site- und Off-site-Schäden unterteilt. On-site-Schäden (vgl. Abb. 2.2) entstehen auf der direkt durch Bodenerosion betroffenen Fläche und hängen mit dem Verlust von wertvollem Oberboden zusammen. Dadurch verliert der Boden an Mächtigkeit was seine Funktionen in den Stoff- und Energiekreisläufen zum Beispiel als Filter oder Puffer verändert. Weiter wird seine Speicherkapazität für Nährstoffe und Wasser verringert. Natürlich vorhandene und auch künstlich zugefügte Nährstoffe sowie Pflanzenschutzmittel fehlen an Stellen wo Boden erodiert und sind an Akkumulationsstellen überdosiert. Insgesamt verringert Erosion dadurch auf betroffenen Flächen deutlich die Bodenfruchtbarkeit und damit die Produktionsfunktion. Aus einer empirischen Studie von Pimentel et al. (1995: 1119) geht hervor, dass die Produktivität des Bodens auf betroffenen Ackerflächen über eine Dauer von 20 Jahren um 50 – 75% reduziert wird. Die selbe Studie zeigt auf, dass sich die Bodenmächtigkeit aufgrund von

Erosion in 20 Jahren um 2.8cm verringern kann. Die Bildung von neuem Oberboden dauert derweil hunderte von Jahren für lediglich einen einzigen Zentimeter. Aufgrund der tiefen Bodenbildungsrate gilt Boden als eine nicht-erneuerbare Ressource und Bodenerosion führt zu irreversiblen Langzeitschäden an dieser für uns lebenswichtigen Ressource.



Abbildung 2.2: Bodenerosion auf einer Ackerfläche als Beispiel für On-site-Schäden (Foto: V. Prasuhn)

Als Off-site-Schäden (vgl. Abb. 2.3) werden Folgen von Erosion ausserhalb der Ackerfläche bezeichnet. Der abgetragene Boden wird durch das oberflächlich abfliessende Wasser auf benachbarte Parzellen, in Siedlungsgebiete und Oberflächengewässer geschwemmt. Dabei entstehen beträchtliche Schäden durch die Sedimente selbst sowie durch die darin mitgeführten Düng- und Pflanzenschutzmittel. Infrastruktureinrichtungen und Gebäude werden beschädigt, Kanalisationen verstopfen und Gewässer werden verunreinigt, was Umweltschäden und hohe Reparaturkosten bewirkt. Aufgrund dieser teils dramatischen Folgen gilt Bodenerosion weltweit als eine der schlimmsten Umweltgefahren und wird als die wichtigste Bodenbeschädigung angesehen (Herweg 1999: 261; Prasuhn et al. 2007: 120; Gisler et al. 2010: 1; Scheffer & Schachtschabel 2010: 139, 506, 512; Hiller 2007: 13, 14; Guo et al. 2015: 1877; Jain & Kothiyari 2000: 771f).



Abbildung 2.3: Erosionsmaterial auf einer Strasse und verstopfte Kanalisation als Beispiele für Off-site-Schäden (Foto: V. Prasuhn)

2.1.3 Erosionsforschung und Politik

Die Forschung ist entsprechend darum bemüht Erosionsprozesse zu verstehen, zu quantifizieren und vor allem zu prognostizieren. Die Optimierung des Bodenschutzes ist dabei das übergreifende Ziel der Erosionsforschung. Ihren Ursprung hat sie in den USA wo bereits seit den 1920er Jahren aufgrund der Zunahme grossflächiger, industrieller Landwirtschaft Erosionsmessungen gemacht werden (Herweg 1999: 262). In der Schweiz hat die moderne Erosionsforschung ihren Ursprung 1975 an der Universität Basel mit der Basler Bodenerosionsforschungsgruppe. Ende der 1980er Jahre wurde im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms Boden (NFP22) erstmals schweizweit eine umfassende Beurteilung des Ausmasses von Bodenerosion auf Ackerflächen gemacht. Daraus ging hervor, dass 20% des bewirtschafteten Ackerlandes der Schweiz von Erosion betroffen ist. Entsprechend wurde anfangs der 1990er Jahren Bodenerosion auch von Politik und Öffentlichkeit als Problem erkannt, was in der Folge zur breit abgestützten Verankerung von Bodenerosion in der Gesetzgebung führte (Ledermann et al. 2008: 264; Ogermann et al. 2006: 209; Prasuhn et al. 2011: 75). So sind bspw. in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) Richtwerte für den gesetzlich zulässigen Bodenabtrag festgehalten. Dieser beträgt abhängig

von der Bodenmächtigkeit 2 Tonnen pro Hektare und Jahr bei einer durchwurzelbaren Mächtigkeit bis 70cm und 4 Tonnen bei grösserer Bodenmächtigkeit (SR 814.12 1998: Anhang 3). Können diese Richtwerte nicht eingehalten werden, so sind Landwirte unter anderem nach der Direktzahlungsverordnung (DZV) dazu verpflichtet in Eigenverantwortung oder mit Hilfe der Beratung Massnahmen zur Erosionsminderung umzusetzen (SR 910.13 2013: Anhang 1; Prasuhn et al. 2017: 28). Entsprechende Massnahmen umfassen standortgerechte Veränderungen in der Bewirtschaftung wie angepasste Fruchtfolgegestaltung, Zwischenfruchtanbau oder schonendere Bodenbearbeitung (Prasuhn et al. 2017: 28; Koster-Marbot et al. 2017: 4-6).

2.1.4 Methoden der Erosionsforschung

Um Erosion zu quantifizieren wird in der Regel der Bodenabtrag in Tonnen Trockensubstanz pro Hektare und Jahr [$t/(ha * a)$] verwendet. Der Bodenabtrag wird aus dem Oberflächenabfluss einer definierten Fläche und dem darin enthaltenen Sediment berechnet (Siebrecht et al. 2009: 4, 5). Der mögliche Bodenabtrag hängt dabei von einer Vielzahl teils interagierender Faktoren ab. Die Bodenbeschaffenheit mit Bodentyp, Bodentextur, Bodendichte und Oberflächenrauigkeit spielt eine wichtige Rolle. Lockere Lössböden sind bspw. deutlich erosionsanfälliger als tonreiche Böden und verdichtete Böden bewirken einen höheren Oberflächenabfluss. Die Hangform, definiert durch Hangneigung und Hanglänge, ist einer der wichtigsten Faktoren. Auf ebenen Flächen kommt es auch dann kaum zu Erosion, wenn alle anderen Faktoren diese begünstigen. Die Hanglänge ist im Zusammenhang mit dem Faktor Oberflächenabfluss von Bedeutung. Die Menge an oberflächlich abfliessendem Wasser und darin enthaltenem Sediment erhöht sich mit zunehmender Hanglänge, was dessen erosive Wirkung verstärkt. Die Hanglänge kann durch strukturellen Erosionsschutz in Form von Hecken, Grünstreifen oder Terrassen unterbrochen werden und dadurch die Akkumulation von Oberflächenabfluss bremsen, was eine Erosionsminderung bewirkt. Die Intensität des Niederschlags und die Bodenbedeckung sind ebenfalls zwei wichtige Faktoren in Wechselwirkung. Starke Niederschläge haben eine enorm erosive Wirkung, sofern die Regentropfen ungehindert auf den Boden treffen. Je nach Wachstumsstadium der Kulturpflanzen und abhängig von weiterer Bodenbedeckung wie Mulch ist der Boden mehr oder weniger gut vor der erosiven Kraft des Niederschlags geschützt. Die Bodenbearbeitung ist der letzte entscheidende Faktor. Während bei Mulchsaat wie erwähnt der Boden gegen Erosion geschützt wird, führt das Öffnen und Lockern des Bodens durch Pflugeinsatz zu schlechterer Bodenbeschaffenheit und fördert Bodenerosion (Rüttimann et al. 1995: 137; Hiller 2007: 8; Auerswald & Schmidt 1986: 8).

Das Verstehen dieser erosionsbestimmenden Faktoren und ihrem Zusammenspiel ist für die Erosionsforschung von zentraler Bedeutung. Neben der Kartierung von Erosionsereignissen wird zum Verständnis der einzelnen Prozesse mit Laborexperimenten und Feldversuchen

unter natürlichem oder simuliertem Regenfall gearbeitet. Jedoch ist die Erhebung aller Faktoren, wenn überhaupt möglich, enorm aufwändig und der resultierende Bodenabtrag ist ausschliesslich für diese spezifischen Bedingungen gültig und kann nicht oder nur bedingt auf abweichende Bedingungen, zukünftige Ereignisse oder die Wirkung von erosionsmindernden Massnahmen angewendet werden. Für diese Zwecke verwendet die Erosionsforschung stattdessen Erosionsmodelle (Rüttimann et al. 1995: 127, 128; Siebrecht et al. 2009: 4, 5; Helbig et al. 2010: 19, 20). Die Vielzahl unterschiedlicher Erosionsmodelle lässt sich in statistisch-empirische und physikalisch-deterministische (prozessorientierte) Ansätze unterscheiden. Empirische Modelle können grossflächig Bodenabträge berechnen, ermöglichen die Identifizierung von erosionsgefährdeten Gebieten und eignen sich somit zur qualitativen Erosionsbewertung. Sie basieren auf statistischen Daten von Feld- oder Laborversuchen und zeichnen sich oft durch die relativ geringe Anzahl an Variablen aus. Dadurch sind empirische Modelle in der Regel gut auf andere Regionen übertrag- und miteinander vergleichbar, sofern die Grundlagendaten für die entsprechende Region vorhanden sind. Weiter ist aufgrund der Vereinfachung von erosionsbestimmenden Faktoren ihre räumliche und vor allem zeitliche Auflösung mittel bis gering. So kann bspw. die USLE von Wischmeier & Smith (1978) den langjährig gemittelten Bodenabtrag für eine Parzelle berechnen, lässt jedoch keine verlässlichen Aussagen zum Erosionsverlauf bei Einzelereignissen zu. Dies ist hingegen mit physikalisch-deterministischen Modellen wie Erosion 2D/3D von Schmidt et al. (1996) möglich. Diese berechnen fluviale Erosions- und Akkumulationsprozesse mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung für einzelne Ereignisse und eignen sich dadurch zur Analyse von linearen Erosionsformen und möglicher Off-site-Schäden. Prozessorientierte Modelle benötigen jedoch viele Parameter und sind dadurch nicht für grössere Gebiete geeignet und leiden unter limitierter Vergleichbarkeit (Helbig et al. 2010: 10, 19, 20; Siebrecht et al. 2009: 4, 5). Abbildung 2.4 zeigt die in der Schweizer Erosionsforschung hauptsächlich verwendeten Methoden und ihre jeweiligen Einsatzzwecke auf. Die zeit- und kostenintensiven Feldmessungen kommen als Vollzugshilfe kaum mehr zum Einsatz und wurden weitgehend durch Erosionsmodelle ersetzt. Während sich computergestützte Erosionsmodelle nicht zuletzt dank dem technischen Fortschritt immer grösserer Beliebtheit erfreuen, können sie Feld- und Laborversuche jedoch keinesfalls komplett ersetzen. Gerade für die verlässliche Anwendung von statistisch-empirischen Modellen sind gute Grundlagendaten aus der Feldforschung unerlässlich und auch zur Validierung von prozessorientierten Modellen sind Feldmessungen nötig. Da Erosionsmodelle aber zuverlässig erosionsgefährdete Gebiete identifizieren können, werden sie gerne als Vollzugshilfen angewendet. Jedoch tendieren nach einer Studie von Ogermann et al. (2006: 210, 215) sowohl empirische wie prozessorientierte Modelle im Vergleich mit Erosionskartierungen dazu, zu viele Flächen als erosionsgefährdet zu interpretieren, was eine nachträgliche Überprüfung im Feld nach wie vor nötig macht.

Räumliche Skala	Methode	Einsatzzweck/ Anwendungsgebiete*					
		1	2	3	4	5	6
Standort 1-100 m ²	Testparzelle im Feld oder Labor; z.B. für Regensimulation, <i>splash</i> -Erosionsmessungen	x	x	(x)		(x)	
Einzelhang/ Ackerschlag 0.01-10 ha	Feldmessstation Abfluss- und Abtragsmessungen; Gerlach-Tröge	x	x	(x)		x	
	Tracereinsatz im Feld (z.B. Caesium 137 o.a. Radionuklide)	x	x	(x)		(x)	
	Empirische Modelle: z.B. USLE, RUSLE, ABAG, EPIC, Erosionsschlüssel			x	x		x
	Prozessorientierte Modelle: z.B. EROSION 2D, WEPP			(x)	x		x
Einzugsgebiet 0.01-10 km ²	Erosionsschadenskartierung im Feld	(x)	x	x		x	x
	Messung des Sedimentaustrags	x	x	x		(x)	(x)
	Tracereinsatz im Feld (z.B. Isotope, Fingerprint)	x	x	x		x	(x)
	Empirische Modelle: z.B. USLE-Derivate			x	x		x
	Prozessorientierte Modelle: z.B. EROSION 3D, WEPP			(x)	x		x

*1 = Grundlagenforschung, 2 = Validierung bestehender Modelle, 3 = Monitoring, 4 = Szenarien rechnen, 5 = Erarbeitung von Vollzugshilfen, 6 = Vollzugshilfe; x = Hauptanwendungsgebiet, (x) = eingeschränkte Anwendungsmöglichkeit
 (ABAG: Allgemeine Bodenabtragsgleichung; WEPP: Water erosion prediction project; USLE: Universal soil loss equation; RUSLE: Revised universal soil loss equation; EPIC: Erosion productivity impact calculator)

Abbildung 2.4: Anwendungsgebiete für Methoden zur Messung oder Abschätzung von Bodenerosion auf Schweizer Ackerflächen (Ogermann et al. 2006)

Eine solche Vollzugshilfe ist die Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2), welche auf einem Derivat der USLE basiert. Im Folgenden werden die USLE und im speziellen ihr C-Faktor erläutert, bevor die ERK2 näher vorgestellt wird.

2.2 Universal Soil Loss Equation (USLE)

Die Universal Soil Loss Equation (USLE) ist ein empirisches Erosionsmodell und wurde von Wischmeier & Smith (1978) auf der Basis von jahrelangen Messdaten aus zahlreichen Regionen der USA entwickelt. Sie ist eine Faktorgleichung bestehend aus den erosionsbestimmenden Faktoren Niederschlagserosivität (R), Bodenerodierbarkeit (K), Topographie (L, S), Bodenbedeckung und Bodenbearbeitung (C), sowie einem Faktor zur Berücksichtigung von strukturellen Erosionsschutzmassnahmen (P). Das Ergebnis dieser Erosionsgleichung ist der langjährig zu erwartende mittlere Bodenabtrag (A) durch Wassererosion einer bestimmten Fläche unter bestimmter Bewirtschaftung (Wischmeier & Smith 1978: 3, 4; Schwertmann et al. 1987: 9; DIN 19708 2005: 6).

$$\text{USLE: } A = R * K * L * S * C * P$$

Mit der USLE kann je nach Wahl der Faktorvariablen entweder der mittlere Bodenabtrag von einer mehrjährigen Fruchtfolge, von einem Jahr einer Fruchtfolge oder gar von einer bestimmten Wachstumsperiode eines Jahres berechnet werden. Es gilt allerdings zu beachten, dass es sich dabei immer um einen langjährigen Durchschnittswert des Bodenabtrags

handelt. Denn die einzelnen Variablen der Faktoren unterscheiden sich von Ereignis zu Ereignis teils stark. Es zeigte sich aber, dass sich diese Schwankungen über längere Zeiträume ausgleichen und einen stabilen Mittelwert bilden (Wischmeier & Smith 1978: 3, 4). Weiter ist das Ergebnis der USLE auch als Mittelwert für die gesamte Untersuchungsfläche zu verstehen. An einem gleichförmigen Hang ist der Bodenabtrag in der Realität oben am Hang viel geringer und am Hangende deutlich höher als der berechnete Durchschnitt (Renard et al. 1997: 15).

2.2.1 Faktoren der USLE

Die einzelnen Faktoren werden im Folgenden erklärt, jedoch nicht im Detail abgehandelt, da sie für die Arbeit mit Ausnahme des C-Faktors nicht von zentraler Bedeutung sind. Der C-Faktor und dessen Variablen werden im anschliessenden Kapitel 2.3 näher erläutert. Bei Interesse finden sich detaillierte Informationen zu den einzelnen Faktoren in der Primärliteratur von Wischmeier & Smith (1978) oder in deutscher Sprache bei Schwertmann et al. (1987).

Der R-Faktor ist der Regen- und Oberflächenabflussfaktor und beschreibt die gebietsspezifische Erosionskraft (Erosivität) der Niederschläge. Die Kraft des Wassers ist es, welche Erosion bewirkt, sei es durch den Aufprall von Regentropfen oder die Scherkräfte von Oberflächenabfluss. Aber nicht jedes Niederschlagsereignis entwickelt genügend starke Kräfte, um eine erosive Wirkung zu entfalten. Ein Niederschlagsereignis gilt in der USLE dann als erosionswirksam, wenn es eine Niederschlagsmenge von mindestens 10 mm oder eine Niederschlagsintensität innerhalb von 30 Minuten von mehr als 10 mm/h aufweist. Der R-Faktor wird aus der kinetischen Energie und der Intensität aller erosionswirksamen Einzelregen eines Jahres berechnet und über mehrere Jahre gemittelt. Dabei werden Regenfälle, die weniger als sechs Stunden auseinander liegen, als ein Ereignis betrachtet (Wischmeier & Smith 1978: 5; Schwertmann et al. 1987: 9, 14; DIN 19708 2005: 8).

Durch den K-Faktor wird die Erodierbarkeit des Bodens, also dessen Stabilität gegenüber der erosiven Wirkung von Niederschlägen, beziffert. Die Bodenerodierbarkeit K ist von verschiedenen Bodeneigenschaften abhängig und drückt den jährlichen Bodenabtrag eines bestimmten Bodens pro R-Einheit auf einem Standardhang (22m Länge, 9% Gefälle, konstante Schwarzbrache, in Gefällsrichtung gepflügt) aus. Die Bodenerodierbarkeit hängt von der Verteilung der Korngrößen, dem Anteil organischen Materials, der durch den Bodentyp gegebenen Aggregatsklasse und der Wasserdurchlässigkeit ab. Im K-Faktor werden nur langfristige Veränderungen der Bodeneigenschaften berücksichtigt. Kurzfristige Änderungen durch die Bewirtschaftung wie bspw. durch Pflugeinsatz oder pflanzenabhängige Veränderungen der Aggregatstabilität werden in der USLE durch den Bedeckungs- und Bewirtschaftungsfaktor C ausgedrückt (Wischmeier & Smith 1978: 4, 8, 10; Siebrecht et al. 2009: 6; Schwertmann et al. 1987: 9, 19).

Mit den Faktoren L und S werden in die USLE topographische Eigenschaften des Untersuchungsgebietes integriert. Grundsätzlich erhöht sich der Bodenabtrag einer Fläche bei zunehmender Hanglänge und Hangneigung. Denn je steiler ein Hang ist, desto höher ist die Menge an oberflächlich abfließendem Niederschlag und je schneller ist dessen Fließgeschwindigkeit. Ferner akkumuliert sich mit zunehmender Distanz der Oberflächenabfluss und beschleunigt sich. Dies erhöht dessen erosive Wirkung, da grössere Mengen und Geschwindigkeiten von Abfluss dessen Abscher- und Transportkapazität erhöhen. Der L-Faktor beschreibt den Einfluss der Hanglänge und entspricht dem Verhältnis aus dem Bodenabtrag des zu untersuchenden Hanges beliebiger Länge zu dem des Standardhangs mit 22m Länge bei sonst gleichen Bedingungen. Analog dazu entspricht der Hangneigungsfaktor S dem Verhältnis aus dem Bodenabtrag des Untersuchungshanges mit beliebiger Neigung zu dem des Standardhangs mit 9% Steigung (Wischmeier & Smith 1978: 4, 12, 14, 15; Siebrecht et al. 2009: 6; Schwertmann et al. 1987: 9, 10, 29).

Der C-Faktor ist der Bedeckungs- und Bewirtschaftungsfaktor und beschreibt das Verhältnis vom Bodenabtrag einer beliebig bewirtschafteten Fläche zu jenem einer gepflügten Schwarzbrache. Der C-Faktor ist wohl der komplexeste Faktor der USLE und steht bei der vorliegenden Arbeit im Zentrum. Er wird im folgenden Kapitel 2.3 detailliert erklärt (Wischmeier & Smith 1978: 4; Schwertmann et al. 1987: 10).

P ist der Erosionsschutzfaktor und gibt das Verhältnis des Bodenabtrags einer Fläche mit vorhandenen Erosionsschutzmassnahmen zu dem einer in Gefällsrichtung bearbeiteten Fläche ohne Schutzmassnahmen an. Zu den möglichen Erosionsschutzmassnahmen gehören Konturnutzung, Streifennutzung und Terrassierung (Wischmeier & Smith 1978: 4; Schwertmann et al. 1987: 10).

2.2.2 Wichtige Derivate der USLE

Die USLE galt als das am besten erprobte und weltweit verbreitetste Erosionsmodell (Auerswald & Schmidt 1986: 8) und hat auch heute noch grosse Bedeutung. Dies liegt vermutlich in ihrer hohen Flexibilität bei der Anwendung begründet, eine grosse Stärke der USLE gegenüber manch anderem Erosionsmodell. Mit der USLE kann nicht nur der mittlere Bodenabtrag für alle erdenklichen Bedingungen ermittelt werden, sie eignet sich eben auch dazu die Auswirkungen von veränderten Bedingungen auf den Bodenabtrag zu berechnen. Damit kann mit der USLE die Wirksamkeit von erosionsmindernden Massnahmen für verschiedene Bewirtschaftungs-Szenarien abgeschätzt werden, was sie zu einem bedeutenden Hilfsmittel für den Vollzug macht (Schwertmann et al. 1987: 10; Prasuhn et al. 2007: 121). Flexibel ist die USLE auch im Sinne ihrer Übertragbarkeit auf andere Regionen. Zwar wurde sie in den USA auf Basis dortiger Messdaten entwickelt, kann jedoch überall angewendet werden wo entsprechende Werte für die einzelnen Faktoren vorhanden sind. Diese universelle Verwendbarkeit ist eine Grundidee der Universal Soil Loss Equation, da sie mit dem Ziel

entwickelt wurde in allen Regionen der USA anwendbar zu sein (Renard et al. 1997: 5, 9). Dank der geringen Anzahl an Parametern können die benötigten Grundlagendaten meist relativ einfach beschafft werden und liegen bspw. in der Schweiz in guter Qualität vor (Prasuhn et al. 2007: 121; Bircher et al. 2017, unveröffentlicht: 4). Dies ermöglicht es auch das empirische Modell laufend aktuell zu halten, sofern neue Daten vorhanden sind. Entsprechend gibt es von der USLE mehrere Derivate, welche sie aktualisieren (RUSLE), auf andere Regionen übertragen (ABAG) oder gar die Gleichung modifizieren (MUSLE). Die drei wichtigsten Derivate, RUSLE, MUSLE und ABAG, und die damit verbundenen Änderungen werden kurz vorgestellt.

Renard et al. (1997) haben mit der Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) eine überarbeitete und aktualisierte Version der USLE für die USA entwickelt. Die Funktionsweise der USLE bleibt bei der RUSLE bestehen, doch wurde teils die Berechnung der einzelnen Faktoren überarbeitet oder um neue Grundlagendaten erweitert, welche zur Zeit der Entwicklung der USLE noch nicht verfügbar waren. Die beiden wichtigsten Änderungen sind einerseits eine komplexere Abbildung des Erosionsprozesses unter Berücksichtigung der Prozesse Ablösung, Verlagerung und Deposition durch physikalisch-deterministische Modellaspekte, und andererseits eine deutlich höhere zeitliche Auflösung, welche die durchschnittlichen Bodenabträge eines Jahres neu als Summe einzelner Tageswerte der jeweiligen Faktoren ermittelt. Zu den factorspezifischen Veränderungen zählen unter anderem neue Isoerodentkarten als Grundlage für den R-Faktor, eine zeitliche Variabilität des K-Faktors, welcher neu basierend auf Niederschlagscharakteristik und Temperatur einen deutlichen Jahresverlauf aufweist, ein auf Subfaktoren basierender Ansatz zur individuellen Ermittlung des C-Faktors, neue Berechnungsweisen für die Faktoren L und S zur Unterscheidung von Rillen- und Flächenerosion, sowie neue Werte für Erosionsschutzmassnahmen im P-Faktor. Ebenfalls neu ist die Berechnung des Bodenabtrags mittels Computerprogramm (Renard et al. 1997: 5, 10, 11; Siebrecht et al. 2009: 46-49).

Die Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) von Williams & Berndt (1977) ersetzt den Niederschlagsfaktor (R-Faktor) der USLE durch einen den Oberflächenabfluss beschreibenden Faktor. Weiter verwendet sie für den LS-Faktor das *Unit Contributing Area* Konzept und *Multiple-flow* Algorithmen anstatt wie die USLE das *Regular Slope* Konzept und *Single-flow* Algorithmen. Dadurch ermöglicht die MUSLE eine relativ genaue Abschätzung des Sedimenteintrags aus dem Einzugsgebiet in den Vorfluter und zwar für Einzelereignisse. In der MUSLE berücksichtigt der Abfluss die Niederschlagsenergie und die vorhergehende Bodenfeuchtigkeit und bildet damit einen geeigneten Indikator für die Sedimentfracht. Da der Oberflächenabfluss als unabhängiger Faktor gerechnet wird, erzielt die MUSLE eine höhere Genauigkeit bei der Erosionsabschätzung als die USLE oder RUSLE (Williams & Berndt 1977: 1100-1104; Zhang et al. 2009: 85; Gisler et al. 2010: 7, 8; Arekhi et al. 2011: 2, 3).

Schwertmann et al. (1987) haben mit der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) eine an bayerische Verhältnisse angepasste Variante der USLE entwickelt. Die Werte für die Variablen der Faktoren wurden zum Teil von Wischmeier & Smith (1978) übernommen, in den meisten Fällen war jedoch die Verwendung und Erhebung eigener Daten nötig. Die Datengrundlage ist dann auch der eigentliche Unterschied zwischen ABAG und USLE. Inzwischen wurde die ABAG weiterentwickelt und liegt als DIN-Norm (DIN 19708 2005) für die Anwendung in Deutschland vor. Kleine Änderungen gab es bspw. beim K-Faktor, der abhängig von Bodenart, Humusgehalt, Aggregatgröße, Wasserdurchlässigkeit und Grobbodenbedeckung mit einer neuen Formel berechnet wird. Unter Verwendung regionaler Datengrundlagen kann die ABAG grundsätzlich in ganz Mitteleuropa angewandt werden (Schwertmann et al. 1987: 10; DIN 19708 2005: 9; Prasuhn et al. 2007: 121).

Je nach Anwendungszweck und Region werden in der Forschung Varianten der RUSLE, MUSLE oder ABAG am häufigsten verwendet. In den USA hat die RUSLE inzwischen die USLE als meistverwendetes empirisches Erosionsmodell abgelöst, obwohl die USLE je nach Anwendung ebenfalls noch häufig zum Einsatz kommt. In Europa und der Schweiz kommt in der Regel die ABAG zum Einsatz und wird bei Bedarf und Möglichkeit gezielt um neuere oder angepasste Grundlagendaten ergänzt.

2.3 C-Faktor der USLE

Der C-Faktor der USLE ist der Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor, im Englischen cover and management factor genannt. Er beschreibt wie sich die vegetative Bodenbedeckung und Bodenbearbeitungsverfahren auf den Bodenabtrag auswirken. Der C-Faktor ist ein dimensionsloser Faktor zwischen 0 und 1 und entspricht dem Verhältnis des Bodenabtrags auf einer Fläche mit bestimmter Bewirtschaftung zu dem Abtrag eines Standardhangs. Der Standardhang entspricht einer in Gefällsrichtung gepflügten, konstanten Schwarzbrache und hat eine Länge von 22 m und ein Gefälle von 9%. Grundsätzlich ist der Bodenabtrag einer bewirtschafteten Fläche geringer als jener einer Brache, da der Boden durch die Pflanzendecke ein Stück weit vor Erosion geschützt wird. Der C-Faktor gibt also an um wie viel Prozent (0 – 1 entspricht 0 – 100%) geringer der Bodenabtrag der untersuchten Bewirtschaftungsfläche im Vergleich zur Schwarzbrache des Standardhangs ausfällt (Wischmeier & Smith 1978: 17; Schwertmann et al. 1987: 10, 19).

Die Bewirtschaftung einer Fläche beeinflusst den möglichen Bodenabtrag auf zwei Arten. Einerseits schützt die Pflanzendecke der angebauten Ackerkulturen oder Bodenbedeckung durch Mulchverfahren den Boden vor der erosiven Wirkung der Niederschläge und andererseits verändern Bodenbearbeitungsverfahren wie Pflugeinsatz Bodeneigenschaften wie Aggregatstabilität oder Infiltrationskapazität. Beides beeinflusst entscheidend ob ein Niederschlagsereignis zu Erosion führen kann oder nicht. Im Ackerbau werden die Kulturen allerdings regelmässig geerntet, der Boden bearbeitet und neu gesät, was im Jahresverlauf

zu Phasen unterschiedlicher Bodenbedeckung führt und die Bodeneigenschaften kurzfristig verändert. Dies bewirkt eine variierende Erosionsanfälligkeit, welche von der Art Kulturpflanze und ihrer jeweiligen Wachstumsphase, der Kulturperiode, abhängt. Diese fruchtartenspezifischen Variationen der Erodibilität werden beim C-Faktor durch den relativen Bodenabtrag (RBA) für jede Kulturperiode angegeben. Doch auch auf einer unbedeckten Ackerfläche kommt es nicht zu Erosion, sofern in dieser Zeit keine erosiven Niederschläge auftreten. Und umgekehrt können auch starke Gewitter keinen gut bedeckten und somit geschützten Boden erodieren. Darum muss im C-Faktor neben dem RBA auch die Verteilung der erosiven Niederschläge übers Jahr in Form des relativen R-Anteils (RRA) einbezogen werden. Der RRA ist der Anteil in Summenprozent am Jahres-R-Faktor-Wert für die jeweilige Kulturperiode, gibt also an wie hoch die Niederschlagserosivität während einer Kulturperiode ist. Beides zusammen betrachtet, also das Produkt aus der Erosionsanfälligkeit (RBA) und der Niederschlagserosivität (RRA) während einer bestimmten Kulturperiode, ergibt den C-Faktor-Anteil dieser Periode. Dieser C-Faktor-Anteil fällt dann besonders hoch aus, wenn viel erosiver Niederschlag in einer Kulturperiode auftritt, in welcher der Boden bewirtschaftungsbedingt eine hohe Erosionsanfälligkeit aufweist. Die C-Faktor-Anteile aller Perioden von allen Kulturen einer Fruchtfolge werden aufsummiert und durch die Anzahl Jahre der Fruchtfolge geteilt, um den mittleren C-Faktor der ganzen Fruchtfolge zu erhalten (Wischmeier & Smith 1978: 17, 18, 21, 25; Schwertmann et al. 1987: 38, 46, 47). Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Variablen des C-Faktors, die Kulturperioden, den relativen Bodenabtrag und den relativen R-Anteil, eingegangen.

2.3.1 Kulturperioden

Wie oben erwähnt verändert sich die Erodibilität unter anderem abhängig vom wachstumsbedingten Ausmass der Bodenbedeckung durch die Kulturpflanze. Aus praktischen Gründen wird diese Entwicklung bei der USLE in einzelne Phasen unterteilt innerhalb deren die RBA-Werte und damit die Erosionsanfälligkeit einigermassen gleichmässig sind. Wischmeier & Smith (1978: 18) haben erkannt, dass eine Einteilung nach Anteil der Pflanzendecke in Prozent genauer ist, als eine Unterteilung in gleichlange Zeitabschnitte, weil das Pflanzenwachstum kulturspezifisch ist und von externen, regionalen Faktoren wie Höhenlage, Klima oder Bodentyp abhängt. So haben sie basierend auf RBA-Werten aus Messdaten von Beregnungsversuchen eine Unterteilung in sechs Kulturperioden entwickelt. Beginnend mit der Zeit von der Bodenbearbeitung bis zur Saatbettbereitung (BB-SB), danach Saat bis zur Entwicklung von 10% Pflanzendecke (SB-10%), dann 10% bis 50% Pflanzendecke (10-50%), 50% bis 75% (50-75%), von 75% Pflanzendecke bis zur Ernte (75%-E) und schliesslich die Zeit von der Ernte bis zur Bodenbearbeitung (E-BB) der Folgekultur. Diese Einteilung wurde von Schwertmann et al. (1987: 41) für die ABAG übernommen. Die einzelnen Zeitpunkte für Saat und Ernte sowie die Dauer der jeweiligen

Kulturperioden variieren dabei abhängig von der Kultur, der geographischen Region und der Höhenlage (Wischmeier & Smith 1978: 18).

2.3.2 Relativer Bodenabtrag (RBA)

Die Pflanzendecke ist jedoch nicht bei allen Kulturen gleich geformt und ausgeprägt. Die Prozentangaben der Kulturperioden sind folglich in Bezug auf das mögliche Wachstum der jeweiligen Kultur zu beziehen. Beispielsweise ist die absolute Bodenbedeckung in der Kulturperiode mit 50-75% Pflanzendecke bei Getreide deutlich höher als bei Kartoffeln. Entsprechend hat Getreide gegenüber Kartoffeln eine bessere Schutzwirkung vor Erosion durch die Bodenbedeckung der Pflanzendecke. Bei gleichem Bedeckungsgrad hat jene Kultur mit dem tiefer liegenden Blattdach die bessere Schutzwirkung, weil die Fallhöhe die Kraft von herabtropfendem Niederschlag und damit dessen Erosivität bestimmt (Schwertmann et al. 1987: 39).

Abbildung 2.5 veranschaulicht anhand eines vereinfachten allgemeinen Beispiels, wie sich der relative Bodenabtrag mit zunehmender Bodenbedeckung verringert. Bei 10% Bedeckung liegt der RBA bei 75% (rot), während er sich bereits bei 30% Prozent Bodenbedeckung auf unter 50% reduziert (grün). Neben dem Bedeckungsgrad der Pflanzendecke sind weiter die Bodenbedeckung durch auf dem Acker verbleibende Pflanzenreste wie Mulch, sowie die Veränderung der Bodeneigenschaften durch die Pflanze und durch die Bodenbearbeitung wichtige Einflussgrößen des relativen Bodenabtrags. Diese Variablen hängen meist von der Kulturpflanze selbst und ihrer jeweiligen Kulturperiode ab. Entsprechend gibt es für die verschiedenen Kulturen und ihre Kulturperioden abhängig von der gewählten Bodenbearbeitung unterschiedliche RBA-Werte. Der RBA, im Englischen soil loss ratio (SLR) genannt, ist dabei der Faktor um wie viel sich der Bodenabtrag durch die Eigenschaften der Bodenbearbeitung und der Pflanze in einer bestimmten Kulturperiode im Vergleich zur gepflügten Schwarzbrache verändert (Schwertmann et al. 1987: 38). Diese Eigenschaften der Pflanzen und der Bodenbearbeitung können den Bodenabtrag auf vielseitige Weise beeinflussen.

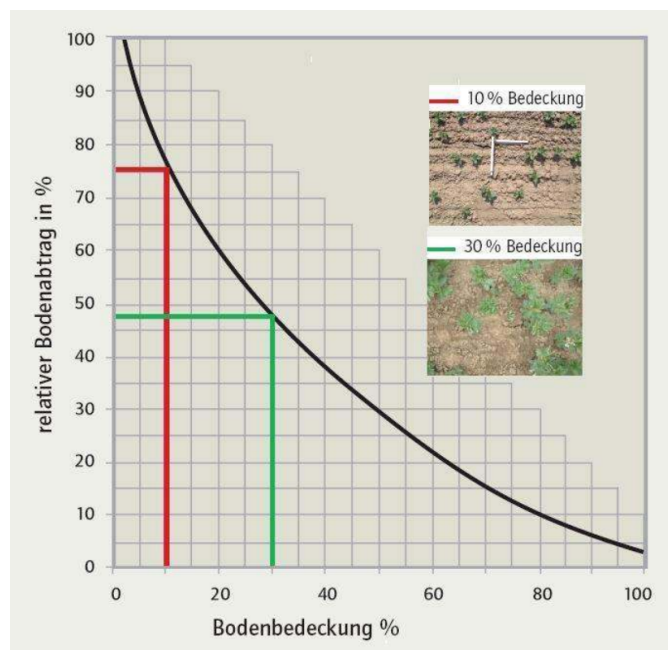


Abbildung 2.5: Einfluss der Bodenbedeckung auf den relativen Bodenabtrag (Hiller 2007)

Entsprechend gibt es für die verschiedenen Kulturen und ihre Kulturperioden abhängig von der gewählten Bodenbearbeitung unterschiedliche RBA-Werte. Der RBA, im Englischen soil loss ratio (SLR) genannt, ist dabei der Faktor um wie viel sich der Bodenabtrag durch die Eigenschaften der Bodenbearbeitung und der Pflanze in einer bestimmten Kulturperiode im Vergleich zur gepflügten Schwarzbrache verändert (Schwertmann et al. 1987: 38). Diese Eigenschaften der Pflanzen und der Bodenbearbeitung können den Bodenabtrag auf vielseitige Weise beeinflussen.

In Bezug auf die Erodibilität des Bodens sind besonders Auswirkungen der Bewirtschaftung auf die Aggregatstabilität und die Infiltration von Niederschlag zu betrachten, wobei sich diese auch gegenseitig beeinflussen. Eine hohe Aggregatstabilität bewirkt, dass weniger Bodenpartikel durch Wasser aus dem Bodenverbund herausgelöst werden und reduziert damit die mobilisierbaren Erosionsmassen (Siebrecht et al. 2009: 31). Grösse und Stabilität der Aggregate bestimmen Porenräume und Bodenrauigkeit und sind damit ausschlaggebend für die Infiltrationskapazität des Bodens. Hohe Rauigkeit und gute Infiltration verringern die Menge und Geschwindigkeit von Oberflächenabfluss und fördern damit die Sedimentation von losgelöstem Material, was sich erosionsmindernd auswirkt (Siegrist et al. 1998, zit. in: Siebrecht et al. 2009: 23).

Kulturpflanzen beeinflussen diese Bodeneigenschaften auf unterschiedliche Weise. Während Ackerfrüchte die Aggregatstabilität grundsätzlich verringern, führt Grünlandbewirtschaftung zu einer Verbesserung der Bodenstruktur (Haynes & Francis 1993, zit. in: Siebrecht et al. 2009: 24). Die verschiedenen Ackerkulturen wirken sich dabei unterschiedlich stark aus. In Fruchtfolgen mit Zuckerrüben und Silomais konnten Diez et al. (1997, zit. in: Siebrecht et al. 2009: 24) signifikante Abweichungen zwischen den Aggregatstabilitäten der Fruchtfolgen aufzeigen, wobei Zuckerrüben höhere Werte erzielten. Diese Unterschiede lassen sich unter anderem durch die pflanzenspezifische Wirkung auf die Bodenbiologie wie Pilze oder Mikroorganismen erklären, welche ihrerseits bestimmte Auswirkungen auf die Bodenstruktur oder die Humusbilanz haben. Weiter beeinflussen auch mechanische Eigenschaften der Pflanzen wie etwa ihre Wurzelbildung die Aggregatstabilität und Infiltrationskapazität des Bodens (dos Reis Martins et al. 2009, zit. in: Siebrecht et al. 2009: 24).

Neben dem Einfluss der Pflanzen selbst wirkt sich vor allem die mechanische Bodenbearbeitung stark auf die Bodenstruktur und Infiltration aus, wobei das Anbauverfahren häufig von der Fruchtart abhängt. Intensive Bodenbearbeitungsverfahren wie Pflügen brechen Aggregate auf und schaffen so leicht erodierbares Lockermaterial an der Oberfläche. Gleichzeitig führt der Einsatz von schweren Maschinen zu Bodenverdichtung. Generell verschlechtert intensive und häufige Bodenbearbeitung viele erosionsrelevante Bodeneigenschaften wie Porosität, Rauigkeit, Bodendichte, Mikrotopographie sowie die Infiltrations- und Speicherkapazität von Wasser und erhöht dadurch Menge und Geschwindigkeit von Oberflächenabfluss (Schwertmann et al. 1987: 40, 44; Wischmeier & Smith 1978: 20; DIN 19708 2005: 14; Siebrecht et al. 2009: 31, 32). Besonders problematisch ist die Dammformung beim Kartoffelanbau (vgl. Abb. 2.6). Dieses Anbauverfahren ist nicht nur ein überaus intensiver Eingriff in die Bodenstruktur, sondern fördert Erosion indem die Furchen zwischen den Dämmen als Leitlinien für Oberflächenabfluss dienen (Prasuhn et al. 2017: 28, 29). Zudem werden die steilen Dammwände durch das in den Furchen kanalisierte Wasser angebrochen und erodiert. Chow & Rees (1994: 459) haben bei Berechnungsversuchen in Kanada nach der Dammformung viermal höhere Erosionsraten als ohne Dämme festgestellt. Allerdings kann bei Kartoffeln mit Anbauverfahren wie Querdamm- und Lochsterntechniken (vgl.

Abb. 2.6) der Oberflächenabfluss und damit die Erosion laut Prasuhn et al. (2017: 34, 35) stark reduziert werden. Im Gegensatz zur intensiven Bodenbearbeitung wirken sich konservierende Anbauverfahren mit reduzierter Bodenbearbeitung wie Mulchsaat oder die gänzlich pfluglose Direktsaat deutlich weniger bis gar nicht negativ auf die Aggregatstabilität und Infiltration aus (Álvaro-Fuentes et al. 2009, zit. in: Siebrecht et al. 2009: 23). Die Bodenstruktur wird dabei kaum bis gar nicht verändert und die aufliegenden Pflanzenreste der Vor- oder Zwischenfrucht verbessern die Bodeneigenschaften zusätzlich und reduzieren den Oberflächenabfluss. Bei einer Umstellung von intensiver auf reduzierte Bodenbearbeitung zeigt sich bereits nach zwei Jahren eine deutlich höhere Aggregatstabilität und der Oberflächenabfluss sinkt um 27%, was die Bodenabträge um bemerkenswerte 63% reduziert (Six et al. 2000; Rasia & Kay 1995, beide zit. in: Siebrecht et al. 2009: 23).



Abbildung 2.6: Dammformung beim Kartoffelanbau. Diese als *Querdammhäufler* bezeichnete Maschine bildet in den Rinnen zusätzlich kleine Querdämme, welche den Oberflächenabfluss und damit das Erosionsrisiko reduzieren (Foto: LaFranceAgricole)

Der Anbau von Zwischenfrüchten und Kunstwiese zur Gründüngung oder als Futterbau in der Fruchtfolge wirkt sich ebenfalls positiv auf viele Bodeneigenschaften aus und vermindert die Bodenerosion (Davis et al. 2001, zit. in: Siebrecht et al. 2009: 27). Während nichtlegume Zwischenkulturen vor allem die Aggregatstabilität und den Kohlenstoffgehalt des Bodens sehr effektiv steigern, erhöhen Leguminosen besonders die Stickstoffpools (Sainju et al. 2003, zit. in: Siebrecht et al. 2009: 27).

Wie gezeigt werden konnte ist der Einfluss verschiedener Kulturpflanzen und Bodenbearbeitungsverfahren auf den zu erwartenden Bodenabtrag sehr vielseitig. Entsprechend ihrer Auswirkungen gelten gewisse Kulturen und Anbauverfahren als erosionsmindernd

während andere erosionsfördernd sind. Neben dem Einfluss auf Bodeneigenschaften ist dabei laut Siebrecht et al. (2009: 25) vor allem entscheidend in welcher Zeit die schützende Pflanzendecke einer Kultur entsteht und wie dicht diese ist. Fruchtarten die eine möglichst schnelle und vollständige Bodenbedeckung erreichen sind erosionsmindernd, solche mit langsam wachsender und während hoher Niederschlagserosivität lückenhafter Bedeckung gelten als erosionsfördernd. Blatt- und Hackfrüchte wie Mais, Rüben oder Kartoffeln sind meist mit intensiver Bodenbearbeitung verbunden und die Saatbettbereitung findet in Zeiten hoher Niederschlagserosivität statt. Auch anschliessend bieten gerade Hackfrüchte bis weit in den Juni ungenügenden Erosionsschutz aufgrund der geringen Pflanzendecke und zählen deshalb zu den erosionsfördernden Ackerfrüchten (Schwertmann et al. 1987: 40, Friedli 2006: 44). Besonders bei konventionell angebauten Kartoffeln kommt es wegen der dammförmigen Anbauweise, dem Saatzeitpunkt in Phasen hoher Niederschlagserosivität, der allgemein geringen Pflanzendecke und der wenigen Ernterückstände bei gleichzeitig aufgelockertem Oberboden regelmässig zu Bodenerosion. Laut Prasuhn et al. (2017: 28, 29) sind in der Schweiz Kartoffeln am häufigsten von Erosion betroffen und verzeichnen dabei ebenfalls die höchsten Bodenabträge. Auch Wintergerste zählt laut Schwertmann et al. (1987: 40) zu den erosionsfördernden Ackerfrüchten, weil der Boden bei der Saatbettbereitung im September noch durch hohe Niederschlagserosivität gefährdet ist. Als erosionsmindernd gelten dagegen Kunstwiesen und Zwischenfrüchte wie Gräser oder Klee, da sie eine gute Bodenbedeckung aufweisen sowie die Aggregatstabilität und Bodenbiologie fördern. Auch konservierende Bodenbearbeitungsverfahren wie Mulch- und Direktsaat sind als erosionsmindernd zu bewerten, da der Boden durchgängig mit Pflanzenresten der Vor- oder Zwischenkultur bedeckt ist und die Bodenstruktur nur geringfügig beeinträchtigt wird. Solche Anbauverfahren können speziell bei Blatt- und Hackfrüchten den Bodenabtrag stark reduzieren, da auch bei fehlender Pflanzendecke in Zeiten hoher Niederschlagserosivität eine schützende Bodenbedeckung durch die Pflanzenreste der Vorkultur gegeben ist (Schwertmann et al. 1987: 40).

Einige dieser Auswirkungen von Fruchtarten und Anbauverfahren gehen über das Anbaujahr hinaus und beeinflussen auch die Erosionsanfälligkeit der Folgekultur. Diese Vererbung wird als Carry-over-Effekt bezeichnet und kann sowohl positiv wie negativ sein. Bei der Berechnung des C-Faktors werden die RBA-Werte der Folgekultur bei einem Carry-over-Effekt um einen entsprechenden Faktor erhöht oder verringert. Einen positiven Einfluss hat bspw. Kunstwiese mit Gras, Klee oder Kleegras. Ihre stickstoffreichen Wurzelrückstände und weitere Pflanzenreste erhöhen nicht nur den Stickstoffpool über die Anbauzeit hinaus, sondern fördern auch die mikrobiologische Aktivität und verbessern die Aggregatstabilität nachhaltig (Siebrecht et al. 2009: 27). So fördern Leguminosen unter anderem das Pilzwachstum und führen in Folgekulturen zu einem nachweislich höheren Anteil an arbuskularen Mykorrhiza (Gollner et al. 2004, zit. in: Siebrecht et al. 2009: 27). Die Pilzhyphen stärken die Bodenstabilität und reduzieren dadurch den Bodenabtrag der Folgekultur. Nach mehrjähriger Kunstwiese ist dank dem Ausbleiben von Bodenbearbeitung, konstanter

Bodenbedeckung und gutem Nahrungsangebot auch der Regenwurmanteil grösser. Durch die Regenwurmmaktivität werden einerseits Porenräume geschaffen, was die Infiltrationskapazität verbessert und andererseits stärkt die Durchmischung von mineralischen und organischen Bodenpartikeln die Aggregatstabilität (Siebrecht et al. 2009: 27, 28). Negative Auswirkungen auf die folgende Ackerkultur haben hingegen Hack- und Blattfrüchte. Die intensive Bodenbearbeitung resultiert in anhaltenden Gefügebelastungen (Schwertmann et al. 1987: 42) und eine negative Humusbilanz und wenig Bodenbiologie verschlechtern die Bedingungen für die Folgekultur zusätzlich. Auch hier gibt es jedoch Unterschiede zwischen einzelnen Kulturen. So haben Fiener & Auerswald (2007, zit. in: Siebrecht et al. 2009: 23) Bodenabträge, Aggregatstabilität, Bodenbedeckung und Oberflächenrauigkeit in Weizen nach Mais und Weizen nach Kartoffeln untersucht. Dabei lagen die Bodenabträge des Weizen nach Kartoffeln viermal höher als bei Weizen nach Mais. Sie begründen diesen Unterschied durch die Auswirkungen auf die Aggregatstabilität, welche die spezielle und sehr intensive Bodenbearbeitung von Kartoffeln hat. Auch Prasuhn et al. (2017: 29) beschreiben negative Auswirkungen auf den Bodenabtrag von Weizen nach Kartoffeln, da die geringen Ernterückstände ein Mulch- oder Direktsaatverfahren mit ausreichend Bodenbedeckung bei der Folgekultur nicht ermöglichen. In einer Fruchtfolge ist der Anteil erosionsfördernder Kulturen entscheidend für den C-Faktor der ganzen Fruchtfolge. Denn laut Jankauskas & Jankauskiene (2003, zit. in: Siebrecht et al. 2009: 24) ist die Schutzwirkung vor Erosion einer Fruchtfolge durch die Eigenschaften der Fruchtarten und ihrer Anteile bestimmt. Ein hoher Anteil an Blatt- und Hackfrüchten hat also für die ganze Fruchtfolge negative Auswirkungen.

2.3.2.1 RBA-Werte in der Literatur

Viele der heute verwendeten RBA-Werte gehen auf die Arbeit von Wischmeier & Smith (1978) zurück. Diese haben in den USA basierend auf Erosionsmessungen aus über 10'000 'plot-years' unter natürlichem und zusätzlichen unter simuliertem Regenfall in rund 250'000 Felduntersuchungen empirische Werte für relative Bodenabträge von allen wichtigen Kulturen, für jede Kulturperiode und unter verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren ermittelt (Wischmeier & Smith 1978: 18, 21). Um den positiven Carry-over-Effekt von Kunstwiese zu berücksichtigen wurde ein Korrekturfaktor entwickelt, welcher die RBA-Werte der folgenden Kulturen verringert. Dieser Korrekturfaktor basiert auf Messwerten aus dem mittleren Westen der USA (Wischmeier & Smith 1978, zit. in: Siebrecht et al. 2009: 35) und setzt die RBA-Werte der Folgekultur im ersten Jahr nach dem Umbruch auf 20% und im zweiten Jahr auf 60% ihrer eigentlichen Werte herunter. Aufgrund der gigantischen Datengrundlage und der klimatischen und pedologischen Vielfalt der USA sollten die ermittelten RBA-Werte laut Wischmeier & Smith (1978: 21) exakt genug sein, um im Vollzug für Planung und Monitoring von Erosionsschutzmassnahmen breite Verwendung finden zu können.

Schwertmann et al. (1987: 44) haben zur Entwicklung der ABAG, der europäischen Adaption der USLE, eigene Messungen von Bodenabträgen für Getreide, Mais und Zuckerrüben unter simulierter Beregnung in Bayern gemacht. Die daraus berechneten RBA-Werte wurden mit jenen von Wischmeier & Smith (1978) in Relation gestellt und so RBA-Werte für fehlende Messungen interpoliert. Schwertmann et al. (1987: 40, 44) haben dabei den RBA der ersten Kulturperiode BB-SB unter Pflugverwendung für alle Ackerfrüchte auf 0.32 gesetzt, da bei der Saatbettbereitung mit dem Pflug die Aggregate zerkleinert werden und der Oberflächenzustand nach einer Pflugfurche unabhängig von der Vorfrucht ist. Für die zweite Periode SB-10% sind die RBA-Werte sehr ähnlich zu jenen von Wischmeier & Smith (1978). Jedoch kamen Schwertmann et al. (1987: 44) für die folgenden vier Kulturperioden auf deutlich niedrigere RBAs als Wischmeier & Smith (1978). Schwertmann et al. (1987: 44) begründen diesen Unterschied damit, dass sich in Bayern der Boden nach der Saatbettbereitung offenbar früher stabilisiert als in den USA. In die ABAG wurde der Carry-over-Effekt von mehrjähriger Kunstwiese mangels eigener Messdaten ohne Anpassung aus der USLE übernommen. Kainz (2007, zit. in: Siebrecht et al. 2009: 35) vermutet bei Verwendung dieser Werte für den mitteleuropäischen Raum jedoch eine Fehleinschätzung und rechnet mit einer stärkeren und längeren Wirkung des Carry-over-Effekts. Allerdings fehlt nach wie vor eine entsprechende Datengrundlage um den Carry-over-Effekt von Kunstwiese in der ABAG an europäische Verhältnisse anzupassen (Siebrecht et al. 2009: 35). Den negativen Carry-over-Effekt eines hohen Blattfruchtanteils in der Fruchtfolge korrigieren Schwertmann et al. (1987: 42) indem die RBA-Werte aller Blattfrüchte ab einem Anteil von über 50% um den Faktor 1.5 erhöht werden. Die RBA-Werte für Raps und Kartoffeln basieren auf nur wenigen Messungen und sollten genauer bestimmt werden. Dennoch gehen Schwertmann et al. (1987: 44) davon aus, dass die von ihnen ermittelten RBA-Werte über Bayern hinaus Gültigkeit haben. Entsprechend liegt die ABAG inzwischen auch als DIN-Norm (DIN 19708 2005) vor und findet in Europa breite Verwendung.

In der Schweiz wurde das Verfahren von Mosimann & Rüttimann (2006) für das zentrale Mittelland adaptiert. Die RBA-Werte erstellten Mosimann & Rüttimann (2006: D8) neben eigenen Erhebungen vor allem basierend auf der Datengrundlage von Schwertmann et al. (1990, zit. in: Mosimann & Rüttimann 2006: D8) und ergänzten sie durch neuere Erkenntnisse und zusätzliche Daten von Auerswald & Kainz (1998) und Prasuhn & Grünig (2001, zit. in: Mosimann & Rüttimann 2006: D8). Während die RBA-Werte für gepflügte Kulturen weitgehend von Schwertmann et al. (1990, zit. in: Mosimann & Rüttimann 2006: D8) übernommen wurden, überarbeiteten und erweiterten sie Werte für Mulch- und Direktsaatverfahren. Ausserdem wurden von Auerswald & Kainz (1998) zusätzliche RBA-Werte für Sonderkulturen wie Soja, Hanf oder Sonnenblumen übernommen. Mosimann & Rüttimann (2006: D6) wenden den positiven Carry-over-Effekt von Kunstwiese mit kontinuierlicher Abnahme auf die einzelnen Kulturperioden der beiden Folgekulturen an. Weiter reduzieren sie den Effekt bei konservierenden Anbauverfahren auf eine Wirkung von 50% des ursprünglichen Korrekturfaktors für Mulchsaat mit 10-30% Bedeckung, von

20% für Mulchsaat mit über 30% Bedeckung und von 10% bei Direktsaat, jedoch mit dem Hinweis, dass dazu keine empirische Datengrundlage vorliegt. Auch der Korrekturfaktor für Blattfruchtanteile von über 50% wird für konservierende Bodenbearbeitungsverfahren abgeschwächt und für den Fall Blattfrucht nach Kunstwiese um weitere Faktoren ergänzt (Mosimann & Rüttimann 2006: D11). Um die negativen Auswirkungen von Wurzelfrüchten wie Kartoffeln oder Rüben auf darauf folgendes Getreide oder Raps zu berücksichtigen, verwenden Mosimann & Rüttimann (2006: D11) einen weiteren Korrekturfaktor und erhöhen abhängig von der Bodenbearbeitung die RBA-Werte vom Getreide bzw. Raps nach einer Wurzelfrucht.

Der aktuellste und umfangreichste Datensatz mit RBA-Werten für die ganze Schweiz entsteht zur Zeit im Rahmen der Forschung zum Agrarumweltindikator Erosionsrisiko von Prasuhn (2017, unveröffentlicht). Dazu wurden die Daten von Mosimann & Rüttimann (2006) als Basis verwendet und teilweise überarbeitet oder ergänzt. Die wichtigste Veränderung ist dabei die drastische Erhöhung der RBA-Werte für alle Kartoffelsorten. Gestützt auf eine Studie von Chow & Rees (1994) und eigene Erkenntnisse (Prasuhn et al. 2017: 30) wird die Erosionsgefährdung von Kartoffeln aufgrund des intensiven Eingriffs in die Bodenstruktur bei der Dammformung und wegen unzureichender Bodenbedeckung durch die Pflanzendecke als überaus hoch eingeschätzt. Unmittelbar nach der Dammformung sowie nach der Ernte, also in der zweiten und sechsten Kulturperiode, ist der zu erwartende Bodenabtrag sogar höher als auf der als Referenz dienenden Schwarzbrache. Deshalb setzt Prasuhn (2017, unveröffentlicht) die RBA-Werte von Kartoffeln für die zweite Kulturperiode SB-10% auf 2.0, was einer Verdopplung des relativen Bodenabtrags gegenüber der Schwarzbrache bedeutet, und auf 1.5 für die sechste Periode E-BB. Alle Korrekturfaktoren werden unverändert von Mosimann & Rüttimann (2006) übernommen.

Neben einzelnen RBA-Werten werden in der Literatur häufig auch direkt C-Faktoren für bestimmte typische Fruchtfolgen angegeben (vgl. Schwertmann et al. 1987: 48, 49; Auerswald & Kainz 1998: 101). Da die relativen R-Anteile stärkere regionale Unterschiede aufweisen dürften als die relativen Bodenabträge, sind solche vorberechneten C-Faktoren schwieriger zu übertragen als die RBA-Werte selbst. Weiter sind solche C-Faktoren nicht auf betriebliche Eigenheiten anzupassen und berücksichtigen bspw. nur ein Bearbeitungsverfahren innerhalb einer Fruchtfolge. Diese starren C-Faktoren eignen sich deshalb in erster Linie für überbetriebliche Abschätzungen der Erosionsgefährdung, da sich dabei allfällige Abweichungen im Mittel eher ausgleichen.

2.3.3 Relativer R-Anteil (RRA)

Der R-Faktor der USLE gibt das langjährige Jahresmittel der regionalen Niederschlagserosivität an. Für die Berechnung des C-Faktors wird jedoch die Verteilung der Niederschlagserosivität über das Jahr hinweg benötigt (vgl. Abb. 2.7 und 2.8). Diese Aufschlüsselung

ist wichtig, um die relativen Bodenabträge der einzelnen Kulturperioden mit dem entsprechenden R-Anteil der Periode gewichten zu können und so die C-Faktor-Anteile der Kulturperioden zu erhalten. Denn der zu erwartende Bodenabtrag auf einer bewirtschafteten Ackerfläche hängt stark davon ab, wie die erosiven Niederschläge über die einzelnen Kulturperioden verteilt sind. Treten viele erosive Regenfälle in Zeiten auf, in denen die Erosionsschutzwirkung der Kulturpflanzen gering ausfällt, kommt es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Erosionsereignissen (Wischmeier & Smith 1978: 21, 25).

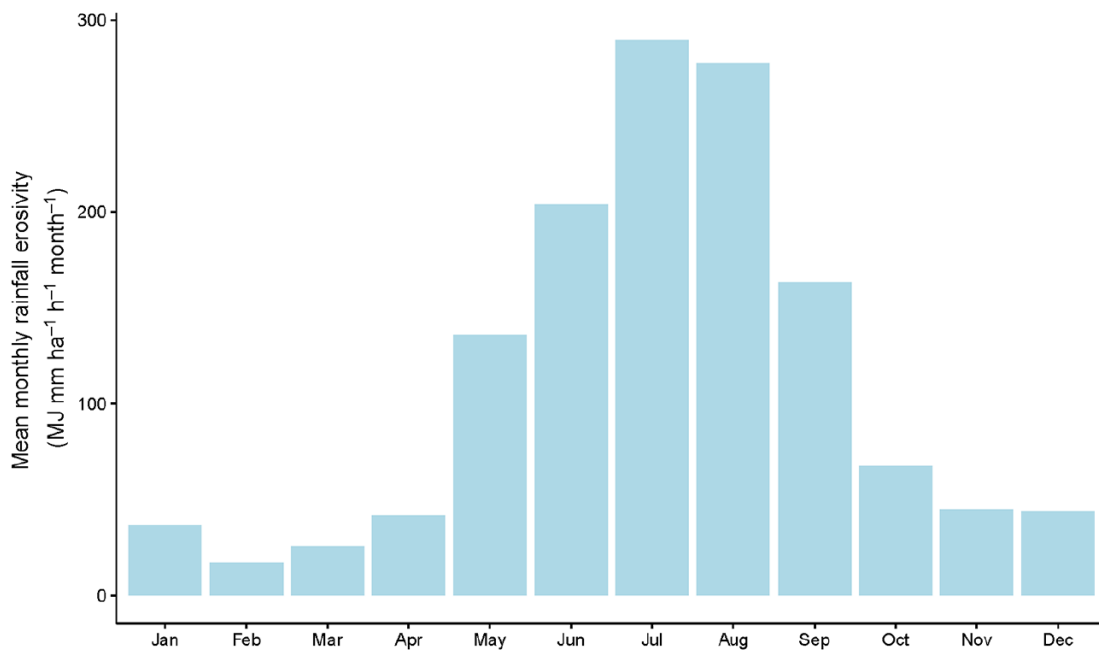


Abbildung 2.7: Durchschnittliche monatliche Niederschlagserosivität der Schweiz (Schmidt et al. 2016)

Die aktuellsten Daten zum R-Faktor für die Schweiz stammen von Schmidt et al (2016). Abbildung 2.7 zeigt die langjährig gemittelte monatliche Niederschlagserosivität der Schweiz und basiert auf Daten von 87 Messstationen mit einer durchschnittlichen Länge der Messreihen von 19.5 Jahren (Schmidt et al. 2016: 4361). Die monatliche Verteilung bildet eine Glockenform mit einem zunehmenden Trend ab Februar und dem Maximum im Juli (Schmidt et al. 2016: 4363). Die Monate Mai bis September heben sich gegenüber dem restlichen Jahr deutlich ab und allein in den vier Monaten Juni bis September kommt es zu 62% der jährlichen Niederschlagserosivität (Schmidt et al. 2016: 4367). Schwertmann et al. (1987: 45) kamen für Bayern sogar auf einen Anteil von 90% in den Monaten Mai bis September. Der hohe Anteil an der jährlichen Niederschlagserosivität in den Sommermonaten ist unter anderem durch die Gewittersaison zu begründen, welche in der Schweiz von Mai bis September dauert (Schmidt et al. 2016: 4365).

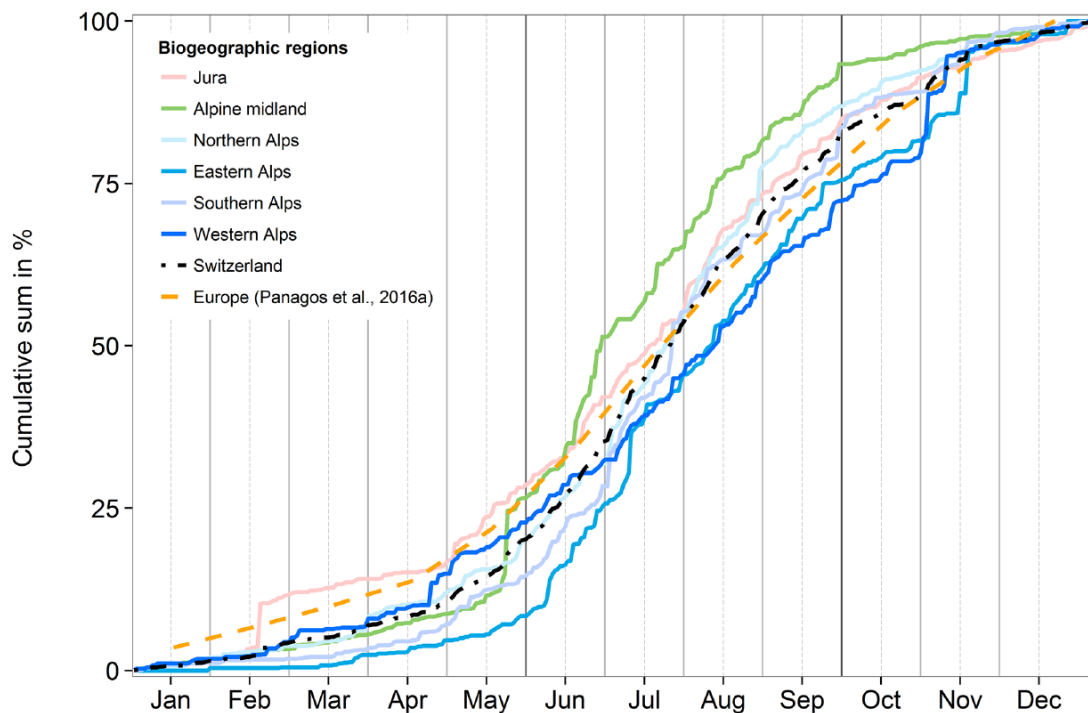


Abbildung 2.8: Prozentuale Summenkurven der täglichen Niederschlagserosivität für biogeographische Regionen der Schweiz (Schmidt et al. 2016)

Die monatliche Verteilung der Niederschlagserosivität ist für die Berechnung des C-Faktors jedoch zu ungenau, da die Kalenderdaten und Dauer der einzelnen Kulturperioden variabel sind (vgl. Kapitel 2.3.1). Stattdessen werden die täglich kumulierten Summenprozent der jährlichen Niederschlagserosivität verwendet. Dazu wurde für jeden Tag im Jahr, und über die Messreihen gemittelt, der Anteil an der jährlichen Niederschlagserosivität in Prozent errechnet. Diese Anteile werden von Tag zu Tag aufsummiert, sodass eine Summenkurve für das ganze Jahr entsteht (Abb. 2.8). Je steiler die Kurve ist, desto mehr erosiver Niederschlag tritt in dieser Zeit auf. Die stärkste Steigung fällt auf die Monate Juni bis September, was sich mit Abbildung 2.7 deckt. Damit lässt sich für jeden beliebigen Tag im Jahr der Anteil der bis dahin aufgetretenen Niederschlagserosivität ausmachen. So kann dann der Anteil erosiver Niederschläge für eine Kulturperiode mit bestimmtem Anfangs- und Enddatum ermittelt werden (Schmidt et al. 2016: 4363). Besagter Anteil ist der im C-Faktor verwendete relative R-Anteil (RRA), welcher für jede Kulturperiode von jeder Kultur einer Fruchtfolge bestimmt wird.

2.3.4 Berechnungsweisen des C-Faktors

Der C-Faktor der USLE kann nicht direkt gemessen werden, sondern wird aus den relativen Bodenabträgen bestimmter Zeitperioden und den dazugehörigen relativen R-Anteilen

berechnet. Dabei gibt es allerdings verschiedene Ansätze den C-Faktor bzw. die RBA-Werte zu ermitteln. Grundsätzlich kann unterschieden werden in Ansätze, welche den C-Faktor auf Betriebsebene unter Berücksichtigung betrieblicher Eigenschaften wie wechselnden Bodenbearbeitungsverfahren berechnen und solche, welche überbetriebliche C-Faktoren für typische Fruchtfolgen ermitteln.

Die ursprüngliche Methode geht auf die USLE von Wischmeier & Smith (1978) zurück und wird in der ABAG (Schwertmann et al. 1987; DIN 19708 2005) identisch verwendet. Der Ansatz eignet sich zur lokalen Berechnung des C-Faktors für individuelle Fruchtfolgen auf Betriebsebene und ermöglicht bei entsprechender Datengrundlage die Berücksichtigung verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren innerhalb der Fruchtfolge, sowie die Anwendung von fruchtartspezifischen Korrekturfaktoren. Zur Berechnung des C-Faktors wird dabei für jede Kulturperiode von jeder Kultur einer Fruchtfolge der jeweilige RBA-Wert mit dem entsprechenden RRA-Wert multipliziert, was den C-Faktor-Anteil der Kulturperiode ergibt. Alle C-Anteile werden aufsummiert und durch die Anzahl Jahre der Fruchtfolge geteilt, um den C-Faktor zu erhalten. Das Vorgehen ist in Abbildung 2.9 dargestellt und wird im Folgenden kurz erklärt. Alle zur Berechnung nötigen Daten und Werte sind in der Literatur zur USLE (Wischmeier & Smith 1978) bzw. ABAG (Schwertmann et al. 1987; DIN 19708 2005) tabellarisch vorhanden. Dazu gehören ein Kulturkalender mit Kalenderdaten zum Beginn und Ende jeder Kulturperiode für verschiedene Ackerfrüchte, Summenprozent der R-Faktoranteile zu jedem Datum im Jahr, RBA-Werte zu allen Perioden der Ackerfrüchte sowie Korrekturfaktoren zur allfälligen Anpassung der RBA-Werte.

In der Spalte 1 von Abbildung 2.9 ist die gewählte Fruchtfolge aufgelistet, im Beispiel eine dreijährige Abfolge von Silomais, Winterweizen und Wintergerste. Jede Kultur durchläuft die sechs Kulturperioden (Spalte 2) von der Bodenbearbeitung über die Saatbettbereitung, die verschiedenen Wachstumsstufen, die Ernte und die Zeit bis zur Bodenbearbeitung der Folgekultur. Aus dem Kulturkalender kann für jede Kultur der Fruchtfolge das Kalenderdatum für Beginn und Ende der jeweiligen Kulturperiode (Spalte 3) herausgelesen werden. Aus der Tabelle mit den Summenprozent der R-Faktoranteile wird anschliessend für diese Kalenderdaten der Kulturperioden der entsprechende R-Anteil für Beginn (Spalte 4) und Ende (Spalte 5) der Periode herausgelesen. Dabei sind die Werte so zu deuten, dass bspw. zu Beginn der zweiten Kulturperiode der ersten Ackerkultur Silomais am 20.4. bisher 2.8% des jährlichen erosiven Niederschlags aufgetreten ist und am Ende dieser Periode am 6.6. bereits 18.6% der jährlichen Niederschlagserosivität. Für die Berechnung des C-Faktors ist der R-Anteil der Periode wichtig, also wird die Differenz mit den Werten von Spalte 5 minus Spalte 4 gebildet. Am Beispiel der zweiten Kulturperiode von Silomais wird also $18.6\% - 2.8\%$ gerechnet und ergibt für diese Periode einen RRA-Wert von 15.8% (Spalte 6). Zu beachten ist, dass für die Berechnung des dimensionslosen C-Faktors auch der RRA als Wert zwischen 0 und 1 angegeben werden muss. Sollte in einer Kulturperiode ein Jahreswechsel stattfinden, wie dies in der ersten Periode von Silomais (15.11. bis 20.4.)

1 Frucht	2 Periode	3 Datum		4 R-Faktor-Anteil		6 $\frac{\text{Diff}}{100}$	7 $\frac{\text{RBA}}{100}$	8 C-Faktor-Anteil
		Beg.	Ende	Beg.	Ende			
Silo- mais	BB-SB	15. 11.	20. 4.	97,9	2,8	0,049	0,32	0,016
	SB-10	20. 4.	6. 6.	2,8	18,6	0,158	0,94	0,149
	10-50	6. 6.	30. 6.	18,6	42,8	0,242	0,45	0,109
	50-75	30. 6.	15. 7.	42,8	51,5	0,087	0,12	0,010
	75-E	15. 7.	5. 10.	51,5	94,7	0,432	0,085	0,037
	E-BB	5. 10.	17. 10.	94,7	96,1	0,014	0,44	0,006
Winter- weizen	BB-SB	17. 10.	20. 10.	96,1	96,7	0,006	0,32	0,002
	SB-10	20. 10.	10. 3.	96,7	0,77	0,041	0,46	0,019
	10-50	10. 3.	15. 4.	0,77	2,1	0,013	0,38	0,005
	50-75	15. 4.	24. 4.	2,1	3,5	0,014	0,03	0,000
	75-E	24. 4.	15. 8.	3,5	75,3	0,718	0,01	0,007
	E-BB	15. 8.	15. 9.	75,3	90,2	0,149	0,02	0,003
Winter- gerste	BB-SB	15. 9.	20. 9.	90,2	91,8	0,016	0,32	0,005
	SB-10	20. 9.	10. 10.	91,8	95,3	0,035	0,46	0,016
	10-50	10. 10.	10. 11.	95,3	97,7	0,024	0,38	0,009
	50-75	10. 11.	10. 3.	97,7	0,77	0,031	0,03	0,001
	75-E	10. 3.	20. 7.	0,77	55,8	0,550	0,01	0,006
	E-BB	20. 7.	15. 11.	55,8	97,9	0,421	0,02	0,008
Summe der C-Faktor-Anteile =								0,408

Abbildung 2.9: Beispiel der Berechnung eines C-Faktors für eine Fruchtfolge nach dem Verfahren der ABAG (Schwertmann et al. 1987)

der Fall ist, muss für die Differenzbildung der Wert in Spalte 5 um 100 erhöht werden ($102,8 - 97,9$ anstatt $2,8 - 97,9$), um den korrekten RRA-Wert der Periode zu erhalten. Als nächsten Schritt wird für jede Kulturperiode der entsprechende relative Bodenabtrag (Spalte 7) aus der RBA-Tabelle gelesen. Dabei sind für unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren individuelle RBA-Werte vorhanden. Falls in der Fruchtfolge Kunstwiese vorkommt oder mehr als die Hälfte der Kulturen Blattfrüchte sind, müssen die RBA-Werte der betroffenen Kulturen um den entsprechenden Korrekturfaktor reduziert oder erhöht werden. Der C-Faktor-Anteil jeder Periode (Spalte 8) ist dann das Produkt aus RRA (Spalte 6) und RBA (Spalte 7). Alle C-Faktor-Anteile werden schliesslich aufsummiert und durch die Anzahl Jahre der Fruchtfolge geteilt. Im Beispiel aus Abbildung 2.9 gibt das einen gerundeten C-Faktor der Fruchtfolge von 0.14 ($0.408/3 = 0.136$).

Die grossen Vorteile des USLE-Ansatzes sind die einfache Anwendung und die gute Datenverfügbarkeit dank der geringen Anzahl benötigter Parameter. Der Ansatz ist für die

individuelle Berechnung auf Betriebsebene gedacht und zeichnet sich durch eine gute Flexibilität bei der Berücksichtigung von betriebsspezifischen Eigenschaften der Bewirtschaftung aus. Entsprechend grosse Verbreitung findet der Ansatz in der Praxis (vgl. Kapitel 2.2.2). Diese Flexibilität hängt jedoch direkt von der Datenverfügbarkeit ab. Nur wenn für das Anwendungsgebiet verlässliche RBA-Werte zu den unterschiedlichen Kulturen und Anbauverfahren existieren, können diese auch berücksichtigt werden. Für die Schweiz liegen zum Beispiel RBA-Werte für die vier Bearbeitungsverfahren Pflugbewirtschaftung, Mulchsaat bis 30% Bodenbedeckung, Mulchsaat über 30% Bedeckung und Direktsaat vor (Mosimann & Rüttimann 2006; Prasuhn 2017, unveröffentlicht). Es ist folglich nicht möglich bspw. unterschiedliche Pflugtiefen direkt zu berücksichtigen.

Die RUSLE ist die überarbeitete Version der USLE und hat auch die Berechnung des C-Faktors weiterentwickelt. Das Prinzip den C-Faktor aus RBA und RRA zu berechnen bleibt an sich gleich. Aber im Gegensatz zur USLE liefern Renard et al. (1997) bei der RUSLE keine RBA-Werte für einzelne Kulturen und Anbauverfahren mehr. Stattdessen wird ein Subfaktoren-Ansatz zur individuellen Bestimmung der RBA-Werte eingeführt. Diese Subfaktoren beschreiben die vorhergehende Bewirtschaftung abhängig von Fruchtart und Bodenbearbeitung (prior land-use subfactor), die erosionsmindernde Wirkung der Bodenbedeckung durch aufliegendes Material (surface cover subfactor) und der Oberflächenrauigkeit (surface roughness subfactor), den reduzierenden Effekt geringer Ausgangsbodenfeuchte auf den Oberflächenabfluss (soil moisture subfactor), sowie die Erosionsschutzwirkung der Pflanzendecke (canopy cover subfactor). Diese fünf Subfaktoren umfassen ihrerseits verschiedene Variablen, wie etwa Dichte und Höhe der Pflanzendecke oder Untergrundbiomasse, welche die spezifischen lokalen Eigenschaften beziffern (Renard et al. 1997: 146, 150; Schönbrodt et al. 2010: 836). Die Carry-over-Effekte werden zwar von Renard et al. (1997) nicht explizit erwähnt, Siebrecht et al. (2009: 52, 53) gehen jedoch davon aus, dass diese in den Subfaktoren berücksichtigt werden können. Die RBA-Werte werden anhand der Subfaktoren für bestimmte gleichlange Zeitintervalle berechnet. Die Kulturperioden der USLE gibt es in diesem Sinne nicht. In der Literatur finden sich verschiedene Zeitintervalle, wobei Renard et al. (1997: 147) 15-tägige Zeitabschnitte verwenden. Das bedeutet, dass der RBA alle 15 Tage auf Basis der Subfaktoren neu berechnet wird. Die Dauer der Fruchtfolge kann dabei aus einer beliebigen Anzahl dieser Zeitintervalle bestehen und muss nicht wie bei der USLE zwingend aus ganzen Jahren bestehen. Analog zur USLE wird für diese Zeitintervalle der jeweilige RRA bestimmt. Zusätzlich wird der RRA der Dauer der ganzen Fruchtfolge benötigt. Die RBAs und RRAs aller Zeitabschnitte werden multipliziert, aufsummiert und durch den R-Anteil der ganzen Fruchtfolge geteilt um den C-Faktor der Fruchtfolge zu erhalten (Renard et al. 1997: 165).

Dank diesem Ansatz verfügt die RUSLE über eine deutlich höhere zeitliche Auflösung und ermöglicht es bei entsprechenden Grundlagendaten durchschnittliche Bodenabträge nicht mehr nur für einzelne Kulturperioden sondern auf Tagesbasis zu berechnen (Siebrecht et al.

2009: 47). Zudem können mit dem Subfaktoren-Ansatz deutlich mehr betriebsspezifische Eigenschaften berücksichtigt werden, was die Methode speziell für unkonventionelle oder besonders vielseitige Landwirtschaft wie den Ökolandbau interessant macht (Siebrecht et al. 2009: 47, 55, 58). Allerdings bringt diese sehr dynamische Berechnungsweise auch Nachteile mit sich. Aufgrund der zahlreichen Variablen des Subfaktoren-Ansatzes ist die RUSLE deutlich aufwändiger in der Anwendung und zur vollständigen Funktionalität der Gleichung wird ein sehr umfangreicher Datensatz benötigt (Siebrecht et al. 2009: 55). Diese Daten sind längst nicht für alle Betriebe verfügbar und deren Erhebung ist überaus aufwändig (Schönbrodt et al. 2010: 836). Weiter gibt es für die RUSLE keine Adaption an den mitteleuropäischen Raum, wie dies mit der ABAG für die USLE der Fall ist. Dem Modell liegen laut Siebrecht et al. (2009: 54, 57) zahlreiche Untersuchungsergebnisse und Modellannahmen zugrunde, welche noch nicht für mitteleuropäische Anbaubedingungen überprüft wurden.

In der Schweiz unternimmt das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) ein Agrarumweltmonitoring und erhebt auf Basis einer Reihe von betriebsbezogenen Umweltindikatoren die Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Umwelt (vgl. BLW 2014). Dazu werden im Rahmen des Agrarumweltindikators (AUI) Erosionsrisiko auch individuelle C-Faktoren auf Betriebsebene ermittelt. Die Datenerhebung für dieses nationale Projekt läuft dabei über AGRO-TECH, eine in der Schweizer Landwirtschaft häufig verwendete Datenerfassungssoftware für allerlei Betriebsdaten (BLW 2014: 2). Der C-Faktor der USLE wird auf Betriebsebene grundsätzlich für Fruchtfolgen bestimmt. Allerdings können mit AGRO-TECH nicht Daten für ganze Fruchtfolgen erhoben werden und die AUI werden jährlich ermittelt. Aus diesem Grund musste der Ansatz der USLE zur Berechnung des C-Faktors für den AUI Erosionsrisiko angepasst werden. Die Methode für den AUI wurde dabei in Anlehnung an Mosimann & Rüttimann, Grünig & Prasuhn, Auerswald, Schwertmann/Vogl/Kainz (alle zit. in: Prasuhn 2017, unveröffentlicht: 1) entwickelt. Die Berechnung wird jeweils über ein Jahr und für eine Vorkultur, Zwischenkultur und Hauptkultur gemacht, was die Vergleichbarkeit gewährleistet und zeitliche Überschneidungen oder Lücken ausschliesst (Prasuhn 2017, unveröffentlicht: 1, 8). Zur Berechnung des C-Faktors wird beginnend am 1.7. des Vorjahres die Niederschlagserosivität der angebrochenen Kulturperiode der Vorkultur bestimmt und mit dem entsprechenden RBA-Wert verrechnet. Das weitere Vorgehen für allfällige weitere Kulturperioden der Vorkultur und für die Zwischennutzung im Winter ist analog zur Methode der USLE. Die diesjährige Hauptkultur wird dann wieder nur bis zum 1.7. gerechnet. Korrekturfaktoren für Kunstwiese oder Wurzelfrucht vor Getreide/Raps müssen auf die betroffenen RBA-Werte angewandt werden, bevor diese mit den RRA-Werten gewichtet werden. Die aufsummierten C-Faktor-Anteile ergeben dann den C-Faktor für die eine Parzelle für ein Jahr. Der Korrekturfaktor für einen Blattfruchtanteil von über 50% kann bei dieser Methode statt auf die einzelnen RBA-Werte direkt auf den C-Faktor angewandt werden, da es sich nicht um eine Fruchtfolge handelt (Prasuhn 2017, unveröffentlicht: 2, 8, 9, 10). Es gilt zu betonen, dass diese Methode speziell für den AUI

Erosionsrisiko entwickelt wurde und keine anderweitige Verwendung in der Praxis hat, weil der C-Faktor grundsätzlich für Fruchtfolgen zu bestimmen ist. Die bei der Entwicklung der Methode erarbeiteten Datensätze sind jedoch die aktuellsten und umfangreichsten Daten zur C-Faktor-Berechnung, welche zur Zeit für die ganze Schweiz verfügbar sind und werden in dieser Arbeit als Grundlagendaten verwendet. Aus diesem Grund wurde auch die Berechnungsweise des C-Faktors vom AUI Erosionsrisiko an dieser Stelle vorgestellt.

Neben diesen Ansätzen zur Ermittlung des C-Faktors auf Betriebsebene existieren in der Literatur auch Methoden den C-Faktor überbetrieblich für häufige Fruchtfolgen oder gleich für ganze Regionen zu erheben. Da solche Verfahren für diese Arbeit nicht relevant sind, wird nur der Vollständigkeit halber kurz darauf eingegangen.

Auerswald (2002) hat eine Gleichung entwickelt, um den C-Faktor von Ackerflächen für grossräumige Erosionsprognosen zu ermitteln ohne dabei die einzelnen Fruchtfolgen zu kennen. Stattdessen stützt sich der Ansatz auf durchschnittliche regionale Feldfrucht-Anteile. Zuerst wurden die C-Faktoren von 50 Fruchtfolgen berechnet, welche ein weites Spektrum an gängigen Fruchtarten und üblichen Anbauverfahren in Mitteleuropa abdecken (Auerswald 2002: 2). Daraus wurde eine Gleichung formuliert welche als Variablen den Anteil kleinkörniger Mähdruschfrüchte (Getreide), den Anteil von Mulchsaatverfahren bei Hackfrüchten und den Anteil an mehrjährigem Ackerfutter enthält (Auerswald 2002: 3). Die Gleichung ist für überbetriebliche Schätzungen des C-Faktors besser geeignet als additive Verfahren und dürfte grundsätzlich für Regionen nördlich der Alpen Gültigkeit haben. Sie ist jedoch nicht für Sonderkulturen und mehrjährige Kulturen wie Weinbau ausgelegt (Auerswald 2002: 1, 4, 5). In den letzten Jahren werden zur überregionalen Bestimmung von C-Faktoren häufig Fernerkundungs- und GIS-Methoden angewendet. Sie kommen für grosse Regionen und vor allem für verschiedene Landnutzungssysteme zum Einsatz, gehen also oft über den Ackerbau hinaus. Mögliche Ansätze sind bspw. Klassierungsalgorithmen zur Unterscheidung der Landnutzung, wobei jedes Landnutzungssystem fixe C-Faktoren aus der Literatur zugeschrieben bekommt (vgl. Zhang et al. 2011), oder die Verwendung des Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI) um aus Satellitendaten die Vegetationsdecke und ihre Entwicklung abzuleiten (vgl. Schönbrodt et al. 2010; Durigon et al. 2014). GIS eignet sich auch für hybride Ansätze wie jüngst Panagos et al. (2015) mit ihrer Abschätzung des C-Faktors auf europäischer Skala zeigten. Für die Ackerflächen verwendeten sie statistische Daten zum regionalen Anteil gängiger Ackerfrüchte und den verwendeten Bearbeitungsverfahren und teilten diesen C-Faktoren aus der Literatur zu. Alle anderen Landnutzungen wurden in GIS über die Klassierung von Satellitendaten ermittelt und erhielten ebenfalls C-Faktoren aus der Literatur. In GIS wurden die Daten kombiniert und eine europaweite Karte des C-Faktors erstellt.

2.3.4.1 Software-Tools zur C-Faktor-Berechnung

Die oben vorgestellten Ansätze zur Berechnung von individuellen C-Faktoren auf Betriebsebene sind tabellenbasiert. Dabei stehen zur Berechnung des C-Faktors in der jeweiligen Literatur Tabellen mit den verfügbaren Daten zu Kulturperioden, RBA-Werten, Korrekturfaktoren und Summenprozenten des R-Faktors bereit. Der C-Faktor wird manuell nach einem bestimmten Berechnungsschlüssel aus diesen Daten ermittelt (vgl. Abb. 2.9). Gerade bei komplexeren Methoden wie der RUSLE mit ihren Subfaktoren und zahlreichen Variablen oder auch wenn viele und lange Fruchtfolgen mit der USLE berechnet werden, sind solche tabellenbasierte Berechnungen sehr aufwändig und zeitintensiv. Hier schaffen Computerprogramme Abhilfe, welche die Berechnung auf Basis von Benutzereingaben zur Bewirtschaftung automatisieren. Da die RUSLE gegenüber der USLE deutlich komplexer wurde, bietet das United States Department of Agriculture (USDA) eine frei verfügbare RUSLE-Software¹ zur Berechnung aller Faktoren und der Gleichung selbst zum Download an. Zur ABAG bietet die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) zwar ebenfalls ein Web-Tool namens *ABAG interaktiv*² an. Dieses erlaubt jedoch nur die Berechnung von C-Faktoren für eine vorgegebene Auswahl von sieben fixen Fruchtfolgen und erlaubt keine individuelle Zusammenstellung von Kulturabfolgen. Zumindest im deutschen Sprachraum existieren aber zwei Software-Tools zur individuellen Bestimmung des C-Faktors. Für das zentrale Mittelland der Schweiz haben Mosimann & Rüttimann (2006) das Programm *ErosionCH* (Version V2.02) entwickelt und für Nordrhein-Westfalen (NRW) bietet die Landwirtschaftskammer (LWK) NRW eine Excel-Anwendung zur Berechnung von C-Faktoren an (vgl. Hiller 2007: 20).

Das Programm *ErosionCH* von Mosimann & Rüttimann (2006: D1) basiert auf der Berechnungsweise der ABAG von Schwertmann et al. (1987). Das Tool wurde für den Einsatz im zentralen Mittelland der Schweiz entwickelt und soll die zuvor verwendeten Tabellen mit fixen C-Faktoren für gängige Fruchtfolgen ersetzen und neu eine individuelle Berechnung lokaler C-Faktoren ermöglichen (Mosimann & Rüttimann 2006: D1). Die Datengrundlage für die RBA-Werte wurde bereits im Kapitel 2.3.2.1 erläutert. Die Jahresverteilung der Niederschlagserosivität wurde von Rüttimann (1996, zit. in: Mosimann & Rüttimann 2006: D4) übernommen. Der Kulturkalender entstand mit Daten von den Kantonen BE, SO, AG, LU, FR und der damaligen Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (Mosimann & Rüttimann 2006: D5). Die Berechnung erfolgt aus einer Reihe von Benutzereingaben automatisch. Zuerst verlangt das Programm einige Standortfaktoren zur Parzelle wie Gefälle, Bodenart oder die Bewirtschaftungsrichtung. Diese entsprechen den restlichen Faktoren der ABAG und dienen der Abschätzung der Erosionsgefährdung, nicht der C-Faktor-Berechnung. Alle für den C-Faktor relevanten Eingaben werden im zweiten Schritt

¹RUSLE-Software vom USDA: <https://www.ars.usda.gov/southeast-area/oxford-ms/national-sedimentation-laboratory/watershed-physical-processes-research/docs/revised-universal-soil-loss-equation-rusle-welcome-to-rusle-1-and-rusle-2/> [20.10.2018]

²ABAG interaktiv der LfL: <http://www.lfl.bayern.de/appl/abag/web/> [20.10.2018]

Jahre	Kulturen	Bodenbearbeitung	Beginn der Zwischenperiode
1. Jahr 2009	Hauptkultur: Weizen (Winter) Zwischenperiode: Zwischenfutter/Gründung im Winter, überwintert	Plug/pfluglos unter 10% Bedeckung Direktsaat/Streifenfrässaat	01.08. bis 15.08.
2. Jahr 2010	Hauptkultur: Mais (Silomais) Zwischenperiode: Zwischenfutter/Gründung im Winter, überwintert	Plug/pfluglos unter 10% Bedeckung Mulchsaat 10-30% Bedeckung	01.09. bis 15.09.
3. Jahr 2011	Hauptkultur: Rüben (Zuckerrüben) Zwischenperiode: Keine Zwischenperiode	Plug/pfluglos unter 10% Bedeckung	
4. Jahr 2012	Hauptkultur: Weizen (Winter) Zwischenperiode: Rüben (Zuckerrüben), Soja	Direktsaat/Streifenfrässaat	
5. Jahr 2013	Hauptkultur: Sonnenblumen, Tabak Zwischenperiode: Triticale (Winter)		
6. Jahr 2014	Hauptkultur: Weizen (Winter), Weizen (Sommer) Zwischenperiode:		
7. Jahr 2015	Hauptkultur: Zwischenperiode:		
8. Jahr 2016	Hauptkultur: Zwischenperiode:		
9. Jahr 2017	Hauptkultur: Zwischenperiode:		
10. Jahr 2018	Hauptkultur: Zwischenperiode:		

Schritt 2 drucken **Fruchtfolgefaktor C (gemäss Schlüssel)** 1.58 (Der entsprechende C-Faktor nach ABAG ist genau 10mal kleiner)

Bemerkungen

Zurück Weiter Berechnen Felder leeren Hilfe Schliessen

Abbildung 2.10: Screenshot aus dem Programm ErosionCH von Mosimann & Rüttimann (2006). Abgebildet ist die Eingabemaske der C-Faktor-Berechnung (Screenshot, Kupferschmied 2018)

gemacht. Abbildung 2.10 zeigt die Eingabemaske von ErosionCH für die Berechnung des C-Faktors. Der Benutzer kann eine bis zu zehnjährige Fruchtfolge eingeben, wobei das Tool für eine verlässliche Berechnung mindestens Eingaben für drei Jahre benötigt. Für jedes Jahr können eine Hauptkultur, eine Zwischenperiode mit Anfangsdatum und die jeweilige Bodenbearbeitung angegeben werden. Die Hauptkultur kann aus ca. 30 in der Schweiz gängigen Ackerkulturen ausgewählt werden. Für die Bodenbearbeitung stehen vier verschiedene Verfahren zur Auswahl. Diese sind Pflug bzw. pfluglos mit weniger als 10% Bedeckungsgrad, Mulchsaat mit 10-30% Bedeckung, Mulchsaat mit über 30% Bodenbedeckung und Direktsaat bzw. Streifenfrässaat (Mosimann & Rüttimann 2006: D2). Als Zwischennutzung stehen sieben Bodenbedeckungstypen zur Verfügung. Die erste Option ist keine Zwischennutzung anzugeben wenn auf die Vorkultur innert weniger Tage gleich die nächste Hauptkultur folgt (z.B. Winterweizen nach Zuckerrüben). Dann kann eine Schwarzbrache im Herbst und Winter, eine Stoppelbrache im Winter oder eine Stoppelbrache nach

einer Winterkultur gewählt werden. Weiter gibt es die Möglichkeiten ein Zwischenfutter bzw. eine Gründüngung vor einer Schwarzbrache oder vor einer Winterkultur anzubauen. Die letzte Option ist ein Zwischenfutter bzw. eine Gründüngung im Winter, wobei zwischen abfrierenden und überwinternden Zwischenfrüchten unterschieden werden kann (Mosimann & Rüttimann 2006: D2). Der Beginn der Zwischenfrucht kann im Tool jeweils angegeben werden. Aus diesen Eingaben berechnet das Programm einen Fruchtfolgefaktor, der genau dem zehnfachen Wert des C-Faktors der ABAG entspricht. Das Programm ErosionCH erlaubt somit viel Individualisierung bei der Berechnung von C-Faktoren für Fruchtfolgen auf einzelnen Parzellen. Vom Funktionsumfang her wäre es damit eigentlich gut geeignet für eine WebGIS-Applikation zur individuellen Integration des C-Faktors in die ERK2. Dennoch kann das Tool aus folgenden Gründen nicht für dieses Vorhaben verwendet werden. Das Programm ist nur als ausführbare Windows-Datei (.exe) verfügbar und der Quellcode ist nicht zugänglich. Damit ist es technisch bereits nicht möglich das Programm direkt in eine WebGIS-Umgebung zu implementieren. Während die Dokumentation zum Programm (Mosimann & Rüttimann 2006: D3-D11) gute Informationen zur Datengrundlage liefert, ist die exakte Berechnungsweise nicht bekannt. Mosimann & Rüttimann (2006: D1) geben zwar die ABAG als zugrundeliegendes Erosionsmodell an, doch die technische Umsetzung der Berechnungsweise ist nicht ersichtlich. Aufgrund der fehlenden Transparenz bei Berechnungsweise und Programmcode ist es somit nicht möglich das Tool nachzubilden. Weiter ist das Programm nur für das zentrale Mittelland und nicht für die ganze Schweiz entwickelt worden. Zudem liegen von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) und Schmidt et al. (2016) inzwischen aktuellere und schweizweit gültige Datengrundlagen zur C-Faktor-Berechnung vor. Das Programm ErosionCH eignet sich entsprechend nicht für eine WebGIS-Applikation. In Bezug auf Funktionsumfang und Präsentation (Eingabemaske) dient es jedoch als gutes Vorbild.

In Nordrhein-Westfalen hat die Landwirtschaftskammer mit finanzieller Unterstützung vom Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) ein GIS-gestütztes Erosionsschutzberatungsinstrument namens EMiL (Erosionsmanagement in der Landwirtschaft) auf Basis der ABAG entwickelt (Hiller 2007: 2, 15, 22, 23). Dazu mussten zu allen Faktoren der ABAG für NRW gültige Datensätze erstellt werden, da die Datengrundlage der ABAG auf Feldversuchen in Bayern basiert. Dabei wurden auch NRW-spezifische C-Faktoren für alle wichtigen Kulturen erarbeitet und später durch C-Faktoren verschiedener Gemüsearten ergänzt. Die C-Faktoren liegen für drei Höhenstufen (bis 100m, 100 bis 200m, ab 200m über NN) vor, um regionale Unterschiede in Niederschlags- und Vegetationsbedingungen berücksichtigen zu können. Bei den Bestellverfahren wird in konventionelle Bestellung (Herbst-, Frühjahrsfurche), Mulchsaat und Direktsaat unterschieden (Hiller 2007: 19). Nähere Informationen zum genauen Vorgehen bei der Datenerhebung liegen dem Autor nicht vor. Hiller (2007: 19) listet lediglich die C-Faktoren von Winterweizen, Silomais, Wintergerste, Rüben, Winterraps, Kartoffeln und Hafer für die unterschiedlichen Bodenbearbeitungsverfahren auf. Wie diese

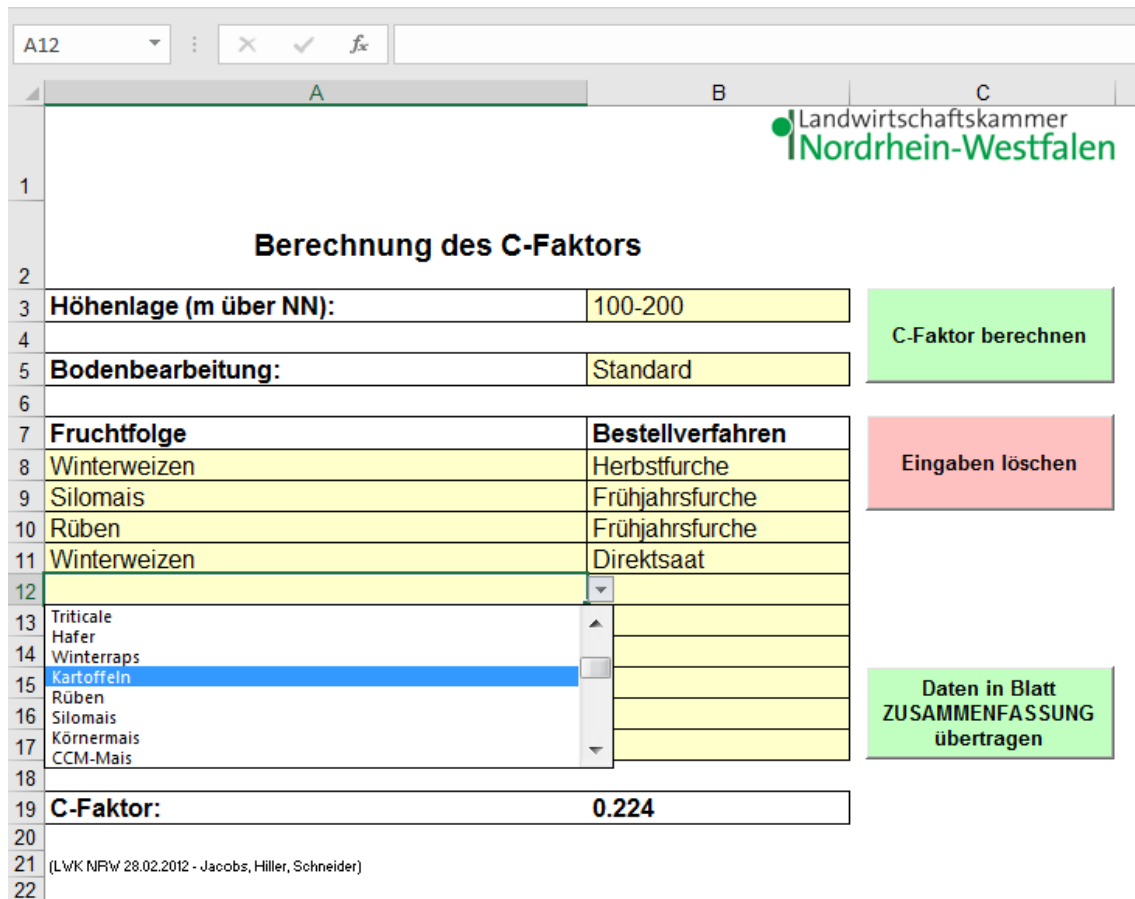


Abbildung 2.11: Screenshot aus der Excel-Anwendung zur Berechnung des C-Faktors der Landwirtschaftskammer NRW (Screenshot, Kupferschmied 2018)

Werte ermittelt wurden wird nicht genannt. Damit auch landwirtschaftliche Berater, die keinen Zugang zu EMiL haben, C-Faktoren von beliebigen Fruchtfolgen auf Basis der NRW-spezifischen Datensätze berechnen können, bietet die Landwirtschaftskammer NRW eine Excel-Anwendung³ zur Berechnung des C-Faktors zum Download an. Abbildung 2.11 zeigt diese Excel-Anwendung, welche 2012 bei der Landwirtschaftskammer NRW von Jacobs, Hiller und Schneider entwickelt wurde. Der Benutzer kann eine Höhenlage auswählen, welche vermutlich die Niederschlagserosivität und den Kulturkalender anpasst (Ann. d. Aut.). Weiter kann für die Bodenbearbeitung über die ganze Fruchtfolge zwischen Standard, günstig und ungünstig gewählt werden. Aus der Literatur geht nicht hervor, wie sich diese Einstellung auf den C-Faktor auswirkt. Beim Bestellverfahren kann dann für jede Kultur zwischen konventioneller Bestellung (Herbst-, Frühjahrsfurche), Mulchsaat und Direktsaat unterschieden werden. Für die Bildung der Fruchtfolge stehen etwas über 20 Kulturen zur Auswahl, die Zwischennutzung im Winter kann jedoch nicht angegeben werden. Es sind Fruchtfolgen bis und mit zehn Jahren möglich. Aus diesen Eingaben wird

³Excel-Anwendung zur Berechnung des C-Faktors von der Landwirtschaftskammer NRW: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/boden/c-faktoren.htm> [20.10.2018]

automatisch der C-Faktor der Fruchtfolge berechnet. Auch dieses Tool eignet sich aus mehreren Gründen nicht für eine WebGIS-Applikation zur individuellen Integration des C-Faktors in die ERK2. Das Tool wurde in Excel mit Makros programmiert und ist nur als Exceldatei (.xls) verfügbar, kann also nicht direkt in eine WebGIS-Umgebung integriert werden. Weder der Programmcode noch die genaue Berechnungsweise sind bekannt und durch diese fehlende Transparenz ist eine Nachbildung des Tools nicht möglich. Die Datengrundlage der Anwendung ist auf NRW ausgelegt und unterscheidet sich mindestens hinsichtlich der Niederschlagserosivität von der Schweiz. Weiter verwendet das Tool laut Hiller (2007: 19) fixe C-Faktoren für einzelne Kulturen. Für die Schweiz sind jedoch RBA-Werte und Kulturkalenderdaten zu den Kulturen sowie die Summenprozentage des R-Faktoranteils bekannt. Diese Datengrundlage ermöglicht die Berechnung individueller C-Faktoren und vereinfacht dadurch auch ein späteres Auswechseln der einzelnen Datensätze in der Berechnung, falls aktuellere Daten verfügbar sein sollten. Zudem fehlt die Möglichkeit Zwischennutzungen anzugeben. Die Excel-Anwendung zur Berechnung des C-Faktors der Landwirtschaftskammer NRW eignet sich entsprechend nicht für eine WebGIS-Applikation zur ERK2.

Die beiden oben vorgestellten Programme zur Berechnung des C-Faktors der ABAG sind die einzigen dem Autor bekannten Tools, welche für die Schweiz von Interesse sind. Beide können aus den dargelegten Gründen nicht direkt für eine WebGIS-Applikation verwendet werden, welche einen individuell berechneten C-Faktor in die ERK2 integriert. Während beide Programme die ABAG als Erosionsmodell verwenden, ist der genaue technische Ablauf der Berechnung des C-Faktors bei beiden nicht bekannt. Aufgrund dieser fehlenden Transparenz bei den existierenden Tools bedarf es für die Entwicklung einer WebGIS-Applikation zur individuellen Integration des C-Faktors in die ERK2 nicht nur einer technischen Lösung in Form eines eigenen C-Faktor-Tools, sondern es muss im Vorfeld auch eine geeignete Berechnungsweise des C-Faktors erarbeitet werden, um ein solches C-Faktor-Tool programmieren zu können. Denn die tabellenbasierte Berechnung mit Erosionsschlüsseln, wie sie die ABAG oder auch der AUI Erosionsrisiko liefern, ist technisch nicht eins zu eins umsetzbar. Das liegt daran, dass ein Computerprogramm einer bestimmten Logik folgt und die vielen Abhängigkeiten der einzelnen Variablen des C-Faktors dabei schnell zum Problem werden (vgl. Kapitel 4.1). Die Erarbeitung einer technischen Berechnungsweise und ihre Operationalisierung in Form eines Programms sind dabei eng miteinander verknüpft. So beeinflussen die Anforderungen an die Berechnung und die verfügbaren Daten die Wahl der Entwicklungsumgebung des Tools. Die Logik und Fähigkeiten der technischen Umgebung bestimmen aber ihrerseits den Aufbau der Berechnungsweise und limitieren die Möglichkeiten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen die nötigen Grundlagen für die Entwicklung einer WebGIS-Applikation zur individuellen Integration des C-Faktors in die ERK2 geschaffen werden. Das bedeutet gestützt auf die oben beschriebenen Erkenntnisse die Erarbeitung einer technisch umsetzbaren und transparenten Berechnungsweise des

C-Faktors und die anschliessende Operationalisierung dieser in Form eines neuen C-Faktor-Tools.

2.3.5 Relevanz und Sensitivität des C-Faktors

Aus obigen Ausführungen zum C-Faktor geht hervor, dass er als einziger dynamischer Faktor der USLE auch der komplexeste ist. Vor allem die vielseitigen Einflüsse der Bewirtschaftung auf den relativen Bodenabtrag machen die Erhebung empirischer RBA-Werte sehr aufwändig und sind für die Erosionsforschung eine grosse Herausforderung. Entsprechend existieren zum C-Faktor vergleichsweise wenig empirische Datensätze und wissenschaftliche Literatur ist sehr begrenzt. Bei der Verwendung der USLE oder ABAG wird für den C-Faktor in der Praxis und der Forschung häufig auf die Standardwerte von Wischmeier & Smith (1978) bzw. Schwertmann et al. (1987) zurückgegriffen. In letzter Zeit gibt es zwar etwas mehr Literatur zum C-Faktor, wobei sich diese aber fast ausschliesslich mit der Abschätzung von C-Faktoren für ganze Fruchtfolgen auf überbetrieblichen Skalen befasst (Panagos et al. 2015; Auerswald 2002; Gabriels et al. 2003) und vermehrt auf rein technische Mittel wie Fernerkundung und GIS anstatt Feldmessungen zurückgreift (vgl. Zhang et al 2011; Durigon et al. 2014; Schönbrodt et al. 2010; Yang 2014; Jain & Kothyari 2000). Während für die Ermittlung der Erosionsgefährdung auf überbetrieblicher Ebene fixe C-Faktoren von typischen Fruchtfolgen i.d.R. ausreichend und auch technische Ansätze genau genug sind, mangelt es an regional gültigen RBA-Werten für die Verwendung auf Betriebsebene. In der Schweiz wurden bspw. nie direkt RBA-Werte empirisch erhoben. Die von Mosimann & Rüttimann (2006) oder Prasuhn (2017, unveröffentlicht) verwendeten Daten wurden ursprünglich von Schwertmann et al. (1987) übernommen und gestützt auf aktuellerer Forschungserkenntnisse zu einzelnen Variablen des RBA und basierend auf Praxiserfahrungen angepasst. Weiter existiert auch keine schweizweite Karte des C-Faktors wie sie für die anderen Faktoren der ABAG vorliegen. Zwar gibt es inzwischen technische Ansätze um solche C-Faktor-Karten auf überregionaler Skala zu erstellen (vgl. Panagos et al. 2015), doch sind diese auf Betriebsebene nicht realisierbar, weil sich die Fruchtfolgen und Anbauverfahren laufend verändern. Diese Dynamik des C-Faktors verhindert die Erfassung eines schweizweiten Datensatzes und ist der Grund, weshalb der C-Faktor in der ERK2 nicht berücksichtigt wird.

Dabei wäre der C-Faktor von grösster Wichtigkeit, wobei seine Relevanz durch zwei Aspekte bestimmt ist. Einerseits verfügt er über eine hohe Sensitivität in der USLE, beeinflusst also das Resultat der ganzen Gleichung gegenüber der anderen Faktoren vergleichsweise stark (Schönbrodt et al. 2010: 842). Auf der anderen Seite ist er in der Praxis des Erosionsschutzes der wichtigste Faktor, weil Veränderungen in der Bewirtschaftung der einfachste Ansatz zur Erosionsminderung sind und der C-Faktor ebendiese abbildet (Panagos et al. 2015: 38; Gabriels et al. 2003: 47). Ein zentraler Vorteil der USLE ist ihre Fähigkeit, die Auswir-

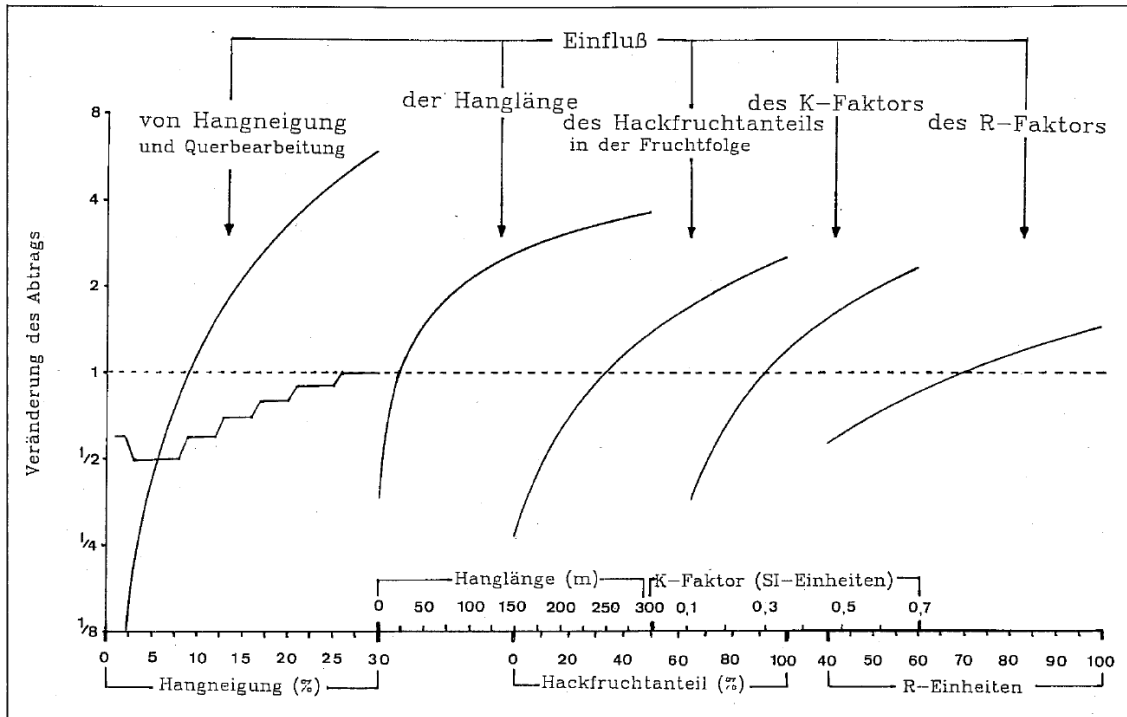


Abbildung 2.12: Sensitivität von verschiedenen Einflussfaktoren der ABAG (Auerswald 1987)

kungen unterschiedlicher Bodennutzung und Bodenbearbeitung auf den zu erwartenden Bodenabtrag aufzuzeigen. (Siebrecht et al. 2009: 5; Prasuhn et al. 2007: 121). Diese Eigenschaft verdankt sie der hohen Sensitivität des C-Faktors. Auerswald (1987) untersuchte den Einfluss der verschiedenen Faktoren der ABAG auf den daraus berechneten Bodenabtrag (Abb. 2.12). Es zeigte sich, dass der C-Faktor neben der Hangneigung die stärkste Auswirkung auf den Bodenabtrag hat. Die Hangneigung hat von allen Faktoren den mit Abstand grössten Einfluss und erhöht den Bodenabtrag im Bereich zwischen 2,5% und 25% Neigung um den Faktor 32 (Auerswald 1987: 37). Der untersuchte Hackfruchtanteil, welcher laut Auerswald (1987: 36) linear in den C-Faktor eingeht, erhöht den Bodenabtrag im Bereich zwischen 0% und 100% Hackfruchtanteil um den Faktor 6. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass sich eine Zunahme des Hackfruchtanteils von 25% auf 50% deutlich stärker auf den Bodenabtrag auswirkt, als eine Zunahme von 50% auf 75% (Auerswald 1987: 36), was der Steigungsverlauf der Kurve vom Hackfruchtanteil in Abbildung 2.12 verdeutlicht. Die Hanglänge ist ebenfalls einflussreich und erhöht den Bodenabtrag im Bereich zwischen 10m und 80m um den Faktor 4, wobei die Zunahme bei Hanglängen über 100m deutlich abflacht (Auerswald 1987: 36). Beim K-Faktor hat vorallem der Bedeckungsgrad durch Steine einen relevanten Einfluss auf den Bodenabtrag, ansonsten ist die Auswirkung eher gering (Auerswald 1987: 37). Den geringsten Einfluss hat der R-Faktor, weil laut Auerswald (1987: 36) die regionalen Unterschiede in der Verteilung der Niederschlagserosivität gering ausfällt. In der RUSLE ist die Sensitivität des C-Faktors sogar noch höher als in der

USLE bzw. ABAG, weil sich die im C-Faktor vereinten Einflüsse der Bewirtschaftung auf den Bodenabtrag dank dem Subfaktoren-Ansatz in der RUSLE noch stärker hervorheben (Siebrecht et al. 2009: 45). Die hohe Sensitivität des C-Faktors gegenüber den anderen Faktoren begründen Toy et al. (1999, zit. in: Tanyas et al. 2015: 587) zudem damit, dass er effektiv Werte zwischen praktisch 0 und 1 haben kann und sich dadurch auf das Resultat der ganzen Gleichung entsprechend stark auswirkt. Neben seiner hohen Sensitivität ist der C-Faktor vor allem in der Praxis des Erosionsschutzes der wichtigste Faktor, weil Veränderungen bei der Bewirtschaftung die einfachste Massnahme zur Erosionsminderung bieten und diese im C-Faktor repräsentiert werden (Toy et al. 1999, zit. in: Tanyas et al. 2015: 586, 587). Durch eine angepasste Bewirtschaftung lässt sich das Erosionsrisiko auf gefährdeten Flächen laut Prasuhn et al. (2014: 75) stark vermindern. Gleichzeitig kann die Bewirtschaftung im Gegensatz zu anderen Faktoren wie der Hangneigung verhältnismässig leicht und ohne grossen baulichen oder finanziellen Aufwand angepasst werden, was den C-Faktor damit zum wichtigsten Faktor für den Vollzug macht (Panagos et al. 2015: 38).

Trotz seiner hohen Bedeutung konnte der C-Faktor bislang aufgrund seines dynamischen Charakters nicht in der ERK2 berücksichtigt werden und ist in dieser lediglich mit dem Standardwert 1.0 für die gepflügte Schwarzbrache vertreten. Aufgrund der hohen Sensitivität führt ein abweichender C-Faktor-Wert allerdings schnell zu einem grossen Fehler in der Berechnung des zu erwartenden Bodenabtrags (Karpilo & Toy 2004, zit. in: Tanyas et al. 2015: 587). Laut Prasuhn et al. (2007: 124) wird dieser von der ABAG für Ackerflächen ohne Berücksichtigung des C-Faktors, bzw. mit dem Standardwert einer Schwarzbrache, um mehr als das Zehnfache überschätzt. Entsprechend gross ist laut der Arbeit von Hänni (2017: 25) der Wunsch von Anwendern der ERK2 den C-Faktor zumindest lokal in diese miteinzubeziehen. Mithilfe einer WebGIS-Applikation könnten individuelle C-Faktoren auf Parzellenebene ermittelt und mit der ERK2 für die untersuchte Parzelle verrechnet werden, um dem Benutzer so das aktuelle Erosionsrisiko auf der Parzelle unter Berücksichtigung der angegebenen Bewirtschaftung anzugeben.

2.4 Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2)

Eine hochaufgelöste, nationale Übersichtskarte der Bodenerosionsgefährdung, wie sie in den europäischen Nachbarländern existierten, fehlte in der Schweiz laut Prasuhn et al. (2007: 120) lange Zeit. Auf Basis der ABAG erstellte Friedli (2006) mithilfe von GIS eine erste digitale Bodenerosionsgefährdungskarte der Schweiz. Diese war im Hektarraaster aufgelöst und dadurch für nationale Übersichtszwecke geeignet. Für den Vollzug war sie jedoch ungeeignet da mit ihr parzellenscharfe Massnahmenpläne aufgrund der groben Hektarauflösung nicht möglich waren (Gisler et al. 2010: 1; Prasuhn et al. 2011: 75). Erst mit der Verfügbarkeit von hochaufgelösten Datensätzen und einem neuen GIS-basierten Erosionsmodell wurde eine schweizweite und gleichzeitig räumlich hoch aufgelöste Erosionsmodellierung möglich.

Im Auftrag des Bundesamts für Landwirtschaft (BLW) entwickelten Gisler et al. (2010) die Erosionsrisikokarte der Schweiz im 2x2-Meter-Raster (ERK2). Mit der ERK2 (Abb. 2.13) sollte auf Basis vorhandener Datensätze eine digitale, hochaufgelöste, anwenderfreundliche und schweizweit einheitliche Erosionsgefährdungskarte für Vollzug und Praxis entstehen, welche vergleichbar mit entsprechenden Karten aus den EU-Ländern ist (Gisler et al. 2010: 3). Die ERK2 soll es einerseits ermöglichen potentiell erosionsgefährdete Flächen zu lokalisieren und andererseits dank der hohen Auflösung von 2x2-Metern auch gleich Ansatzmöglichkeiten für erosionsmindernde Massnahmen aufzeigen. Damit ist die ERK2 als Hilfsmittel für Vollzug und Landwirte gedacht (Gisler et al. 2011: 149). Landwirte sollen durch die ERK2 zudem für die Thematik Bodenerosion sensibilisiert werden (Prasuhn et al. 2014: 75).

Erosionsrisikokarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz (ERK2)

ohne Bergzonen und Sömmerungsgebiete

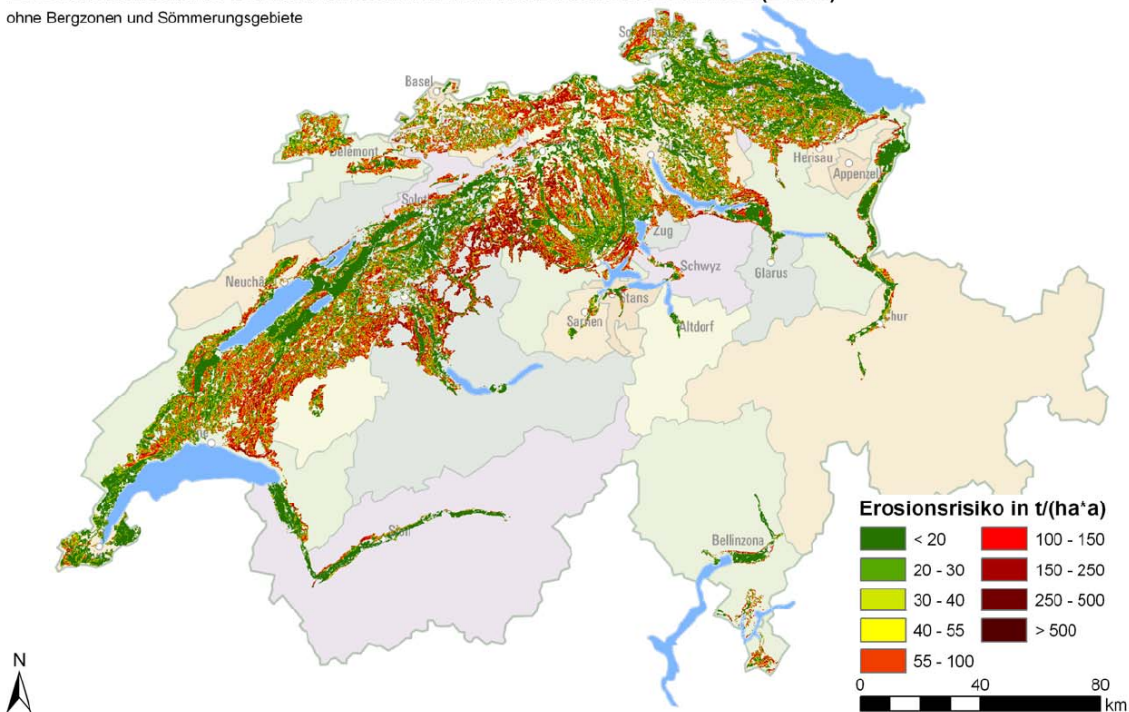


Abbildung 2.13: Erosionsrisikokarte (ERK2) der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Talgebiet der Schweiz (Gisler et al. 2010)

Die ERK2 zeigt anhand der Standortfaktoren Relief, Bodeneigenschaften und Niederschlags-erosivität aber unabhängig von der jeweiligen Landnutzung das potentielle Erosionsrisiko auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in der Schweiz (Gisler et al. 2011: 149). Unter Erosionsrisiko versteht man die theoretisch mögliche Erosion, also den unter bestimmten Umständen zu erwartenden Bodenabtrag. Das potentielle Erosionsrisiko ist dabei die Erosionsgefährdung auf einem nackten und gelockerten Boden, hier eine gepflügte Schwarzbrache (Prasuhn et al. 2011: 75). Mit der ABAG berechnet sich das potentielle Erosionsrisiko folglich aus den Faktoren $R * L * S * K$, also Relief (L, S), Boden (K) und Niederschlag (R).

Erst unter Berücksichtigung der Landnutzung anhand der Bodenbedeckung und Bodenbearbeitung (C-Faktor) ergäbe sich nicht nur das potentielle sondern aktuelle Erosionsrisiko. Die ERK2 zeigt das Erosionsrisiko als den langjährigen mittleren potentiellen Bodenabtrag in Tonnen pro Hektare und Jahr [$t/(ha * a)$] an (Gisler et al. 2011: 152).

Der ERK2 liegt das Erosionsmodell AV-Erosion 1.0 zugrunde, ein auf der MUSLE bzw. ABAG basierendes Modell das als Extension für die GIS-Software ArcView 3.x verfügbar war (Gisler et al. 2011: 149). Zur Berechnung des Bodenabtrags benötigt AV-Erosion folgende Eingabedatensätze (Gisler et al. 2010: 7):

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

Das Schlagraster gibt die zu berechnende Fläche vor und bildet durch Grenzen wie Strassen oder Bäche Fließbarrieren für die Berechnung (Gisler et al. 2010: 10). Für die ERK2 wurde ein Felddblockraster verwendet, welches aus der Vector25-Karte erstellt wurde. Eine Unterscheidung in Acker- und Dauergrünland war dabei technisch nicht möglich (Gisler et al. 2011: 150, 151). Als Höhenmodell verwendet die ERK2 das digitale Terrainmodell von swisstopo DTM-AV mit einer Auflösung von 2x2-Meter und einer Genauigkeit von $\pm 50\text{cm}$ (Gisler et al. 2011: 151). Aus dem Höhenmodell werden die Relief-Faktoren L und S sowie der strukturelle P-Faktor berechnet (Gisler et al. 2010: 10). Das R-Faktorraster wurde ohne Änderungen von Friedli (2006) übernommen (Gisler et al. 2010: 11). Aus der K-Faktorkarte von Friedli (2006) und mit detaillierten kantonalen Bodenkarten wurde das K-Faktorraster erstellt (Gisler et al. 2010: 11). Für den C-Faktor konnte bekanntlich kein schweizweiter Datensatz zur Bewirtschaftung erstellt werden (vgl. Kapitel 2.3.5), weil sich die Fruchtfolgen und Anbauverfahren laufend verändern. Aus diesem Grund ist der C-Faktor in der ERK2 mit der Konstante 1.0 vertreten, was dem Wert einer gepflügten Schwarzbrache entspricht. Somit zeigt die ERK2 eben nicht das aktuelle sondern lediglich das potentielle Erosionsrisiko an (Gisler et al. 2010: 11).

Das Erosionsrisiko wird grundsätzlich in drei Klassen unterteilt, wobei zwischen nicht gefährdeten (gün), wenig (gelb) und stark gefährdeten (rot) Gebieten unterschieden wird. Diese Klassengrenzen und der entsprechende Bodenabtrag (0-30, 30-55, 55+ $t/(ha * a)$) wurden aus der deutschen Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung übernommen (Gisler et al. 2011: 151, 152). Dank der hohen Auflösung des Geländemodells lassen sich besonders stark gefährdete Gebiete, wie Geländemulden, innerhalb einer Parzelle sehr gut erkennen (Gisler et al. 2011: 149). Auf Abbildung 2.14 lassen sich bspw. im oberen rechten Bildausschnitt sehr gut abflussförmige Gefahrenzonen ausmachen, welche durch

den reliefbedingten Verlauf des Oberflächenabflusses bestimmt sind. Eine Einteilung in nur drei Klassen vereinfacht das Bild jedoch zu stark, sodass diese Muster kaum mehr erkennbar sind. Deshalb wurde zusätzlich eine feinere Klassierung mit neun Klassen erstellt, welche die Klassengrenzen farblich beibehält, jedoch für eine bessere Unterscheidung auffächert (vgl. Abb. 2.14). Dadurch werden auf der ERK2 Erosions-Hotspots leicht erkennbar, es sind Ursachenanalysen auf Parzellenebene möglich und sie gibt Hinweise auf mögliche Ansatzstellen für erosionsmindernde Massnahmen (Gisler et al. 2011: 152). Insgesamt deklariert die ERK2 44% der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Talgebiet als erosionsgefährdet, wobei 12% wenig und 32% stark gefährdet sind (Gisler et al. 2011: 153). Allerdings ist dabei zu beachten, dass 38% der Flächen nicht Ackerland sondern Dauergrün- oder Weideland sind und durch die Bodenbedeckung das Erosionsrisiko meist aufgehoben ist. Weiter liegen viele der stark gefährdeten Gebiete am Übergang von Tal- zu Bergzone und somit werden mit hoher Wahrscheinlichkeit gerade diese Gebiete als Dauergrünland genutzt und weisen kein aktuelles Erosionsrisiko auf (Gisler et al. 2011: 153).

Die ERK2 hilft also erosionsgefährdete Flächen zu erkennen und den potentiell möglichen Bodenabtrag zu ermitteln. Damit gibt sie Auskunft zum Schadensausmass auf einer Parzelle, also dem On-site-Schaden. Aus langjährigen Erosionsstudien von Prasuhn (2011, zit. in: Alder et al. 2015: 237) geht jedoch hervor, dass es in 72% aller Erosionsereignisse auch zu Off-site-Schäden kommt und dass 22% der erodierten Sedimentfracht auf direktem oder indirektem Weg in Oberflächengewässer gelangt. Dabei werden die Gewässer mit Nährstoffen wie Stickstoff oder Phosphor aus Düngemitteln und mit Pflanzenschutzmitteln belastet, welche von den Ackerflächen gespült werden.

Allerdings stammen die grössten Stoffeinträge meist nur von einzelnen wenigen Ackerflächen (Frey et al. 2011: 1). Um also die Stoffeinträge zu reduzieren reicht es diese sogenannten 'critical source areas' zu erkennen und Massnahmen wie Pufferstreifen zu implementieren. Dazu wurde auf der ERK2 aufbauend eine Gewässeranschlusskarte (GAK2) erstellt, welche die Anschlusswahrscheinlichkeit von landwirtschaftlichen Nutzflächen an

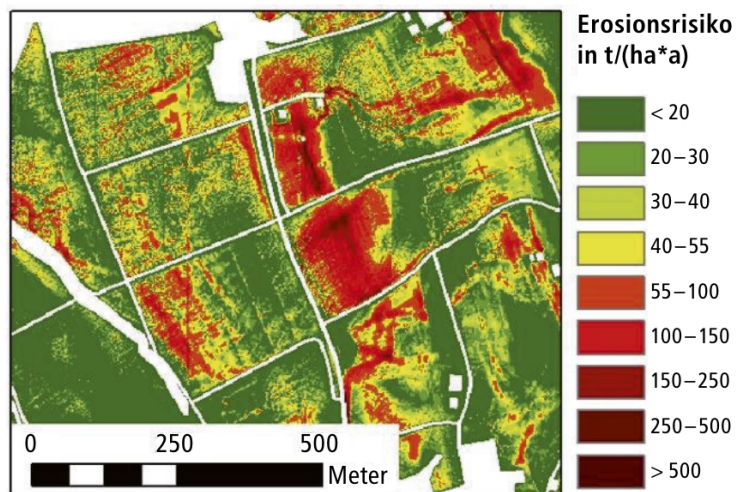


Abbildung 2.14: Detaillierter Ausschnitt aus der ERK2. Erosions-Hotspots sind gut erkennbar und dank des hochaufgelösten Geländemodells sind Geländemulden deutlich auszumachen. (Gisler et al. 2011)

Oberflächengewässer und ihr Risiko für Gewässerbelastungen durch Bodenerosion zeigt (Prasuhn et al. 2014: 76).

Zur Validierung der ERK2 und GAK2 wurde einerseits das Erosionsmodell AV-Erosion mit 10-jährigen Messdaten von Erosionsschadenskartierungen für 203 Parzellen überprüft und bewies besonders für stark gefährdete Gebiete eine gute Übereinstimmung (Prasuhn et al. 2014: 78). Zudem wurden beide Karten bei zahlreichen Feldbegehungen nach Erosionsereignissen von Fachleuten und Landwirten auf ihre Plausibilität überprüft und es zeigte sich, dass sie die Realität dank dem hochaufgelösten Geländemodell sehr gut abbilden (Prasuhn et al. 2014: 78). Das ist für ein Produkt wie die ERK2 wichtig wenn es um deren Akzeptanz bei den Landwirten und Behörden geht.

Inzwischen gibt es für die einzelnen Faktoren der ABAG neue und umfassendere Datensätze und das Erosionsmodell AV-Erosion, auf dem die ERK2 basiert, ist für aktuelle GIS-Umgebungen nicht mehr verfügbar. Entsprechend erteilte das BLW den Auftrag bis 2018 eine neue, aktualisierte und verbesserte ERK2 (ERK2 2018) zu erstellen (Bircher et al. 2017, unveröffentlicht: 4). Die neue ERK2 2018 verwendet die RUSLE als Erosionsmodell und bringt damit einige methodische Verbesserungen gegenüber der alten ERK2. Eine neue Feldblockkarte wurde auf Basis des topographischen Landschaftsmodells TLM3D (Version 1.3, 2015) erstellt (Bircher et al. 2017, unveröffentlicht: 7). Als digitales Geländemodell kommt das SwissALTI3D ebenfalls im 2x2-Meter-Raster zum Einsatz. Daraus wurde der L-Faktor unter Verwendung eines neuen Flow-Algorithmus und der S-Faktor analog zur alten ERK2 berechnet, wobei sich beide Faktoren im Vergleich zur ERK2 nicht relevant verändert haben (Bircher et al. 2017, unveröffentlicht: 9, 11, 14, 23). Die Berechnungsweise des K-Faktors hat sich nicht geändert, doch sind einige zusätzliche Bodenkarten verfügbar. Am Beispiel des Kartenblatts *LK1146 Lyss* ist der neue K-Faktor im Vergleich zur ERK2 um 24% tiefer (Bircher et al. 2017, unveröffentlicht: 15, 16, 23). Für den R-Faktor wird der neue Datensatz von Schmidt et al. (2016) verwendet. Um mit den Faktoren L, S und K übereinzustimmen musste der R-Faktor für die ERK2 2018 neu interpoliert werden. Im Vergleich zur ERK2 liegt der neue R-Faktor generell höher und führt im Mittel zu 20% höheren Bodenabträgen (Bircher et al. 2017, unveröffentlicht: 17, 18, 23). Das potentielle Erosionsrisiko der Schweiz ist in der neuen ERK2 2018 im Mittel um 17% höher als in der alten ERK2, was vor allem auf den deutlich höheren R-Faktor zurückzuführen ist. Allgemein gilt die ERK2 2018 als aktueller und genauer (Bircher et al. 2017, unveröffentlicht: 23, 29).

Der C-Faktor lässt sich jedoch nach wie vor nicht in einem schweizweiten Datensatz erfassen und kann somit auch in der neuen ERK2 2018 nicht direkt integriert werden. Dennoch wäre die Berücksichtigung des C-Faktors, abgesehen von seiner Sensitivität in der RUSLE, gerade für die Analyse von Massnahmeplänen in der Praxis überaus wichtig. Die ERK2 lässt dank ihrem hochaufgelösten Geländemodell zwar gefährdete Stellen innerhalb von Parzellen gut erkennen, bietet aber keine Möglichkeit allfällige Massnahmen in Form von angepasster Bewirtschaftung zu prüfen. Würde der C-Faktor berücksichtigt, könnten

die Auswirkungen einer veränderten Bewirtschaftung direkt in der ERK2 dargestellt werden. Das Fehlen des C-Faktor war denn auch einer der Hauptkritikpunkte und dessen zukünftige Berücksichtigung ein viel genannter Wunsch in einer Studie zur Anwendung der bisherigen ERK2 in der Praxis (Hänni 2017: 24, 25). Entsprechend wurde vom BLW zusätzlich zur Entwicklung der neuen ERK2 2018 ein Nachfolgeprojekt gestartet in dessen Rahmen eine WebGIS-Applikation zur individuellen Integration des C-Faktors in die ERK2 2018 entwickelt wird (Bircher et al. 2017, unveröffentlicht: 29). Dazu wird ein C-Faktor-Tool benötigt mit dessen Hilfe für eine ausgewählte Parzelle der individuelle C-Faktor abhängig von Benutzereingaben zur Fruchtfolge berechnet werden kann. Dieser C-Faktor soll anschliessend automatisch mit der ERK2 für die ausgewählte Parzelle verrechnet werden und dem Benutzer so für diese Fläche das aktuelle Erosionsrisiko anzeigen. Somit könnten Berater und Landwirte verschiedene Szenarien mit unterschiedlicher Bewirtschaftung für individuelle Parzellen berechnen und dadurch geeignete Massnahmen zur Verminderung des Erosionsrisikos identifizieren. Wie in Kapitel 2.3.4.1 erwähnt, müssen für eine derartige WebGIS-Applikation erst die nötigen Grundlagen geschaffen werden. Es wird zuerst eine schweizweit einsetzbare, transparente und technisch umsetzbare Berechnungsweise für den C-Faktor benötigt, welche die aktuellsten verfügbaren Datensätze verwendet und keinen zusätzlichen Daten bedarf. Diese Berechnungsweise muss anschliessend in Form eines C-Faktor-Tools operationalisiert werden, welches sich möglichst direkt in eine WebGIS-Umgebung integrieren lässt. Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit sollen mit der Erarbeitung einer neuen Berechnungsweise des C-Faktors und ihrer Operationalisierung in Form eines C-Faktor-Tools die nötigen Grundlagen für die geplante WebGIS-Applikation zur individuellen Integration des C-Faktors in die ERK2 geschaffen werden.

3 Methoden

3.1 Methodik zur Konzeptionierung der Berechnungsweise des C-Faktors

Das Ausarbeiten einer geeigneten Berechnungsweise des C-Faktors (vgl. Abb. 4.6) war methodisch eine Herausforderung. Den methodischen roten Faden bot das Modell mit den drei Wissenszuständen Systemwissen, Zielwissen und Transformationswissen.

Das Systemwissen beschreibt dabei den Ausgangszustand und befasst sich vor allem mit dem Stand der Forschung. Zur Ausarbeitung einer eigenen Berechnungsweise des C-Faktors war eine fundierte Kenntnis über existierende Berechnungsansätze und die Datenverfügbarkeit nötig. Beides wurde im Rahmen einer ausgiebigen Literatur- und Datenanalyse erarbeitet. Das daraus gewonnene Systemwissen zum C-Faktor ist in Kapitel 2.3 detailliert aufgeführt. Es konnte aufgezeigt werden, dass die meisten Berechnungsansätze sowie die dazu verwendeten Datengrundlagen auf die Forschung zur USLE von Wischmeier & Smith (1978) bzw. in Mitteleuropa besonders auf die Arbeit von Schwertmann et al. (1987) zur ABAG zurückgehen. Die RUSLE bietet mit ihrem Subfaktoren-Ansatz die einzige Alternative zur Ermittlung von C-Faktoren für individuelle Fruchtfolgen auf Betriebsebene. Jedoch sind in der Praxis die Daten zu den zahlreichen Parametern der RUSLE meist nicht vorhanden und es wird auf die USLE/ABAG zurückgegriffen. Die in der Schweiz verfügbaren Datengrundlagen zum RBA und RRA wurden in den Kapiteln 2.3.2 und 2.3.3 bereits aufgearbeitet. Eine vollständige Aufführung und ergänzende Erklärung aller in dieser Arbeit verwendeten Datensätze findet sich im Anschluss in Kapitel 3.1.1.

Das Zielwissen umschreibt die Veränderung im System, welche erreicht werden soll. Dabei stellt sich die Frage nach dem Bedarf und in welchem Rahmen eine Veränderung stattfinden soll. Da diese Arbeit die Grundlagen für eine WebGIS-Applikation zur individuellen Integration des C-Faktors in die ERK2 schaffen will, bilden einerseits die Anforderungen der WebGIS-Applikation und andererseits der Einsatzzweck sowie die Ansprüche und Fähigkeiten der potentiellen Benutzer der Applikation das Zielwissen. Um die Anforderungen einer WebGIS-Umgebung an ein Softwaretool zu kennen, welches in diese integrierbar sein soll, bedurfte es mindestens Grundkenntnissen zur Web-Entwicklung und WebGIS-Entwicklung im Speziellen. Die Aneignung besagter Kenntnisse erfolgte einerseits durch umfangreiche Online-Recherche und mithilfe von gezielt eingeholtem Expertenwissen. Eine grosse Hilfe

waren dabei die Gespräche mit Experten wie Lukas Vonlanthen und Matthias Fries vom Centre for Development and Environment (CDE) der Universität Bern, persönlichen Bekannten wie Aaron Schmocker und Lukas Grimm, sowie die technische Betreuung der Arbeit durch Andreas Heinemann. Andererseits sind neben theoretischem Wissen aus Recherche und Expertengesprächen auch praktische Kenntnisse nötig, um die zahlreichen technischen Details zu berücksichtigen. Gerade ohne Vorkenntnisse in der Web-Entwicklung gibt es für einen Autodidakten viele Aspekte, welche ihm unklar oder nicht bewusst sind, die aber ein Experte oft zu erwähnen vergisst, weil sie vorausgesetzt werden oder in der täglichen Praxis bereits als selbstverständlich betrachtet werden. Die praktischen Grundkenntnisse zur Web-Entwicklung konnten durch ein grosses Angebot an Online-Tutorials geschaffen werden. Besonders hilfreich waren dabei Tutorials zur HTML-Programmierung, Installation und Ausführung eines WebServers mit Apache2 und die Entwicklung einer WebApp mit dem Framework Django. Das Zielwissen bezüglich Einsatzzweck und Benutzerbedürfnisse ging primär aus Gesprächen mit den die Arbeit betreuenden Experten Volker Prasuhn von Agroscope und Hanspeter Liniger sowie Pascal Bircher vom CDE hervor. Denn mit der Vergabe der Masterarbeit existierte bereits eine gute Vorstellung vom angestrebten Produkt. Ein C-Faktor-Tool nach dem Vorbild ErosionCH von Mosimann & Rüttimann (2006) ist gewünscht. Wie in ErosionCH soll der C-Faktor aus wenigen Parametern zur Fruchtfolge automatisch errechnet werden um ein Gleichgewicht zwischen verlässlichen Werten und einfacher Anwendung zu gewährleisten. Das Programm ErosionCH ist auf die Praxis zugeschnitten und erfüllt laut den Experten die Ansprüche von Landwirten sowie Beratern und liefert verlässliche C-Faktoren für individuelle Fruchtfolgen. Es bedarf nun eines Tools mit ähnlichem Funktionsumfang und Bedienung wie ErosionCH aber mit aktuellen, schweizweit gültigen Daten und für WebGIS optimiert. Da der Programmcode und damit die genaue Berechnungsweise von ErosionCH nicht bekannt sind und da dank zusätzlicher Datensätze der Funktionsumfang etwas erweitert werden kann, muss für die Entwicklung eines neuen C-Faktor-Tools eine eigene Berechnungsweise ausgearbeitet werden.

Das Transformationswissen beschreibt wie die Berechnungsweise zu formulieren ist. Es beschreibt somit wie ausgehend vom Systemwissen die definierten Ziele erreicht werden, also durch welche Transformation das System so verändert wird, dass es den Zielvorstellungen entspricht. Für diese Arbeit bedeutet dies konkret wie mit dem Wissen zu verschiedenen Berechnungsansätzen des C-Faktors und unter Verwendung der gegebenen Datengrundlage eine geeignete Berechnungsweise erarbeitet wird, welche die inhaltlichen und technischen Anforderungen an ein neues C-Faktor-Tool erfüllt. Dabei standen die Ausarbeitung der Berechnungsweise und die Entwicklung des Tools in einer Wechselbeziehung gegenseitiger Abhängigkeit. Die Berechnung muss einer technisch umsetzbaren Logik folgen und beeinflusst ihrerseits die Wahl der Ressourcen zur Programmierung, welche wiederum die Logik vorgeben. Entsprechend liefen die Entwicklung von Berechnungsweise und Softwaretool mehrheitlich parallel und nicht aufeinanderfolgend ab. Das Transformationswissen, wie der

C-Faktor zu berechnen und das Tool zu programmieren ist, wurde etappenweise erarbeitet. Das angestrebte Produkt wurde dazu in einzelne Teilprodukte mit zunehmender Komplexität und Funktionsumfang unterteilt. So wurde bspw. zu Beginn mit einem kleinen Testdatensatz eine Datenbank (DB) erstellt und der automatische Zugriff aus einem Script getestet, später die Ermittlung einzelner Variablen des C-Faktors wie Kulturkalender oder RRA erarbeitet und schrittweise ausgebaut, Versuche zum Zugriff über einen Webserver gemacht und am Schluss verschiedene Spezialfälle und die Korrekturfaktoren implementiert. Der Aufbau der Berechnung und des Programms mussten dabei laufend angepasst und umgestellt werden. Wie die Berechnungsweise genau ausgearbeitet wurde ist im Kapitel 4.1 detailliert aufgezeigt und auf die technische Umsetzung in Form des C-Faktor-Tools wird im Kapitel 4.2 näher eingegangen.

3.1.1 Verwendete Datengrundlagen

Die zur Berechnung des C-Faktors verwendeten Datensätze umfassen die Variablen Region, Ackerkultur, Bodenbearbeitung, Zwischennutzung, Kulturkalender, RBA, RRA und die Korrekturfaktoren. Damit eine Berechnung möglich ist, müssen die Daten zu allen Variablen kongruent sein. Das bedeutet bspw., dass zur Verwendung eines bestimmten Bodenbearbeitungsverfahrens für jede Kultur und jeder Kulturperiode die entsprechenden RBA-Werte verfügbar sein müssen. Fehlt die Information an einer Stelle, kann das Verfahren nicht integriert werden. Folglich können die Datensätze nicht ohne Anpassung frei aus der Literatur zusammengestellt werden, sondern es benötigt ein abgestimmtes Datenpaket. Prasuhn (2017, unveröffentlicht) hat im Rahmen des AUI Erosionsrisiko eine aktuelle und schweizweit verwendbare Datengrundlage zur C-Faktor-Berechnung geschaffen (vgl. Kapitel 2.3.2 und 2.3.4). Alle Daten entstammen dabei der Literatur und wurden basierend auf Expertenwissen und Literatur überarbeitet und angepasst. Es wurden keine eigenen Datenerhebungen von Prasuhn (2017, unveröffentlicht: 1) gemacht. Obwohl der AUI Erosionsrisiko nur jährlich berechnet wird, können die Daten zur Berechnung von C-Faktoren mehrjähriger Fruchtfolgen verwendet werden. Für den R-Anteil existieren von Schmidt et al. (2016) aktuelle Daten, welche mit jenen von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) zusammen verwendet werden können. Auf die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Datensätze wird im Folgenden näher eingegangen, wobei die RBA-Werte von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) und die Daten zum R-Anteil von Schmidt et al. (2016) bereits in den Kapiteln 2.3.2 bzw. 2.3.3 behandelt wurden und an dieser Stelle nur kurz erwähnt werden.

Im Kulturkalender (vgl. Anhang A1) sind für 53 Ackerkulturen die Kalenderdaten zu den kulturspezifischen Phasen enthalten. Die daraus gebildeten Kulturperioden gehen auf Wischmeier & Smith (1978) zurück und umfassen folgende sechs Perioden:

- Bodenbearbeitung bis Saatbettbereitung (BB-SB)
- Saatbettbereitung bis 10% Bodenbedeckung durch die Vegetationsdecke (SB-10%)
- 10% bis 50% Bodenbedeckung (10-50%)
- 50% bis 75% Bodenbedeckung (50-75%)
- 75% bis Ernte (75%-E)
- Ernte bis Bodenbearbeitung (E-BB)

Zudem sind für alle 53 Hauptkulturen auch individuelle Kalenderdaten für eine folgende Zwischenkultur vorhanden. Dabei liegen alle Daten für die beiden Regionen Talgebiet und Hügel- bzw. Berggebiet vor (Prasuhn 2017, unveröffentlicht: 4). Die Saat- und Erntetermine wurden mit den AUI-Monitoringdatensätzen der Jahre 2009-2012 aus der Datenerfassungssoftware AGRO-TECH gebildet und sind Mittelwerte dieser Datenreihe. Die Kalenderdaten der dazwischenliegenden Kulturperioden wurden in Anlehnung an Werte von Prasuhn & Grünig (2001, zit. in: Prasuhn 2017, unveröffentlicht: 4), Mosimann & Rüttimann (2006) und Auerswald (o.J., zit. in: Prasuhn 2017, unveröffentlicht: 4) erarbeitet und interpoliert (Prasuhn 2017, unveröffentlicht: 4). Diese Interpolation ist ein wesentlicher Grund dafür, dass zur Berechnung des C-Faktors fixe Kalenderdaten verwendet werden. Reale Anbaudaten sind nur für Bodenbearbeitung, Saat und Ernte bekannt. Könnten diese frei angegeben werden, müssten die Daten der dazwischenliegenden Perioden jeweils abhängig von den Angaben interpoliert werden. Dies ist dem Anwender nicht zumutbar und eine automatisierte Interpolation im C-Faktor-Tool wäre technisch sehr schwer zu programmieren. Zwar hat die Variation der witterungsabhängigen Anbaudaten einen Einfluss auf das Erosionsrisiko von Einzeljahren. Da das Erosionsmodell USLE jedoch den langjährigen gemittelten Bodenabtrag berechnet und nicht die Erosion von einzelnen Jahren oder Ereignissen, wirkt sich die Verwendung von standardisierten Kalenderdaten nicht negativ auf die Berechnung des C-Faktors aus. Für die technische Umsetzung der Berechnungsweise dieser Arbeit wurden die Kalenderdaten umgewandelt in den jeweiligen Tag im Jahr. Dies wurde gemacht um Komplikationen beim Importieren der Daten in die Datenbank und beim Programmieren zu verhindern. Der 1. Januar entspricht der 1 und der 31. Dezember der 366 (Schaltjahr). Zudem mussten ebenfalls aus technischen Gründen für den Zwischennutzungs-Fall *Herbstzwischenfutter vor Schwarzbrache* separate Tabellen erstellt werden, um allfällige Überschneidungen der Kalenderdaten zu verhindern (vgl. Kapitel 4.2.3.6). Insgesamt gibt es sechs Tabellen zum Kulturkalender, wobei drei dem Talgebiet und drei dem Hügelgebiet entsprechen. So gibt es je einen Kalender für die Hauptkulturen, einen für das Zwischenfutter und einen für das Herbstzwischenfutter (Anhang A1).

Als Zwischennutzung zwischen zwei Hauptkulturen stehen bei Prasuhn (2017, unveröffentlicht: 5, 6) sieben verschiedene Fälle zur Auswahl. Die ersten sechs Fälle konnten für

diese Arbeit übernommen werden. Der siebte Fall konnte technisch nicht umgesetzt werden und ein achter Fall musste für die technische Implementierung der Kunstwiese zusätzlich entwickelt werden. Da die Zwischennutzung eine zentrale Variable der angepassten Berechnungsweise ist, werden die verschiedenen Fälle in den Kapiteln 4.2.3.1 bis 4.2.3.8 detailliert erklärt und an dieser Stelle nur kurz eingeführt:

1. Keine Zwischenutzung: Auf die vorhergehende Hauptkultur folgt im Abstand weniger Tage direkt die nächste Hauptkultur. Zum Bsp. Winterweizen nach Zuckerrüben.
2. Stoppelbrache vor Winterhauptkultur: Auf die vorhergehende Hauptkultur folgt für einige Wochen eine Stoppelbrache bevor eine Winterhauptkultur gesät wird. Zum Bsp. Wintergerste nach Winterweizen.
3. Stoppelbrache im Winter: Auf die vorhergehende Hauptkultur folgt über den Winter eine Stoppelbrache bevor eine Sommerhauptkultur gesät wird. Zum Bsp. Kartoffeln nach Zuckerrüben.
4. Schwarzbrache im Herbst und Winter: Auf die vorhergehende Hauptkultur folgt eine Herbstfurche (Pflugeinsatz) und Winterbrache bevor die nächste Hauptkultur gesät wird. Zum Bsp. Zuckerrüben, dann Herbstfurche und Schwarzbrache, dann Kartoffeln.
5. Zwischenkultur abfrierend/winterhart: Auf die vorhergehende Hauptkultur folgt eine Zwischenkultur (5a: abfrierend, 5b: winterhart) bis zur nächsten Hauptkultur. Zum Bsp. Winterweizen, dann Klee gras, dann Zuckerrüben.
6. Herbstzwischenfutter vor Schwarzbrache im Winter: Auf die vorhergehende Hauptkultur folgt eine Zwischenkultur im Herbst bis zum 15. November. Dann erfolgt eine Herbstfurche mit anschliessender Schwarzbrache im Winter bis zur nächsten Hauptkultur. Zum Bsp. Winterweizen, dann Klee gras, dann Herbstfurche und Schwarzbrache, dann Zuckerrüben.
7. Herbstzwischenfutter vor Winterhauptkultur: Auf die vorhergehende Hauptkultur folgt eine Zwischenkultur im Herbst, welche vor dem Winter wieder durch eine Winterhauptkultur ersetzt wird. Zum Bsp. Wintergerste, dann Klee gras, dann Winterweizen. Dieser Fall konnte technisch nicht umgesetzt werden und wurde in dieser Arbeit weggelassen (vgl. Kapitel 4.2.3.7 und 4.2.4).
8. Kunstwiese ganzjährig: Dieser Fall wurde für die technische Implementierung der Kunstwiese in die Berechnungsweise neu entwickelt. Der Fall wird nur gewählt, wenn als vorhergehende Hauptkultur Kunstwiese angegeben wurde, ist dann aber zwingend zu verwenden (vgl. Kapitel 4.2.3.8).

Die verschiedenen Zwischennutzungs-Fälle entsprechen weitgehend jenen von Mosimann & Rüttimann (2006: D2). Zu den abfrierenden Zwischenkulturen gehören Grünmais, Nicht-leguminosen (Gründüngung) und nicht überwinternde Zwischenfuttersorten (Klee gras

und andere). Zu den winterharten Zwischenkulturen zählen Leguminosen, überwinternde Zwischenfuttersorten (Klee gras und andere) sowie der Frühjahrsschnitt vor Wiesenumbruch (Anhang A2.1).

Die Werte zu den relativen Bodenabträgen der Kulturen liegen wie bei Mosimann & Rüttimann (2006: D2) jeweils für die folgenden vier Bodenbearbeitungsverfahren vor:

- Pflugeinsatz
- Pfluglos mit weniger als 30% Mulchbedeckung
- Pfluglos mit Mulchsaat bei über 30% Bodenbedeckung
- Direkt- oder Streifenfrässaat

Zu jedem Verfahren existiert eine Tabelle mit den entsprechenden RBA-Werten (Anhang A2). Dabei sind für jede Kulturperiode aller Hauptkulturen individuelle RBA-Werte vorhanden. Auch für die Perioden von abfrierendem und winterhartem Zwischenfutter sind individuelle Werte aufgeführt. Für Herbstzwischenfutter wurden die Werte von überwinterndem Zwischenfutter verwendet und für die gepflügte Schwarzbrache als Zwischennutzung wird die Konstante 0.32 angegeben. Die RBA-Werte wurden von Mosimann & Rüttimann (2006: D8) übernommen und mit Schwertmann et al. (1987) und Wischmeier & Smith (1978) ergänzt. Für konventionell angebaute Kartoffeln wurden die RBA-Werte gestützt auf Chow & Rees (1994) und Prasuhn et al. (2017) teils drastisch angehoben. So wurden gerade die Werte nach der Saatbettbereitung und nach der Ernte neu sogar auf Werte über dem theoretischen Maximum von 1.0 erhöht, da das Erosionsrisiko aufgrund der intensiven Bodenbearbeitung und geringen Bodenbedeckung höher als jenes der Referenzfläche eingeschätzt wird (vgl. Kapitel 2.3.2 und 2.3.2.1). Für die Kulturperiode SB-10% ist der RBA-Wert von Kartoffeln unter Pflugeinsatz 2.0 und für die Periode E-BB 1.5. Die RBA-Werte von Kartoffeln unter den drei anderen Bearbeitungsverfahren wurden gegenüber Mosimann & Rüttimann (2006) nicht oder nur marginal erhöht. Die Korrekturfaktoren für die Carry-over-Effekte von Kunstwiese, dem Blattfruchtanteil und für Getreide oder Raps nach einer Wurzelfrucht wurden unverändert aus Mosimann & Rüttimann (2006: D6, D7) übernommen (Anhang A4.1).

Die Daten zur Ermittlung des relativen R-Anteils stammen von Schmidt et al. (2016) und liegen in zwei Tabellen jeweils zum Talgebiet und zum Hügel- bzw. Berggebiet vor (Anhang A3). Der R-Anteil wird für jeden Tag im Jahr als kumulatives Summenprozent angegeben. Es kann also für jeden Tag festgestellt werden, wie viel des erosiven Niederschlags bis dato in Prozent am Jahresanteil aufgetreten ist. Die Daten entsprechen den langjährigen Mittelwerten aus insgesamt 87 Messstationen in der Schweiz mit einer durchschnittlichen Dauer der Messreihen von 19.5 Jahren (Schmidt et al. 2016: 4361). In Kapitel 2.3.3 wurde die Datengrundlage des R-Anteils bereits detailliert besprochen.

3.2 Verwendete Ressourcen zur Entwicklung des C-Faktor-Tools

Nachfolgend wird kurz auf die technischen Ressourcen eingegangen, welche zur Entwicklung des C-Faktor-Tools verwendet wurden. Die einzelnen Ressourcen werden hier nicht im Detail vorgestellt, da dies zu umfangreich ausfiel und für die Arbeit nicht direkt relevant ist. Vielmehr soll in Kürze aufgezeigt werden welche Ressourcen zu welchem Zweck und aus welchem Grund eingesetzt wurden. Alle zur Entwicklung des C-Faktor-Tools verwendeten Ressourcen sind entweder Open-source-Software oder mindestens frei verfügbar.

3.2.1 Programmiersprache: Python

Das C-Faktor-Tool wurde mit der Programmiersprache Python in der Version 3.5 entwickelt. Python ist eine weit verbreitete high-level Sprache und kann überaus vielseitig eingesetzt werden (Westra 2013: 7, 8). Python ist mit Blick auf die geplante WebGIS-Applikation besonders interessant, weil Python einerseits häufig zur Entwicklung von Web-Applikationen verwendet wird und dazu sehr gute Frameworks wie Django bzw. GeoDjango existieren. Web-Frameworks sind Softwares, welche die Entwicklung und Verwaltung von Webinhalten stark erleichtern, indem sie viele Funktionen und Services vereinen und repetitive Aufgaben automatisieren. GeoDjango ist ein speziell auf WebGIS ausgelegtes Framework für Python. Von zentraler Bedeutung für die Wahl von Python ist jedoch dessen Verwendung als bevorzugte Scriptsprache in den wichtigen GIS-Softwares wie ArcGIS, QGIS oder GRASS, was Python zur verbreitetsten Programmiersprache unter GIS-Entwicklern macht (Esri, QGIS, GIS Lounge). Der Syntax und die Funktionsweise von Python sind im Vergleich zu ähnlichen Sprachen verhältnismässig einfach gehalten. Allerdings arbeitet Python mit sogenannten *Libraries*, welche den Funktionsumfang bspw. durch zusätzliche Datentypen, Funktionen oder ganze Module ergänzt. Dadurch ist Python relativ einfach zu erlernen aber trotzdem sehr vielseitig und mächtig im professionellen Einsatz. Dank den Libraries kann Python zudem gut an spezifische Einsatzgebiete wie die GIS-Entwicklung angepasst werden (Westra 2013: 8).

Der Autor hat Python in einem Anfängerkurs an der Universität Bern erlernt und die Kenntnisse durch Online-Tutorials autodidaktisch ausgebaut. Der Autor ist jedoch kein professioneller Programmierer und die Möglichkeiten bei der Entwicklung des C-Faktor-Tools waren entsprechend begrenzt. Für die Programmierung des Tools wurde die Entwicklungsumgebung (Integrated Development Environment = IDE) Eclipse in der Version Oxygen2 (4.7.x) mit der Python-Extension PyDev (Version 6.2.0.201711281614) verwendet.

3.2.2 Datenbank: PostGIS

Zur Speicherung der einzelnen Datensätze zur C-Faktor-Berechnung wurde für die Entwicklung des C-Faktor-Tools eine Datenbank erstellt. Da die einzelnen Datensätze innerhalb der Datenbank keine Abhängigkeiten voneinander haben und auch keine komplexen Abfragen der Datenbank gemacht werden müssen, könnte eine beinahe beliebige Datenbank verwendet werden. Da das C-Faktor-Tool allerdings in die geplante WebGIS-Applikation integriert werden soll, müssen deren Anforderungen bei der Wahl der Datenbank berücksichtigt werden. In der WebGIS-Applikation soll aus einer Karte eine bestimmte Fläche auswählbar sein, für diese Fläche der C-Faktor berechnet werden und eine aktualisierte Karte ausgegeben werden. Das bedeutet, dass die Datenbank mit Raumeometrien umgehen können muss, um Flächen aus Karten eindeutig zuordnen zu können. Für solche GIS-Anwendungen existieren spezielle räumliche Datenbanken. Eine der bekanntesten ist PostGIS, eine Erweiterung für die sehr verbreitete relationale Datenbank PostgreSQL. Als Programmiersprache verwendet PostGIS die Structured Query Language (SQL), eine gängige Sprache für relationale Datenbanken. PostGIS kann mit allen wichtigen GIS-Softwares verwendet werden und ist auch in GeoDjango integriert. Weiter unterstützt PostGIS zahlreiche Formate für Geometrien, verfügt über viele räumliche Funktionen und ist dabei sehr flexibel. Entsprechend gilt PostGIS als eine der komplexesten und leistungsstärksten räumlichen Datenbanken überhaupt (Westra 2013: 173). Mit der Verwendung von PostGIS für das C-Faktor-Tool wird für die zukünftige Entwicklung der WebGIS-Applikation grösstmögliche Funktionalität und Flexibilität gewährleistet.

Zur Verwaltung der Datenbank wurde das Programm pgAdmin3 in der Version 1.22.x verwendet, welches eine grafische Benutzeroberfläche für PostgreSQL und PostGIS bietet. Die verwendete PostGIS-Version ist 2.4.4 und ihr zugrunde liegt PostgreSQL in der Version 9.6.10. Für den Zugriff auf die Datenbank aus dem C-Faktor-Tool wurde Psycopg2 mit Version 2.7.3.2 genutzt. Psycopg2 ist ein Adapter um aus Python auf PostgreSQL und PostGIS zugreifen zu können (Westra 2013: 169). So können in einem Python-Script Befehle geschrieben werden, welche Psycopg2 als SQL-Abfragen an die Datenbank leitet und die Datenausgabe für Python wiederum lesbar macht.

3.2.3 Webserver zu Testzwecken: Apache2

Im Verlauf der Arbeit wurde mit einer frühen Version des C-Faktor-Tools ein simples Web-Interface als grafische Benutzeroberfläche des Tools getestet (vgl. Kapitel 4.2.2). Dazu wurde der HTTP Webserver Apache2 in der Version 2.4.18 mit dem Common Gateway Interface (CGI) als Protokoll und die Sprache HTML verwendet. Apache2 wurde nur zu Testzwecken verwendet und im weiteren Verlauf der Arbeit aufgegeben.

3.3 Methodik zur Überprüfung der Plausibilität

Die Plausibilität von C-Faktoren, welche auf Basis der angepassten Berechnungsweise mit dem neuen C-Faktor-Tool berechnet werden, wird anhand von Vergleichen mit zwei ähnlichen C-Faktor-Tools überprüft. Die beiden einzigen Tools, welche für einen solchen Vergleich in Frage kommen, sind das Programm ErosionCH von Mosimann & Rüttimann (2006) und die Excel-Anwendung zur C-Faktor-Berechnung vom GIS-gestützten Erosionsschutzmanagement in der Landwirtschaft (EMiL) der Landwirtschaftskammer NRW (Hiller 2007). Das Web-Tool ABAG interaktiv der LfL ist für den Vergleich aufgrund der fix vorgegebenen Fruchtfolgen nicht geeignet (vgl. Kapitel 2.3.4.1). Während ErosionCH für das Schweizer Mittelland entwickelt wurde und bezüglich Datengrundlage und Funktionsumfang ähnlich zum im Rahmen dieser Arbeit entwickelten C-Faktor-Tool ist, unterscheidet sich das für NRW entwickelte Tool in EMiL hierbei deutlich. Dennoch eignet es sich grundsätzlich zu Vergleichszwecken, da die allen Tools zugrundeliegende ABAG eine gewisse Ähnlichkeit vorgibt. Zudem ist ein Vergleich von drei Tools deutlich robuster, da es durch die Dreiecksbeziehung zu klareren Anhaltspunkten für Referenzwerte kommt. Die Plausibilität von C-Faktoren wird anhand von zwei grundsätzlich verschiedenen Vergleichen überprüft. Einerseits werden in einem systematischen Vergleich die Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftung anhand der Variablen Region, Bodenbearbeitung und Art der Zwischennutzung analysiert. Dieser Vergleich zeigt auch die Sensitivität der verschiedenen Variablen und ihrer Variationen in Bezug auf die C-Faktor-Berechnung auf. Da dieser systematische Vergleich jedoch sehr generisch ist, wird die Praxistauglichkeit des C-Faktor-Tools in einem zweiten Vergleich anhand von realen Fruchtfolgen geprüft. Bei diesem Vergleich kann zudem die Sensitivität von unterschiedlichen Ackerfrüchten auf die C-Faktor-Berechnung analysiert werden.

3.3.1 Methodik des systematischen Vergleichs

Beim systematischen Vergleich wird zuerst eine Referenzfruchtfolge definiert. Diese ist so gewählt, dass sie einem repräsentativen Mix aus Getreide und Hackfrüchten entspricht, ohne dabei Korrekturfaktoren auszulösen. Damit im Rahmen des Vergleichs alle Variationen der einzelnen Variablen möglich sind, ohne dass sich die Fruchtfolge ändern muss, sind insbesondere zwei Einschränkungen zu beachten. Die Fruchtfolge soll nur aus Sommerhauptkulturen bestehen, um alle Zwischennutzungen vergleichbar auf alle Kulturen anwenden zu können. Und um allfällige, durch Variationen entstehende Überschneidungen der Kulturkalenderdaten zu verhindern, werden möglichst wenig verschiedene Kulturen verwendet. Damit keine Korrekturfaktoren ausgelöst werden, muss der Blattfruchtanteil unter 50% liegen, es darf kein Getreide oder Raps auf eine Wurzelfrucht folgen und es darf keine Kultur auf eine Kunstwiese folgen. Die Referenzfruchtfolge besteht entsprechend aus 60% Getreide und 40% Blattfrüchten, wobei diese durch je 20% Körnermais und

Zuckerrüben vertreten sind. Die 10-jährige Referenzfruchtfolge besteht aus den folgenden Hauptkulturen:

1. Sommerweizen
2. Sommerweizen
3. Sommerweizen
4. Körnermais
5. Körnermais
6. Sommerweizen
7. Sommerweizen
8. Sommerweizen
9. Zuckerrüben
10. Zuckerrüben

Als Bodenbearbeitungsverfahren wird für die Referenzfruchtfolge das Pflugverfahren gewählt, da die konventionelle Bodenbearbeitung am verbreitetsten ist. Als Zwischennutzung wird eine Stoppelbrache im Winter verwendet. Anhand dieser Referenzfruchtfolge werden im Rahmen des systematischen Vergleichs einzeln die drei Variablen Region, Bodenbearbeitung und Zwischennutzung variiert. Die Tools weisen dabei teilweise unterschiedliche Optionen auf, welche einen direkten Vergleich nicht immer möglich machen.

Zusätzlich zu den drei Variablen werden beim systematischen Vergleich die Auswirkungen der möglichen Korrekturfaktoren analysiert. Dazu muss die Referenzfruchtfolge allerdings verändert werden, was die Vergleichbarkeit zwischen den Korrekturfaktoren einschränkt. Es werden vier idealisierte Fruchtfolgen generiert, welche die Korrekturfaktoren besonders stark wirken lassen. Untersucht werden die RBA-Erhöhung auf Blattfrüchte bei einem Blattfruchtanteil ab 50%, die RBA-Erhöhung auf Getreide und Raps nach Wurzelfrüchten, die Kombination dieser beiden Faktoren für Raps als Blattfrucht bei hohem Blattfruchtanteil und auf eine Wurzelfrucht folgend, sowie die RBA-Reduktion auf Kulturen nach Kunstwiese.

Ein weiterer systematischer Vergleich wird für eine Fruchtfolge mit hohem Kartoffelanteil gemacht, da die RBA-Werte von Kartoffeln in der vom neuen C-Faktor-Tool verwendeten Datengrundlage (Prasuhn 2017, unveröffentlicht) gestützt auf eine Studie von Chow & Rees (1994) teilweise stark erhöht wurden. Die idealisierte Fruchtfolge besteht aus 60% Sommerweizen und 40% Speisekartoffeln, wobei auf sechs Jahre Getreide vier Jahre Kartoffeln folgen, um das Auslösen von Korrekturfaktoren zu verhindern.

Die Plausibilität von mit dem C-Faktor-Tool berechneten C-Faktoren wird beim systematischen Vergleich anhand der Übereinstimmung mit den C-Faktoren der beiden anderen Tools geprüft. Dazu werden einerseits die Verhältnisse zwischen den C-Faktoren der Tools

überprüft und allfällige Abweichungen aufgrund ihrer Grössenordnung beurteilt. Andererseits wird analysiert inwiefern sich die Verhältnisse der C-Faktoren von variierten Variablen zum jeweiligen C-Faktor der Referenzfruchtfolge bei den Tools unterscheiden. Es werden also sowohl die Werte der einzelnen Variationen unter den Tools wie auch die Verhältnisse der Variationen innerhalb der Tools miteinander verglichen. Ein einheitliches Signifikanzniveau kann für die Vergleiche nicht definiert werden, da die Unterschiede in den Berechnungsweisen der Tools und den verwendeten Datengrundlagen zu gross für eine strenge statistische Auswertung sind. Stattdessen wird jeder Fall einzeln analysiert und allfällige Unterschiede ergründet. Darauf aufbauend wird für jeden Fall eine individuelle Beurteilung der Plausibilität der C-Faktoren gemacht.

3.3.2 Methodik des praxisorientierten Vergleichs

Die generischen Fruchtfolgen vom systematischen Vergleich sind geeignet, um die Plausibilität von Veränderungen beim C-Faktor von unterschiedlichen Variationen der Variablen zu beurteilen. Da sie allerdings nicht realistischen Fruchtfolgen entsprechen, lässt sich mit ihnen nicht zwingend eine Aussage zur Plausibilität von praxisrelevanten C-Faktoren machen. Zu diesem Zweck werden beim praxisorientierten Vergleich sechs reale Fruchtfolgen mit allen Tools gerechnet und die C-Faktoren der Tools für die einzelnen Fruchtfolgen miteinander verglichen. Die sechs Fruchtfolgen entsprechen realen Kulturabfolgen aus dem Berner Mittelland. Es handelt sich um jeweils zehnjährige Fruchtfolgen aus den Jahren 1999-2008. Vereinzelt wurden Fruchtfolgen für den Vergleich leicht angepasst, um etwa die Vergleichbarkeit zwischen den Tools zu verbessern. Für den praxisorientierten Vergleich wurden zwei Fruchtfolgen mit Kartoffelanteil gewählt, um die Auswirkungen der angepassten RBA-Werte von Kartoffeln in der neuen Datengrundlage des C-Faktor-Tools in der Praxis zu beurteilen. Weiter werden die C-Faktoren von zwei Fruchtfolgen mit hohem Blattfruchtanteil verglichen, wobei die eine überwiegend konventionelle und die andere mehrheitlich konservierende Bodenbearbeitungsverfahren aufweist. Eine Fruchtfolge mit hohem Getreideanteil und eine mit langer mehrjähriger Kunstwiese sind ebenfalls Teil des Vergleichs. Diese sechs Fruchtfolgen sind repräsentativ für typische Fruchtfolgen der Schweizer Landwirtschaft und decken einen Grossteil der in der Praxis auftretenden Fälle ab, welche für die Beurteilung von C-Faktoren relevant sind.

Beim praxisorientierten Vergleich werden analog zum systematischen Vergleich in einem ersten Schritt die C-Faktoren der drei Tools für jede Fruchtfolge einzeln miteinander verglichen. Dazu wird jeweils berechnet wie stark die beiden anderen Tools vom C-Faktor-Tool abweichen. In einem zweiten Schritt wird anhand des detaillierten Outputs vom C-Faktor-Tool (vgl. Abb. 4.22) analysiert, welche Kulturen sich wie stark auf den C-Faktor auswirken. Dies erlaubt einerseits eine Aussage zur Sensitivität der verschiedenen Ackerfrüchte bei der C-Faktor-Berechnung und gibt andererseits Aufschluss über die Auswirkungen einzelner

Elemente der Berechnungsweise wie verschiedene Zwischennutzungen oder Korrekturfaktoren. Dadurch lässt sich beurteilen inwiefern die C-Anteile der Kulturen einer Fruchtfolge hinsichtlich RRA- und RBA-Werte realistisch sind und erlaubt eine fundierte Aussage zur Plausibilität des C-Faktors der Fruchtfolge. Gerade bei den beiden Kartoffel-Fruchtfolgen ist dieser Ansatz entscheidend, da für diese der C-Faktor vom C-Faktor-Tool aufgrund der neuen Datengrundlage deutlich höher sein dürfte als bei den beiden anderen Tools. Erst durch die Analyse der C-Anteile aller Kulturen lässt sich beurteilen, ob ein allfällig höherer C-Faktor wirklich durch die Kartoffeln bedingt und die Zunahme plausibel ist.

Die Plausibilität kann auch bei diesem Vergleich nicht streng statistisch mit klarem Signifikanzniveau beurteilt werden, da die Abweichungen zwischen den Tools zu unregelmässig und im Fall der Kartoffeln gewollt sind. Anhand der Verhältnisse der C-Faktoren innerhalb der Tools lässt sich im ersten Schritt beurteilen ob die Berechnungsweisen der Tools grundsätzlich ähnlich sind oder ob es wie im Fall der Kartoffeln merkliche Unterschiede gibt. Durch die Analyse der C-Anteile einzelner Kulturen beim C-Faktor-Tool können allfällige Unterschiede bei den C-Faktoren erklärt und beurteilt werden. Abschliessend können die Fruchtfolgen auch bedingt untereinander verglichen werden. So sollte etwa der C-Faktor der konventionell bewirtschafteten Blattfrucht-Fruchtfolge bei allen Tools höher sein, als jener der Fruchtfolge mit konservierender Bodenbearbeitung. Die Getreide-Fruchtfolge sollte wiederum geringere C-Faktoren aufweisen als jene mit hohem Blattfruchtanteil. Die Erkenntnisse aus dem systematischen Vergleich helfen zusätzlich bei der Beurteilung der Plausibilität der C-Faktoren bezüglich der Auswirkungen von Bodenbearbeitungsverfahren, Zwischennutzungen oder Korrekturfaktoren. Die vielseitigen Ansätze der Vergleichsmethodik resultieren in einem differenzierten Bild des C-Faktors und dessen Verhalten, zumindest für das C-Faktor-Tool. Dadurch wird eine individuelle und verlässliche Beurteilung der Plausibilität vom C-Faktor des C-Faktor-Tools im Vergleich mit den Werten der anderen Tools ermöglicht.

4 Resultate

In der Schweiz fehlt eine passende Berechnungsweise zur Ermittlung von C-Faktoren für individuelle, mehrjährige Fruchtfolgen, welche schweizweit einsetzbar ist, die aktuellsten Datengrundlagen verwendet, transparent und technisch in Form eines Software-Tools operationalisierbar ist. Dies geht unter anderem aus der Problemstellung (Kapitel 1.1) und dem Kapitel 2.3.4.1 zu existierenden Software-Tools für die C-Faktor-Berechnung hervor. Allerdings existiert mit dem Ansatz vom AUI Erosionsrisiko von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) eine tabellenbasierte Berechnungsweise, welche aktuelle und schweizweit verwendbare Daten zur C-Faktor-Berechnung bereitstellt. Die Berechnungsweise vom AUI ist jedoch nicht für mehrjährige Fruchtfolgen geeignet und nicht auf eine technische Operationalisierung ausgelegt. Mit dem Programm ErosionCH von Mosimann & Rüttimann (2006) gibt es ein Software-Tool zur C-Faktor-Berechnung, welches vom Funktionsumfang her in etwa dem benötigten Tool für eine WebGIS-Applikation zur individuellen Integration des C-Faktors in die ERK2 entspricht. Da allerdings weder der Quellcode verfügbar noch die exakte Berechnungsweise mangels Transparenz rekonstruierbar ist, und da die Datengrundlage nicht aktuell und nur auf das Schweizer Mittelland anwendbar ist, kann es nicht für die geplante WebGIS-Applikation verwendet werden. Darum wurde im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit eine angepasste Berechnungsweise für den C-Faktor von mehrjährigen Fruchtfolgen unter Berücksichtigung von Zwischennutzungen und Bodenbearbeitungsverfahren ausgearbeitet, welche auf den aktuellsten Daten basiert, schweizweit einsetzbar und dank transparenter Dokumentation rekonstruierbar ist. Der überarbeitete Berechnungsansatz ist dabei nicht tabellenbasiert sondern wurde in Form eines Software-Tools technisch operationalisiert. Mit der Konzeptionierung einer angepassten Berechnungsweise und deren technischen Operationalisierung durch das dazugehörige C-Faktor-Tool konnten in dieser Arbeit die Grundlagen zur Entwicklung der geplanten WebGIS-Applikation zur individuellen Integration des C-Faktors in die ERK2 geschaffen werden. Im Folgenden wird in Kapitel 4.1 die Auswahl und Überprüfung des geeigneten Modellansatzes und der technischen Ressourcen aufgezeigt bevor in Kapitel 4.2 das Konzept und die Operationalisierung der angepassten Berechnungsweise erklärt werden. In Kapitel 4.3 wird schliesslich die Plausibilität der angepassten Berechnungsweise bzw. des daraus entwickelten C-Faktor-Tools überprüft.

4.1 Auswahl und Überprüfung eines geeigneten Modellansatzes und der technischen Ressourcen

4.1.1 Wahl des Modellansatzes und der technischen Ressourcen

In Kapitel 3.1 wurde beschrieben, dass für die Konzeptionierung einer angepassten Berechnungsweise des C-Faktors der methodische Ansatz von System-, Transformations- und Zielwissen verwendet wurde. Das Systemwissen rund um die Berechnung des C-Faktors, verschiedene Modelle und Ansätze sowie die entsprechenden Datengrundlagen, konnte durch eine ausgiebige Literatur- und Datenanalyse geschaffen werden. Mit dem Zielwissen sind die inhaltlichen und technischen Anforderungen an die angepasste Berechnungsweise und das C-Faktor-Tool bekannt. Durch die Analyse von System- und Zielwissen ergeben sich die Rahmenbedingungen für das Transformationswissen. Der Handlungsspielraum bei der Ausarbeitung einer angepassten Berechnungsweise wird also durch die Datengrundlage und den damit verbundenen Erosionsmodellen genauso bestimmt, wie durch die technischen Anforderungen einer WebGIS-Umgebung oder dem für die Praxis erforderlichen Funktionsumfang des Tools.

Die alte ERK2 von Gisler et al. (2010) basiert auf der USLE bzw. MUSLE, während die neue ERK2 2018 von Bircher et al. (2017, unveröffentlicht) auf der RUSLE aufbaut. Da sich bei den verschiedenen Modellen jedoch nur die Berechnungsweise einzelner Faktoren unterscheidet und die eigentliche Erosionsgleichung unverändert bleibt, ist die Berechnung des C-Faktors dadurch noch nicht auf eines der Modelle beschränkt. Auch wenn die ERK2 2018 auf der RUSLE basiert, kann nach dem USLE-Verfahren ein C-Faktor berechnet und in die Erosionsgleichung der ERK2 2018 integriert werden. Die Struktur der verfügbaren Daten ist für die Wahl des Berechnungsansatzes hingegen entscheidend. Für den komplexen Subfaktoren-Ansatz der RUSLE sind die Daten zu vielen Parametern in der Schweiz nicht auf Betriebsebene verfügbar. Die aktuellste vorhandene Datengrundlage zur C-Faktor-Berechnung stammt von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) und wurde im Rahmen des AUIs Erosionsrisiko erstellt, dessen Berechnungsansatz auf der ABAG basiert. Diese Daten erfüllen die Anforderungen an Aktualität und schweizweite Gültigkeit. Weiter bieten sie die Möglichkeit verschiedene Bewirtschaftungsszenarien zu berücksichtigen, da alle wichtigen Ackerkulturen der Schweiz vertreten sowie Datensätze für unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren und Zwischennutzungen vorhanden sind. Dank Korrekturfaktoren können auch besonders vorteilhafte oder ungünstige Fruchtfolgen entsprechend gewichtet und dadurch hervorgehoben werden. Sogar eine regionale Differenzierung in Tal- und Hügelgebiet ist mit den Daten möglich (vgl. Kapitel 3.1.1). Die aktuellsten Daten zum R-Faktor der Schweiz von Schmidt et al. (2016) können problemlos mit jenen von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) zusammen verwendet werden, da ebenfalls eine Unterscheidung in Talgebiet und Hügel- bzw. Berggebiet möglich ist. Zwar eignet sich die Berechnungsweise

des AUI Erosionsrisiko nicht für mehrjährige Fruchtfolgen und kann nicht direkt für die Entwicklung des C-Faktor-Tools verwendet werden. Die Struktur der Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) ist jedoch an der ABAG orientiert und sollte eine Berechnung des C-Faktors nach dem Verfahren der ABAG von Schwertmann et al. (1987) grundsätzlich ermöglichen (vgl. Abb. 4.1 und 2.9). Ausgehend von der Datengrundlage bietet sich folglich die ABAG als Modellansatz für die überarbeitete Berechnungsweise an. Aber auch der Einsatzzweck und die Anforderungen an das C-Faktor-Tool sind für die Wahl des Berechnungsansatzes wichtig. Der Subfaktoren-Ansatz der RUSLE ist für die praktische Anwendung viel zu aufwändig, da eine grosse Anzahl der Variablen vom Benutzer individuell angegeben werden muss. Die ABAG benötigt dabei lediglich Angaben zur Fruchtfolge wie Kulturabfolge, Bodenbearbeitungsverfahren und allenfalls Zwischenutzung. Die restlichen Variablen wie Kulturperioden, RBA oder RRA können dank dem starren Modell aus einer Tabelle oder Datenbank gelesen werden. Diese Eingaben zur Fruchtfolge sind in einem Programm schnell gemacht und dem Benutzer bekannt. Das Software-Tool ErosionCH von Mosimann & Rüttimann (2006) hat zudem gezeigt, dass sich die ABAG in der Praxis bewährt hat und vor allem technisch mit dem gewünschten Funktionsumfang operationalisierbar ist. Da für die ERK2 ein C-Faktor-Tool nach dem Vorbild von ErosionCH gewünscht ist, liegt ein vergleichbarer Ansatz ausserdem nahe.

Die Anforderungen der WebGIS-Applikation wirken sich nicht direkt auf die Wahl des Modellansatzes aus, sondern sind bei der Ausarbeitung der Berechnungsweise und vor allem bei der Wahl der Ressourcen zur Entwicklung des C-Faktor-Tools von Bedeutung. Für die Entwicklung des Tools wurde die Programmiersprache Python und die räumlich-relationale Datenbank PostGIS gewählt. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben handelt es sich dabei um weit verbreitete Standards in der GIS-Entwicklung generell und der WebGIS-Entwicklung im Speziellen (Westra 2013: 7, 8, 173; GIS Lounge). Mit GeoDjango existiert zudem ein vielseitiges und leistungsstarkes Framework zur WebGIS-Entwicklung, welches auf Python basiert und PostGIS direkt integriert hat. Da allerdings Python und PostGIS etablierte Standards sind und von vielen Programmen unterstützt werden, ist für die Entwicklung der zukünftigen WebGIS-Applikation keine Einschränkung auf GeoDjango sondern eine hohe Flexibilität bei der Wahl der geeigneten Entwicklungsumgebung gegeben. Gleichzeitig hilft jedoch die Orientierung an GeoDjango bei der Entwicklung des C-Faktor-Tools die Anforderungen einer WebGIS-Applikation zu berücksichtigen und gewährleistet dadurch, dass sich das Tool später möglichst ohne Komplikationen in die geplante WebGIS-Applikation einfügen lässt.

Aus den genannten Gründen fällt die Wahl des Modellansatzes für die angepasste Berechnungsweise des C-Faktors auf die ABAG und die Datensätze von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) und Schmidt et al. (2016) bilden die Datengrundlage dazu. Für die technische Operationalisierung in Form des C-Faktor-Tools wird Python als Programmiersprache und PostGIS als räumliche Datenbank gewählt. Um eine möglichst leichte Integration

des Tools in eine zukünftige WebGIS-Applikation zu ermöglichen, orientiert sich die Entwicklung des Tools damit an den grundlegenden Anforderungen des WebGIS-Frameworks GeoDjango.

4.1.2 Überprüfung der Umsetzbarkeit von Modellansatz und Ressourcenwahl

Die Auswahl von Modellansatz und technischer Ressourcen fusst auf Literatur- und Datenanalysen, Onlinerecherchen und -tutorials, sowie Expertenwissen (vgl. Kapitel 3.1). Nun gilt es zu überprüfen, ob die mehrheitlich auf theoretischem Wissen basierende Wahl auch tatsächlich praktisch umsetzbar ist. Dazu wird in einem ersten Schritt versucht die Berechnungsweise der ABAG nach Schwertmann et al. (1987), welche in Kapitel 2.3.4 erklärt ist, mit einem Teil der neuen Datensätze von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) und Schmidt et al. (2016) nachzubilden. Dabei werden die in den neuen Datensätzen zusätzlich verfügbaren Elemente wie die Wahl der Region, die Zwischennutzungen und Korrekturfaktoren bewusst noch nicht berücksichtigt. Zuerst wird die Umsetzbarkeit der herkömmlichen Berechnungsweise der ABAG überprüft, bevor diese inhaltlich und technisch für die Entwicklung eines C-Faktor-Tools angepasst wird. In Abbildung 4.1 ist die C-Faktor-Berechnung nach dem Vorgehen der ABAG schematisch dargestellt. Die Darstellungsweise orientiert sich dabei an der Abbildung 2.9, welche aus Schwertmann et al. (1987) stammt und die Berechnung des C-Faktors beispielhaft aufzeigt. In Abbildung 4.1 sind ausserdem die einzugebenden, abzurufenden und zu berechnenden Daten farblich unterschieden, sowie Abhängigkeiten zwischen und Operationen mit den Daten durch Pfeile aufgezeigt. Dies soll das Vorgehen bei der Berechnungsweise visualisieren und bildet die konzeptuelle Basis für die anschliessende Operationalisierung. Dabei sind die vom Anwender benötigten Informationen zur Berechnung in grün gekennzeichnet. Blau sind Werte, welche abhängig von vorhergehenden Angaben aus einer Tabelle bzw. Datenbank abgerufen werden. Werte, die im Verlauf des Vorgehens berechnet werden sind violett markiert. Im Folgenden wird kurz auf den Ablauf der Berechnung und die einzelnen Abhängigkeiten zwischen den Daten eingegangen.

Zur Berechnung des C-Faktors wird zu Beginn die Fruchtfolge als Abfolge verschiedener Ackerkulturen definiert. Dabei wird jeder Kultur auch ein entsprechendes Bodenbearbeitungsverfahren zugeteilt. Aus dem Datensatz des Kulturkalenders können anschliessend für jede Kultur die Kalenderdaten aller Kulturperioden ausgelesen werden. Bei tabellenbasierten Berechnungsweisen werden die Werte von Hand ausgelesen, bei einem Software-Tool sind die Werte in einer Datenbank gespeichert und werden vom Programm abgefragt. Besonderes Augenmerk gilt hier der letzten Kulturperiode jeder Ackerkultur, welche der Phase zwischen der Ernte der einen und der Bodenbearbeitung der darauffolgenden Kultur entspricht. Um diese Periode bilden zu können, muss entsprechend das Datum der Bodenbearbeitung von der folgenden Kultur herangezogen werden. Dieser Umstand ist später bei der Entwicklung des C-Faktor-Tools von entscheidender Bedeutung und wird

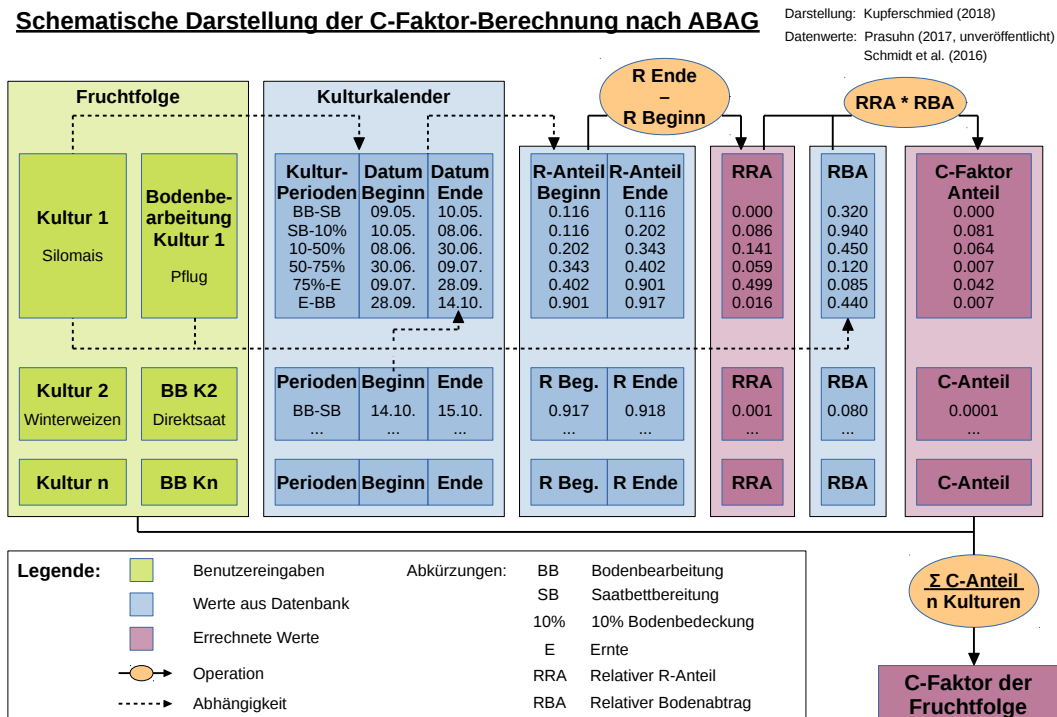


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der C-Faktor-Berechnung nach dem Vorgehen der ABAG (Kupferschmied 2018)

dann wieder aufgegriffen. Zu den Kalenderdaten der Perioden werden nun die jeweiligen R-Anteile abgerufen. Aus der Differenz des R-Anteils am Ende einer Periode zu jenem am Beginn wird der relative R-Anteil (RRA) der entsprechenden Kulturperiode berechnet. Der relative Bodenabtrag (RBA) ist für jede Kulturperiode auszulesen und wird durch die gewählte Ackerkultur und dazugehörige Bodenbearbeitung bestimmt. Das Produkt aus RRA und RBA ergibt dann den C-Faktor-Anteil der jeweiligen Kulturperiode. Zur Berechnung des C-Faktors der gesamten Fruchtfolge werden alle C-Anteile aufsummiert und durch die Anzahl Jahre der Fruchtfolge geteilt. Es zeigt sich also, dass mit den Datensätzen von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) und Schmidt et al. (2016) eine Berechnung nach dem Vorgehen der ABAG möglich ist und alle benötigten Daten vorhanden sind. Im nächsten Schritt wird nun versucht diese einfache Berechnungsweise der ABAG zu operationalisieren, um zu überprüfen inwiefern die gewählten technischen Ressourcen hierfür geeignet sind.

Dazu wird eine PostGIS-Datenbank mit einem kleinen exemplarischen Testdatensatz mit Daten zu einigen Kulturen erstellt. In einem Python-Script wird versucht das Vorgehen der Berechnungsweise so zu formulieren, dass die Berechnung automatisch abläuft. Nach einigen verschiedenen Versuchen ist ein funktionierender Ansatz gefunden, welcher in der Form weitgehend auch für die finale Version des C-Faktor-Tools beibehalten werden konnte. Dieser grundsätzliche technische Ansatz und das Vorgehen der Programmierung des Tools wird im

Folgenden kurz erklärt ohne dabei zu sehr auf Details der Berechnungsweise einzugehen. In Kapitel 4.2 wird dann die angepasste Berechnungsweise mit allen Elementen der Berechnung anhand der finalen Version des C-Faktor-Tools genauer aufgezeigt. Die Abbildungen 4.2 bis 4.4 zeigen einzelne Ausschnitte aus dieser ersten Testversion des Scripts zur C-Faktor-Berechnung nach dem ABAG-Verfahren und veranschaulichen das technische Grundprinzip.

```

22 #·Definition·der·Kulturen
23 k1·=·29·...·#·Silomais·hat·KNr·29
24 k2·=·7·...·#·Winterweizen·Standard·hat·KNr·7
25 k3·=·26·...·#·Zuckerrüben·haben·KNr·26
26
27 #·Erstellen·der·Fruchtfolge
28 ff·=·[k1,·k2,·k3]
29
30 #·Angabe·der·Bodenbearbeitung
31 bb_k1·=·'pflug'
32 bb_k2·=·'pflug'
33 bb_k3·=·'pflug'

```

Abbildung 4.2: Scriptausschnitt aus der C-Faktor-Berechnung nach ABAG: Manuelle Benutzereingabe (Kupferschmied 2018)

Die Benutzereingaben zur Fruchtfolge und Bodenbearbeitung werden im Script manuell als Variablen definiert (Abb. 4.2, Zeilen 22-33). In der Datenbank hat jede Kultur eine eindeutige Kulturnummer als ID erhalten. Mit den Nummern aller eingegebenen Kulturen wird eine Liste kreiert, welche der Fruchtfolge entspricht (Abb. 4.2, Zeile 28). Über diese Liste können in der Berechnung kulturspezifische Werte aus

der Datenbank gelesen werden. Damit das Python-Script eine Abfrage an die Datenbank schicken und die erhaltenen Daten lesen kann, wird eine Python-Library mit dem SQL-Adapter Psycopg2 benötigt und im Script geladen (Abb. 4.3, Zeile 4). Durch Psycopg2 kann sich ein Python-Script mit einer Datenbank verbinden (Abb. 4.3, Zeilen 6-15), in SQL formulierte Queries an diese schicken (Abb. 4.4, Zeilen 40-45, 55) und die erhaltenen Daten können wiederum für Python lesbar ausgegeben werden (Abb. 4.4, Zeilen 55-58). Als Query wird eine Abfrage der Datenbank bezeichnet und SQL ist die Sprache in welcher solche Queries für PostGIS formuliert sein müssen (vgl. Kapitel 3.2.2). In einem ersten Schritt der Berechnung werden für jede eingegebene Kultur die Kalenderdaten der einzelnen Kulturperioden aus der Datenbank abgefragt (Abb. 4.4, Zeilen 40-58). Da das Programmieren mit dem Datentyp *Datum* zu Problemen führte, wurden alle Kalenderdaten in den jeweiligen Tag im Jahr umgewandelt und so in der Datenbank gespeichert. Der 1. Januar entspricht dabei der Zahl 1 und der 31. Dezember der Zahl 366 (vgl. Anhang A1.7), da die R-Anteile aufgrund der Schaltjahre in der Messreihe für 366 Tage vorhanden sind. Das sechste und letzte ausgelesene Datum von jeder Kultur entspricht jeweils dem Erntedatum (vgl. Anhang A1.1, A1.2 und Abb. 4.4, Zeile 42). Die sechste und letzte Kulturperiode einer jeden Kultur ist allerdings die Phase zwischen der Ernte der entsprechenden Kultur und der Bodenbearbeitung der Folgekultur. Um diese sechste Periode bilden zu können, muss dem Kulturkalender jeder Kultur folglich ein siebtes Datum für die Bodenbearbeitung der nächsten Kultur angehängt werden. Die letzte Kultur der Fruchtfolge erhält dabei das

```
1 #!/usr/bin/python3.5
2
3 # importiere psycopg2
4 import psycopg2
5
6 # Versuch eine Verbindung mit der Datenbank herzustellen
7 try:
8     connect_str = "dbname='gisdb' user='paddy' host='localhost' .+ \
9     ..... "password='master'"
10    conn = psycopg2.connect(connect_str)
11 except:
12    print("Connection Error: Invalid dbname, user, host or password.")
13
14 # Definition des Cursors von Psycopg2 um Queries auszuführen
15 cursor = conn.cursor()
16
```

Abbildung 4.3: Scriptausschnitt aus der C-Faktor-Berechnung nach ABAG: Verbindung zur Datenbank durch Psycopg2 (Kupferschmied 2018)

Bodenbearbeitungsdatum der ersten Kultur, um eine Fruchtfolge mit ganzen Jahren zu erhalten, was für die korrekte Berechnung des C-Faktors wichtig ist. Dies ist technisch nicht ganz trivial. Das Python-Script erkennt die Position in einer Liste, welche gerade verarbeitet wird, anhand eines Index. Indices entsprechen hier einer fortlaufenden Nummerierung der Objekte einer Liste und beginnen beim ersten Element mit dem Index 0. Wenn die aktuell vom Script verarbeitete Kultur in der Fruchtfolge-Liste den Index x hat, so kann die darauffolgende Kultur über den Index $x + 1$ angesteuert werden. In diesem Fall geht der Index bei der letzten Kultur jedoch über die Liste hinaus, was im Programm einen Fehler ergibt. Dazu muss der Index für die letzte Kultur wieder zurückgesetzt werden, um das Bodenbearbeitungsdatum der ersten Kultur zu finden. In dieser frühen Version des Programms ist dieses Problem noch nicht automatisiert gelöst und die fehlenden Daten für die Bodenbearbeitung der Folgekultur werden noch durch manuell gesetzte Indices angehängt (Abb. 4.4, Zeilen 60-64). Das Ergebnis dieses Codes ist eine Liste aus Listen. Das bedeutet das Programm erstellt zuerst eine Liste für den Kulturkalender (Abb. 4.4, Zeile 48), welche wiederum für jede darin enthaltene Kultur der Fruchtfolge eine Liste mit den jeweiligen Kalenderdaten der Kulturperioden enthält (Abb. 4.4, Zeilen 57-58). In Abbildung 4.5 ist ein Teil des Outputs vom Test-Script für eine dreijährige Fruchtfolge bestehend aus Silomais (Nr. 29), Winterweizen (Nr. 7) und Zuckerrüben (Nr. 26) zu sehen. Für jede Kultur, K1 bis K3, existiert eine Liste mit den Kalenderdaten als Zahlen für den entsprechenden Tag im Jahr, wobei das letzte Datum jeweils dem ersten Datum der Folgekultur entspricht. Aus diesen drei Listen besteht die Liste des Kulturkalenders der Fruchtfolge, welche darunter abgebildet ist. Jedes Element kann darin über zwei Indices eindeutig angesteuert werden, wobei der erste Index die Kultur bzw. das Jahr bestimmt und über den zweiten Index ein beliebiges Datum innerhalb dieser Kultur angegeben

```

36 #=====
37 #·Kulturkalender
38 #=====
39
40 query_kk.=. ""
41 .....SELECT·"KK_HK_Tal_BB",·"KK_HK_Tal_S",·"KK_HK_Tal_10",·
42 ..... "KK_HK_Tal_50",·"KK_HK_Tal_75",·"KK_HK_Tal_E"
43 .....FROM·"KK_HK_Tal"·as·kkhk
44 .....WHERE·kkhk."KK_HK_Tal_Knr"·=·%s
45 ..... ""
46
47 #·Erstelle·leere·Liste·kk_
48 kk_ff.=. []
49
50 #·Liest·für·jede·Kultur·die·Daten·der·Kulturperioden·über·die·
51 #·entsprechende·Kulturnummer·in·der·Fruchtfolge·(ff)·als·ID·aus
52 #·der·Datenbank,·macht·daraus·eine·Liste·kk_jahr·für·jede·Kultur
53 #·und·hängt·diese·dem·Kulturkalender·in·der·äusseren·Liste·kk_ff·an.
54 for·k·in·ff:
55   ....cursor.execute(query_kk,·[k])
56   ....for·record·in·cursor:
57     .....kk_jahr.=·list(record)
58     .....kk_ff.append(kk_jahr)
59
60 #·Vervollständigt·jeweils·die·letzte·Kulturperiode·E-BB·mit·dem
61 #·Datum·der·Bodenbearbeitung·der·Folgekultur.
62 kk_ff[0].append(kk_ff[1][0])
63 kk_ff[1].append(kk_ff[2][0])
64 kk_ff[2].append(kk_ff[0][0])
65

```

Abbildung 4.4: Scriptausschnitt aus der C-Faktor-Berechnung nach ABAG: Erstellung des Kulturkalenders (Kupferschmied 2018)

werden kann. Dadurch ist es nun möglich mit dieser Liste vom Kulturkalender für jedes einzelne Datum den entsprechenden R-Anteil aus der Datenbank zu lesen. Das Vorgehen dabei ist ähnlich zu jenem der Kulturkalendererstellung. Mit Psycopg2 wird die Datenbank über eine Query abgefragt, wobei die Argumente zur Abfrage diesmal nicht die Kulturnummern in der Fruchtfolge-Liste sondern die Daten aus der Kulturkalender-Liste sind. Die R-Anteile werden analog zum Kalender kulturweise in Listen geschrieben, welche in einer Liste für die gesamte Fruchtfolge zusammengefasst werden. Aus diesen R-Anteilen werden nun, wie bei Abbildung 4.1 aufgezeigt und beschrieben, die Differenzen gebildet, um den relativen R-Anteil (RRA) von jeder Kulturperiode für jede Kultur der Fruchtfolge zu erhalten. Anschliessend werden zu jeder Kultur über die Kulturnummern die RBA-Werte aus der Datenbank gelesen. Das Vorgehen ist dabei grundsätzlich analog zur Erstellung des Kulturkalenders, wobei die Benutzerangaben zum Bodenbearbeitungsverfahren (Abb. 4.2, Zeilen 31-33) bestimmen, auf welche Tabelle in der Datenbank zugegriffen wird. Zu den verschiedenen Verfahren liegen in der Datenbank unterschiedliche RBA-Werte für jede

Kultur vor (vgl. Anhang A2). Bei der hier vorgestellten Testversion kommt der Einfachheit halber jedoch nur eine Tabelle mit den Werten zum Pflugverfahren zum Einsatz. Um den C-Faktor der Fruchtfolge zu erhalten werden nun die RRA- und RBA-Werte der jeweiligen Listen miteinander multipliziert, die daraus resultierenden C-Faktor-Anteile aufsummiert und durch die Anzahl Jahre geteilt. Da die Anzahl Jahre nirgends explizit angegeben wird, kann die Anzahl Kulturen in der Fruchtfolge-Liste dazu verwendet werden, welche identisch ist.

```
OUTPUT:
Fruchtfolge:
-----
Kultur  1 :   29
Kultur  2 :    7
Kultur  3 :   26

Kulturkalender:
-----
KK  1 :   [130, 131, 160, 182, 191, 272, 288]
KK  2 :   [288, 289, 342,  88, 102, 211,  81]
KK  3 :   [ 81,  82, 131, 164, 180, 294, 130]

KK Liste:  [[130, 131, 160, 182, 191, 272, 288], [288, 289, 342, 88, 102, 211, 81], [81, 82, 131, 164, 180, 294, 130]]
```

Abbildung 4.5: Outputausschnitt vom Script der C-Faktor-Berechnung nach ABAG mit dem Kulturkalender für eine dreijährige Fruchtfolge (Kupferschmied 2018)

Im Rahmen der Überprüfung dieser Operationalisierung der ABAG-Berechnungsweise wird die Berechnung für einige Fruchtfolgen jeweils mit dem Script und zusätzlich manuell mit dem tabellenbasierten Vorgehen der ABAG (vgl. Kapitel 3.1.1) gemacht und die Zwischenresultate miteinander verglichen. Die Übereinstimmung der Ergebnisse beweist, dass die ABAG mit dem verwendeten Testdatensatz auf Basis der Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) und Schmidt et al. (2016) und mit den technischen Mitteln Python und PostGIS grundsätzlich zu operationalisieren ist. Es zeigen sich aber auch erste Herausforderungen bei der technischen Umsetzung der Berechnungsweise, welche durch Abhängigkeiten zwischen den Kulturen entstehen. Mit Blick auf Abbildung 4.1 lässt sich erkennen, dass aufeinander aufbauende oder vererbende Abhängigkeiten zum Beispiel innerhalb einer Kultur technisch gut umsetzbar sind, weil sie damit der ebenfalls aufbauend gestalteten Logik des Scripts folgen. Dazu zählt bspw. dass die Ackerkultur die Daten des Kulturkalenders bestimmt und aus diesen wiederum die R-Anteile abgeleitet werden. Problematisch sind hingegen rückbezügliche Abhängigkeiten zum Beispiel zwischen den Kulturen. Dies zeigt sich anhand des zur Vervollständigung der jeweils letzten Kulturperiode benötigten Datums der Bodenbearbeitung von der Folgekultur. Das Problem bei der Programmierung ist hierbei, dass der im Script enthaltene Code einmal der Reihe nach ausgeführt wird. Es ist folglich nicht möglich an einer Stelle im Script einen Wert weiter oben im Code zu ändern. Für jede solche rückwirkende Abhängigkeit muss die Berechnung folglich angepasst und in einzelne Schritte unterteilt werden. Das Ansteuern gezielter Werte über Indices macht dies zwar grundsätzlich möglich, ist aber über die Listengrenzen hinaus kompliziert zu bewerkstelligen. Je mehr rückbezügliche Abhängigkeiten

sich dabei überschneiden, desto komplexer wird die Programmierung. Dies bedeutet, dass zur Operationalisierung gewisse Anpassungen bei der Berechnungsweise nötig sind. Das tabellenbasierte Vorgehen kann also nicht direkt auf ein Software-Tool angewendet, sondern muss an die Logik des Programms angepasst werden.

4.2 Konzeptionierung und Operationalisierung einer angepassten Berechnungsweise des C-Faktors

Die Überprüfung vom Modellansatz und der technischen Ressourcen hat gezeigt, dass es zur Entwicklung eines C-Faktor-Tools aus technischen Gründen einer angepassten Berechnungsweise des C-Faktors bedarf. Die neue Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) und Schmidt et al. (2016) liefert allerdings zusätzliche Datensätze zur Berücksichtigung von regionalen Unterschieden, Zwischennutzungen und Korrekturfaktoren. Diese neuen Daten erlauben eine vielschichtigere Differenzierung der Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungen auf das Erosionsrisiko und sollen in der geplanten WebGIS-Applikation verwendet werden. Die Implementierung dieser Daten erfordert ebenfalls eine Überarbeitung des herkömmlichen Vorgehens zur C-Faktor-Berechnung von Schwertmann et al. (1987). Im Folgenden wird die inhaltliche und technische Anpassung der Berechnungsweise des C-Faktors im Detail erläutert. Dabei wird zuerst das generelle Konzept aufgezeigt bevor die einzelnen Berechnungsschritte anhand des entwickelten C-Faktor-Tools erklärt werden.

4.2.1 Konzept der angepassten Berechnungsweise des C-Faktors

Auf Abbildung 4.6 ist das Konzept der angepassten Berechnungsweise des C-Faktors schematisch dargestellt. Beim Vergleich mit Abbildung 4.1, welche die Berechnungsweise der ABAG nach Schwertmann et al. (1987) schematisch aufzeigt, fallen besonders die zusätzlichen Elemente Region, Zwischennutzung und Korrekturfaktoren auf. Das generelle Prinzip der C-Faktor-Berechnung durch RRA und RBA hat sich indes nicht geändert. Es gilt zu betonen, dass diese angepasste Berechnungsweise die ABAG als Modellansatz verwendet und ihr gegenüber keine neue Methode im Sinne des Subfaktoren-Ansatzes der RUSLE darstellt. Stattdessen wird das Vorgehen der ABAG inhaltlich überarbeitet, um die zusätzlichen Elemente der neuen Datengrundlage miteinzubeziehen und technisch angepasst, damit sie in Form eines automatisierten Software-Tools operationalisiert werden kann.

In Abbildung 4.6 werden Benutzereingaben, aus der Datenbank gelesene und vom Programm errechnete Werte farblich unterschieden. Die vom Anwender benötigten Eingaben sind grün dargestellt und umfassen Angaben zur Fruchtfolge sowie die Auswahl einer Region. Die Fruchtfolge besteht neu nicht nur aus einer Ackerkultur pro Jahr, sondern aus einer als Hauptkultur bezeichneten Ackerfrucht und einer darauf folgenden Zwischennutzung. Sowohl für die Hauptkultur wie auch für die Zwischennutzung kann ein entsprechendes Bodenbearbeitungsverfahren angegeben werden. Die Form der Zwischennutzung bestimmt die Anzahl Kulturperioden eines Jahres, während die entsprechenden Kalenderdaten durch die Hauptkultur definiert sind. Die Kalenderdaten hängen zudem von der gewählten Region ab. Bei der Datenbankabfrage bestimmt die Region auf welche Kulturkalendertabelle zugegriffen wird und über die Kulturnummer der Hauptkultur werden die entsprechenden Kalenderdaten ausgelesen. Auch die R-Anteile sind von der Wahl der Region abhängig. Je nach Region wird auf eine andere Tabelle zugegriffen, um die R-Anteile zu den Kulturkalenderdaten abzufragen. An der Berechnung vom RRA ändert sich gegenüber der ABAG nichts. Die RBA-Werte der Hauptkultur werden ebenfalls wie bei der ABAG durch die Ackerfrucht und das Bodenbearbeitungsverfahren ermittelt. Die RBA-Werte für die Periode(n) zwischen zwei Hauptkulturen werden neu über die Wahl der Zwischennutzung und der entsprechenden Bodenbearbeitung bestimmt. Je nach dem wie die Fruchtfolge zusammengesetzt ist, werden bestimmte RBA-Werte noch mit Korrekturfaktoren verrechnet. Nach dieser Korrektur werden aus den RBA- und RRA-Werten nach dem Vorgehen der ABAG die C-Faktor-Anteile der Kulturperioden und daraus schliesslich der C-Faktor der Fruchtfolge berechnet. Im Folgenden werden die einzelnen Berechnungsschritte anhand des C-Faktor-Tools aufgezeigt. Dazu wird zuerst kurz die technische Struktur des C-Faktor-Tools erläutert.

4.2.2 Technische Grundstruktur und Verfügbarkeit des C-Faktor-Tools

Die in der Testversion des C-Faktor-Tools zur Operationalisierung der ABAG nach Schwertmann et al. (1987) ausgearbeitete technische Struktur kann auch in der finalen Version des C-Faktor-Tools, welche auf der angepassten Berechnungsweise basiert, weitgehend beibehalten werden (vgl. Kapitel 4.1.2). Da die in der Datenbank (DB) gespeicherten Datensätze untereinander keine Relationen aufweisen, wird auch keine komplexe Datenbankstruktur benötigt. Die DB ist lediglich eine tabellarische Ablage der Datensätze. Durch die Wahl von PostGIS ist das Tool jedoch für eine zukünftige WebGIS-Entwicklung gerüstet und kann Raumgeometrien wie Polygone in Karten und Datenrelationen handhaben. Die Kommunikation zwischen dem Python-Script und der Datenbank geschieht wie in der Testversion über den SQL-Adapter Psycopg2 (vgl. Kapitel 4.1.2 und Abb. 4.3). Das Programm selbst ist in einem einzelnen Python-Script geschrieben. Dies bringt einige bewusst abgewogene Vor- und Nachteile mit sich. Das Script kann in einem beliebigen Texteditor editiert und über eine Shell ausgeführt werden, sofern auf dem System Python 3.5 installiert ist.

Damit ist das Programm unabhängig vom Betriebssystem einsetzbar und ermöglicht direkte Anpassungen am Code. Neben Python muss auf dem System allerdings auch die DB vorhanden sein, welche aktuell manuell aufgesetzt werden muss. Auch existiert zum Tool bislang keine graphische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface = GUI). Alle Benutzereingaben werden folglich direkt im Script getätigt. Zwar wurde für die Testversion des Tools mithilfe des Webservers Apache2,

dem Protokoll CGI und der Sprache HTML eine einfache, lokal lauffähige Web-Anwendung entwickelt, welche über ein im Browser aufrufbares GUI verfügt (Abb. 4.7). Da das C-Faktor-Tool jedoch auf die Integration in eine WebGIS-Applikation ausgerichtet ist und es zu deren Entwicklung eines ausgeklügelten Frameworks wie GeoDjango anstatt nur eines Webservers bedarf, wurde die Entwicklung mit Apache nicht weiterverfolgt. Eine Entwicklung des Tools direkt in GeoDjango war im Rahmen der Masterarbeit einerseits zeitlich nicht mehr möglich und wurde auch bewusst nicht gewählt, um die Entwicklung der WebGIS-Applikation nicht auf eine bestimmte Umgebung einzuschränken. Indem das Tool als Shell-Script vorliegt ist bei der Web-Entwicklung grösstmögliche Flexibilität und Zugänglichkeit gewährleistet, da keine Einschränkungen bei der Entwicklungsumgebung bestehen und das gesamte Programm in einer einzigen Datei gut dokumentiert verfügbar ist. In einem Framework wäre das Programm zudem unweigerlich über viele Dateien verteilt und es bedarf guter Kenntnisse des Frameworks, um die Architektur des Tools zu rekonstruieren. Dies wäre für die weitere Entwicklung und Verwendung des C-Faktor-Tools hinderlich, während ein einzelnes Script übersichtlich und nachvollziehbar ist. Mit Blick auf eine möglichst hohe Transparenz ist das Tool entsprechend bewusst als einzelnes Python-Script realisiert. Eine isolierte Verwendung des C-Faktor-Tools selbst ist dagegen nicht benutzerfreundlich, da es nicht als Gesamtpaket

CTool Input (Version 2 mit HTML)

Wahl der Hauptkulturen und der Bodenbearbeitung:

1. Jahr

Hauptkultur 1:

Bodenbearbeitung HK1:

2. Jahr

Hauptkultur 2:

Bodenbearbeitung HK2:

3. Jahr

Hauptkultur 3:

Bodenbearbeitung HK3:

Eingaben bestaetigen

Abbildung 4.7: Screenshot der zu Testzwecken entwickelten graphischen Benutzeroberfläche zur frühen Testversion des C-Faktor-Tools nach ABAG (vgl. Kapitel 4.1.2) (Kupferschmied 2018)

mit GUI vorliegt und ein Anwender zur Installation und Verwendung gewisse Kenntnisse benötigt. Entsprechend soll im Anschluss an die Arbeit das Tool noch in ein einfach zu verwendendes Programm gepackt werden, um es auch unabhängig von der geplanten WebGIS-Applikation verfügbar zu machen.

Das C-Faktor-Tool wird sowohl in Form des Python-Scripts mit .csv-Tabellen für die DB zur Entwicklung, wie auch als ausführbares aber nicht editierbares Programm zur direkten Anwendung verfügbar sein. Auf Anfrage ist das C-Faktor-Tool zusammen mit einer Dokumentation unter folgender Adresse erhältlich:

Volker Prasuhn

Agroscope

Reckenholzstrasse 191

8046 Zürich

Tel. +41 58 468 71 45

Email: volker.prasuhn@agroscope.admin.ch

4.2.3 Berechnung Schritt 1: Benutzereingaben

Die Berechnung des C-Faktors beginnt mit den Benutzereingaben. Für die Wahl der Region erlauben die aktuellen Datensätze eine Unterscheidung in Talgebiet und Hügelgebiet. Sollten zukünftig Daten für zusätzliche Regionen verfügbar sein, können diese technisch leicht ins Tool implementiert werden. So wäre bei entsprechender Datengrundlage bspw. eine Unterscheidung in West-, Ost- oder Südschweiz denkbar, wobei die Anzahl Regionen technisch nicht begrenzt ist. Die Wahl der Region ist einmalig für die ganze Fruchtfolge zu treffen und beeinflusst die Kalenderdaten des Kulturkalenders und die R-Anteile. Für beides bestehen in der DB jeweils Tabellen mit Daten zum Tal- bzw. Hügelgebiet. Werden diese Daten aus der DB gelesen, verweist die Region auf die richtige Tabelle.

Die Angaben zur Fruchtfolge bestehen für jedes Jahr aus einer Hauptkultur und einer Zwischennutzung, wobei zu beiden individuell ein Bodenbearbeitungsverfahren angegeben werden kann. Als Hauptkulturen stehen 53 in der Schweiz gängige Ackerfrüchte zur Auswahl. Ein Spezialfall bildet hierbei die Kunstwiese, welche jedoch später thematisiert wird (vgl. Kapitel 4.2.3.8). Jede Hauptkultur verfügt über eigene von der gewählten Bodenbearbeitung abhängige RBA-Werte (Anhang A2) und über regionsabhängige Kalenderdaten (Anhang A1) zu allen Kulturperioden der Haupt- und Zwischennutzung (vgl. Abb. 4.6). Denn für die Zwischennutzung wird nicht wie bei der Hauptkultur eine Ackerfrucht gewählt, sondern die Art der Nutzung zwischen zwei Hauptkulturen definiert. Solche Zwischennutzungen können bspw. eine Brache oder ein Zwischenfutter sein. Dabei werden acht Fälle unterschieden, wobei der siebte Fall technisch nicht umgesetzt werden konnte.

Die Zwischennutzungs-Fälle werden anschliessend gleich einzeln vorgestellt. Die Art der Zwischennutzung bestimmt damit die Anzahl Kulturperioden eines Jahres und die RBA-Werte während den Zwischenperioden (vgl. Abb. 4.6). Diese hängen zudem von der Art der Bodenbearbeitung ab, welche auch für die Zwischennutzung gewählt wird. Dabei stehen für Haupt- und Zwischenkultur die vier Bodenbearbeitungsverfahren Pflug, Mulchsaat mit weniger als 30% Bodenbedeckung, Mulchsaat mit mehr als 30% Bedeckung und Direktsaat zur Auswahl (vgl. Kapitel 3.1.1). Im Script werden die Benutzereingaben zur Region und

```

72 #Eingabe der Region
73 #-> Optionen: tal / hug
74
75 input_region = 'tal'
76
77
78
79 #Erstellen der Liste user_input, wobei wiederum
80 #jede Liste die Inputs für ein Jahr enthält.
81
82 user_input = [
83   ... [29, 'mulch_o30', -3, 'pflug'],
84   ... [149, 'pflug', -8, 'pflug'],
85   ... [22, 'direktsaat', -6, 'mulch_u30'],
86   ... [20, 'pflug', -55, 'mulch_u30'],
87   ... [149, 'mulch_u30', -8, 'mulch_o30'],
88   ... [150, 'mulch_o30', -8, 'pflug'],
89   ... [44, 'pflug', -5, 'mulch_o30'],
90   ... [26, 'mulch_u30', -4, 'pflug'],
91   ... [8, 'pflug', -2, 'pflug'],
92   ... [39, 'direktsaat', -3, 'pflug']
93   ... ]

```

Abbildung 4.8: Scriptausschnitt C-Faktor-Tool: Manuelle Benutzereingaben (Kupferschmied 2018)

der Fruchtfolge manuell getätigt (Abb. 4.8), während die Angaben bei der geplanten WebGIS-Applikation und auch beim noch zu entwickelnden Programm zum C-Faktor-Tool in einer graphischen Benutzeroberfläche im Stile von Abbildung 2.10 (ErosionCH) oder 4.7 gemacht werden können. Im Script wird die Fruchtfolge in der Liste *user_input* erstellt, wobei diese wiederum für jedes Jahr eine Liste mit den Angaben zur Hauptkultur und Zwischennutzung inklusive Bodenbearbeitungsverfahren enthält. Die erste Zahl entspricht dabei der Kulturnummer der Hauptkultur und die zweite Nummer dem Fall der Zwischennutzung. Die verschiedenen Fälle der Zwischennutzung werden nun erläutert.

4.2.3.1 Zwischennutzung Fall 1: keine Zwischennutzung

Wenn auf die vorherige Hauptkultur nach wenigen Tagen mehr oder weniger direkt die nächste Hauptkultur folgt wird der Zwischennutzungs-Fall 1 gewählt. Dies ist bspw. für Winterweizen nach Zuckerrüben der Fall, wobei die Rüben am 20.10. geerntet werden und die Bodenbearbeitung des Winterweizens am 24.10. erfolgt. Die vorherige Hauptkultur schliesst mit dem Erntedatum die Kulturperiode 5 (75%-E) mit dem entsprechenden RBA-Wert ab. Die Zeit zwischen den beiden Hauptkulturen wird durch die Kulturperiode 6 (E-BB) beschrieben mit dem Erntedatum der vorherigen und dem Bodenbearbeitungsdatum der Folgekultur. Als RBA-Wert wird der Wert der Kulturperiode 6 der vorherigen Hauptkultur verwendet. Die folgende Hauptkultur beginnt dann mit der Kulturperiode 1 (BB-SB) und dem dieser Periode entsprechenden RBA-Wert der Folgekultur.

4.2.3.2 Zwischennutzung Fall 2: Stoppelbrache vor Winterhauptkultur

Fall 2 wird gewählt wenn auf die vorherige Hauptkultur im Abstand von einigen Wochen eine Winterhauptkultur folgt, dazwischen aber keine Bodenbearbeitung vorgenommen und eine Stoppelbrache stehen gelassen wird. Dies gilt bspw. für Wintergerste nach Winterweizen, wobei der Weizen Ende Juli geerntet wird und die Bodenbearbeitung der Gerste Ende September erfolgt. Analog zu Fall 1 schliesst die vorherige Hauptkultur mit dem Erntedatum die Kulturperiode 5 (75%-E) und ihrem RBA-Wert von Periode 5 ab. Mit dem Erntedatum der Vor- und dem Bodenbearbeitungsdatum der Folgekultur wird die Kulturperiode 6 gebildet und der RBA-Wert von Periode 6 der Vorkultur verwendet. Damit ist der Fall 2 exakt gleich zu berechnen wie der erste Fall. Lediglich die Dauer der letzten Kulturperiode zwischen den beiden Hauptkulturen fällt im zweiten Fall länger aus. Wird der Fall 2 als Zwischennutzung gewählt, muss die nächste Hauptkultur in der Fruchtfolge zwingend eine Winterkultur sein.

4.2.3.3 Zwischennutzung Fall 3: Stoppelbrache im Winter

Auch beim dritten Fall folgt auf die vorherige Hauptkultur nach einer Stoppelbrache die nächste Hauptkultur. Allerdings verbleibt die Stoppelbrache bei diesem Fall den Winter über und die nächste Hauptkultur folgt erst im Frühling. Ein Beispiel ist die Ernte von Zuckerrüben im Oktober gefolgt von der Kartoffelsaat im April. Wie bei Fall 1 und 2 schliesst die vorherige Hauptkultur mit dem Erntedatum die Kulturperiode 5 (75%-E) mit entsprechendem RBA-Wert ab. Das Erntedatum der Vor- und Bodenbearbeitungsdatum der Folgekultur bilden die nun mehrere Monate dauernde Kulturperiode 6 welche den RBA-Wert der Kulturperiode 6 der Vorkultur verwendet. Wird der Fall 3 als Zwischennutzung gewählt, muss die nächste Hauptkultur in der Fruchtfolge zwingend eine Sommerkultur sein.

4.2.3.4 Zwischennutzung Fall 4: Schwarzbrache im Winter

Der vierte Fall ist ähnlich wie Fall 3, jedoch erfolgt nach der Ernte der vorherigen Hauptkultur ein Pflugeinsatz (Herbstfurche). Über den Winter verbleibt eine Schwarzbrache bevor im Frühling die nächste Sommerhauptkultur folgt. Die Kulturperioden verlaufen beim vierten Fall wie bei den Fällen 1 bis 3. Die Vorkultur schliesst mit dem Erntedatum die Kulturperiode 5 (75%-E) mit ihrem RBA-Wert der Periode 5 ab. Die Zeit zwischen der Vor- und der Folgekultur wird durch die Kulturperiode 6 (E-BB) beschrieben mit dem Erntedatum der vorherigen und dem Bodenbearbeitungsdatum der Folgekultur. Im Unterschied zu den Fällen 1 bis 3 wird für die Kulturperiode 6 jedoch nicht der RBA-Wert von Periode 6 der Vorkultur verwendet, da nicht eine Stoppelbrache sondern eine gepflügte Schwarzbrache über den Winter verbleibt. Während der relative Bodenabtrag einer Stop-

pelbrache aufgrund der auf dem Acker verbleibenden Erntereste von der Vorkultur abhängt, ist der RBA der Schwarzbrache nach dem Beseitigen der Erntereste durch den Pflugeinsatz unabhängig von der Vorkultur und immer identisch. Entsprechend erhält die Kulturperiode 6 beim Fall 4 den fixen RBA-Wert 0.32 für die gepflügte Schwarzbrache im Winter. Weiter muss die nächste Hauptkultur eine Sommerkultur sein und als Bodenbearbeitungsverfahren der Folgekultur muss aufgrund der Herbstfurche zwingend Pflugeinsatz angegeben werden.

4.2.3.5 Zwischennutzung Fall 5: Zwischenkultur abfrierend/winterhart

Bei Fall 5 folgt auf die vorherige Hauptkultur während des Winters eine Zwischenkultur bis zur nächsten Hauptkultur. Ein Beispiel hierzu ist Winterweizen mit Ernte am 29.7. gefolgt von Klee gras mit Bodenbearbeitung am 3.8. und im nächsten Frühling ab dem 21.3. Zuckerrüben. Auch bei den Zwischenkulturen werden nicht wie bei den Hauptkulturen verschiedene Kultursorten unterschieden, sondern lediglich abfrierende und überwinternde Sorten unterteilt. Zu den abfrierenden Zwischenkulturen gehören Grünmais, Nichtleguminosen (Gründüngung) und nicht überwinternde Zwischenfuttersorten (Klee gras und andere). Zu den winterharten Zwischenkulturen zählen Leguminosen, überwinternde Zwischenfuttersorten (Klee gras und andere) sowie der Frühjahrsschnitt vor Wiesenumbbruch (Anhang A2.1). Der Fall 5 unterscheidet sich hinsichtlich der Kulturperioden deutlich von den Fällen 1 bis 4, welche jeweils nur eine sechste Periode für die Phase zwischen der Ernte der Vor- und der Bodenbearbeitung der Folgekultur kennen. Bei Fall 5 schliesst die vorherige Hauptkultur mit der Ernte die 5. Periode mit dem entsprechenden RBA-Wert ab. Danach folgen einige Tage bis zur Bodenbearbeitung der Zwischenkultur. Diese Zeit deckt die Kulturperiode 6 der vorherigen Hauptkultur unter Verwendung des entsprechenden RBA-Werts ab. Anschliessend folgen ab der Bodenbearbeitung der Zwischenkultur analog zu den Hauptkulturen vier Kulturperioden bis 75% Bodenbedeckung erreicht ist. Die Kalenderdaten hängen dabei von der vorherigen Hauptkultur ab, wobei für Zwischenkulturen generell keine fixen Erntedaten vorhanden sind (Anhang A1.3, A1.4). Stattdessen werden Zwischenkulturen bei der angepassten Berechnungsweise per Definition stets einen Tag vor dem Bodenbearbeitungsdatum der folgenden Hauptkultur geerntet (vgl. Prasuhn 2017, unveröffentlicht: 6) und das Erntedatum muss jeweils abhängig von der Folgekultur ermittelt werden (vgl. Abb. 4.6). Auf die vierte Kulturperiode (50-75%) der Zwischenkultur folgt demnach ihre fünfte (75%-E) ab dem durch die Vorkultur definierten Datum für 75% Bodenbedeckung bis zum von der Folgekultur abhängigen Erntedatum. Dem einen Tag zwischen der Ernte der Zwischenkultur und der Bodenbearbeitung der Folgekultur entspricht die sechste Kulturperiode der Zwischenkultur. Während die Daten der Kulturperioden durch die vorherige und folgende Hauptkultur zu bestimmen sind, liegen für die sechs Perioden der Zwischenkultur eigene RBA-Werte vor. Dabei unterscheiden sich die RBA-Werte von abfrierenden und winterharten Zwischenkulturen, weshalb in einen Fall 5a (abfrierend) und 5b (winterhart) unterschieden wird (Anhang A2). Für den Kulturkalender

ist diese Unterscheidung jedoch irrelevant. Die RBA-Werte der Zwischenkultur hängen vom Bodenbearbeitungsverfahren der Zwischennutzung ab. Bei den Fällen 1 bis 3 wurden jeweils nur die RBA-Werte der Vorkultur und bei Fall 4 eine Konstante verwendet, wodurch die Angabe der Bodenbearbeitung zur Zwischennutzung bei diesen Fällen in der Berechnung keinen Effekt hat.

4.2.3.6 Zwischennutzung Fall 6: Herbstzwischenkultur vor Schwarzbrache im Winter

Bei Fall 6 folgt auf die Ernte der Vorkultur wie bei Fall 5 eine Zwischenkultur, welche allerdings an einem Stichtag (15. November) geerntet, und über den Winter durch eine gepflügte Schwarzbrache ersetzt wird, bevor im Frühling die nächste Hauptkultur folgt. Ein Beispiel ist die Ernte von Winterweizen am 29.7., gefolgt von einem Herbstzwischenfutter wie Klee gras vom 3.8. bis zum 15.11. und ab dann die Schwarzbrache bis zur auf den 21.3. datierten Bodenbearbeitung der folgenden Zuckerrüben. Im Unterschied zu Fall 5 ist beim Fall 6 das Erntedatum der Zwischenkultur in jedem Fall, also unabhängig der vorherigen Hauptkultur, der 15. November. Entsprechend existieren für diesen Fall angepasste Tabellen vom Kulturkalender mit dem 15.11. (Tag 320) als fixes Erntedatum (Anhang A1.5, A1.6). Da diese Art der Zwischennutzung nur nach einigen früh geernteten Hauptkulturen verwendet wird, kam es bei der Anpassung der Kulturkalendertabellen zu Überschneidungen von Daten. So liegen bspw. von Zwischenkulturen nach Mais-, Rüben- oder Kartoffelsorten die Kalenderdaten der dritten, vierten oder fünften Kulturperiode bereits nach dem 15. November. Dies liegt daran, weil diese genannten Hauptkulturen erst spät im Herbst geerntet werden und der Fall 6 in der Praxis bei diesen Kulturen nicht angewandt wird. Um trotzdem keine Kulturauswahl bei der technischen Umsetzung kategorisch auszuschliessen aber Überschneidungen der Daten zu verhindern, wurden die Daten der entsprechenden Kulturen für jede betroffene Periode zusätzlich angepasst. Das Erntedatum ist bei allen Kulturen der 15. November, das Datum für 75% Bodenbedeckung bei den betroffenen Kulturen der 14. November und das Datum für 50% Bedeckung, wenn eine Anpassung nötig ist, der 13. November und so weiter. Diese Daten sind zwar nicht realistisch, der Fall 6 sollte für die entsprechenden Kulturen aber in der Praxis wie gesagt nicht verwendet werden. Sollte der Fall 6 trotzdem für ungeeignete Vorkulturen wie Mais oder Rüben verwendet werden, verhindert diese Anpassung der Daten grössere Abweichungen in der Berechnung, welche ohne die Anpassung entstehen würden. Denn bei Überschneidungen der Daten würde das Programm bei der Berechnung ein zusätzliches Jahr (sog. *Loopjahr*) einfügen, was die ganze Berechnung stark verfälscht. Die Abweichung des C-Faktors ist durch die gemachten Anpassungen hingegen überaus gering. Beim Fall 6 schliesst die Vorkultur mit dem Erntedatum die Kulturperiode 5 mit dem entsprechenden RBA-Wert ab. Die Phase zwischen der Ernte der Vor- und der Bodenbearbeitung der Herbstzwischenkultur bildet die Kulturperiode 6 mit dem entsprechenden RBA-Wert der Vorkultur. Darauf folgen die Kulturperioden 1 bis 5 des Herbstzwischenfutters bis zum

fixen Erntedatum am 15. November. Für diese fünf Perioden kommen die entsprechenden RBA-Werte für Herbstzwischenfutter abhängig vom Bodenbearbeitungsverfahren der Zwischennutzung zum Einsatz (Anhang A2). Die sechste Zwischenperiode bildet die gepflügte Schwarzbrache und dauert vom 15. November bis zur Bodenbearbeitung der Folgekultur unter Verwendung der fixen RBA-Konstante 0.32 für eine gepflügte Schwarzbrache. Das Bodenbearbeitungsverfahren der folgenden Hauptkultur muss aufgrund der gepflügten Schwarzbrache zwingend Pflugeinsatz sein.

4.2.3.7 Zwischennutzung Fall 7: Herbstzwischenkultur vor Winterkultur (technisch nicht umgesetzt!)

Der Fall 7 ist ähnlich zum Fall 6 mit dem Unterschied, dass nach der Herbstzwischenkultur keine Winterbrache, sondern eine Winterhauptkultur folgt. Die Saatdaten der Winterkulturen sind jedoch unterschiedlich und erstrecken sich vom 29.8. für Raps bis zum 18.10. für Dinkel. Dieser Umstand würde ohne Anpassungen im Kulturkalender in den meisten Fällen zu Überschneidungen und damit zu fehlerhaften Berechnungen führen. Eine Anpassung des Zwischenkulturkalenders alleine, wie in Fall 6, ist dabei allerdings nicht sinnvoll, da der Stichtag zur Ernte spätestens auf den 28.8. fallen müsste und damit für die meisten Winterkulturen und auch für die Zwischenkulturen viel zu früh wäre. Zudem käme es dadurch in der Berechnung rein technisch zu Brachephasen zwischen der Ernte der Herbstzwischenkultur und der Winterkultur, was nicht der Realität entspräche. Es müssten also zusätzlich die Kulturkalenderdaten der Winterhauptkulturen angepasst werden. Dies ist jedoch technisch mit dem gewählten Ansatz nicht umsetzbar, weil die Kalenderdaten aller Hauptkulturen in der Berechnung zuerst feststehen müssen, um jene der Zwischennutzungen zu erstellen. Denn um jeweils das Bodenbearbeitungsdatum der folgenden Hauptkultur zur Vervollständigung der letzten Kulturperiode eines Jahres abfragen zu können, muss die Liste mit den Daten der Hauptkulturen für die ganze Fruchtfolge bereits berechnet sein, bevor die Daten der Zwischennutzungen erstellt werden können (vgl. Kapitel 4.2.4). Entsprechend ist es technisch nicht möglich abhängig von der Zwischennutzung die Tabelle zur Ermittlung der Daten einer bestimmten Hauptkultur zu ändern. Aus diesem Grund wird der Zwischennutzungs-Fall 7 im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Da dieser Fall in der Praxis allerdings nur relativ selten zum Einsatz kommt, schränkt dies die Verwendbarkeit des C-Faktor-Tools in der Praxis nicht wirklich ein. Zudem könnte der Fall eventuell bei der Entwicklung der WebGIS-Applikation nachträglich mit den dortigen Mitteln realisiert werden.

4.2.3.8 Zwischennutzung Fall 8: Kunstwiese

Während die Fälle 1 bis 7 der Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) entstammen, wurde der Fall 8 im Rahmen der Ausarbeitung einer angepassten Berechnungsweise

neu entwickelt. Der Fall 8 dient der technischen Implementierung von Kunstwiese in die Berechnungsweise. Kunstwiese ist ein Spezialfall, weil sie mehrjährig sein kann und dazwischen nicht geerntet und neu gesät wird. In der Praxis beginnt eine Kunstwiese häufig als Zwischenfrucht im Winter und wird dann aber stehen gelassen. Dies konnte mit den vorhandenen Datensätzen technisch nicht realisiert werden. Zur Kunstwiese sind in der Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) Kalenderdaten für die Zeitpunkte Bodenbearbeitung (25.3.), Saat (5.4.), 10% (15.4.), 50% (25.4.) und 75% Bodenbedeckung (5.5.), sowie RBA-Werte zu allen sechs Kulturperioden aufgeführt (vgl. Anhang A1.1, A1.2 und A2). Ein Erntedatum ist allerdings nicht angegeben, weil Kunstwiese wie eine Zwischenkultur vor dem Beginn der folgenden Hauptkultur geerntet wird. Mit diesen Daten wurde für die angepasste Berechnungsweise folgende technische Lösung erarbeitet. Eine Kunstwiese beginnt immer als Hauptkultur mit dem 25.3. als Bodenbearbeitungsdatum. Dazu wird als Hauptkultur *Kunstwiese 1. Jahr* angegeben. Da jede Hauptkultur aus technischen Gründen im Kulturkalender ein Erntedatum aufweisen muss, wurde als Erntedatum der 25. Oktober für das Tal- bzw. der 27. Oktober für das Hügelgebiet angegeben. Die Daten sind so gewählt, dass sie einen Tag nach dem Bodenbearbeitungsdatum der spätesten Hauptkultur (Winterweizen nach Rüben und Mais) angesetzt sind, um Überschneidungen und damit Fehler in der Berechnung zu verhindern. Den fünf Kulturperioden von Bodenbearbeitung bis Ernte fallen die entsprechenden RBA-Werte zu. Obwohl der Kunstwiese aus technischen Gründen ein Erntedatum zugeteilt werden muss, soll sich dieses bei der Berechnung des C-Faktors nicht auswirken. Dies wird über den Zwischennutzungs-Fall 8 speziell für Kunstwiese und die zusätzliche Hauptkultur-Auswahl *Kunstwiese Folgejahre* gewährleistet. Der Zwischennutzungs-Fall 8 hängt eine sechste Kulturperiode vom theoretischen Erntedatum der Kunstwiese bis zum Bodenbearbeitungsdatum der Folgekultur an. Als RBA-Wert wird beim Fall 8 für diese sechste Periode, wie im Datensatz von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) vorgegeben, die Konstante 0.004 verwendet, welche dem RBA-Wert einer vollständig entwickelten Kunstwiese entspricht. Falls nun ein weiteres Jahr Kunstwiese folgen soll, muss als Folgekultur die Hauptkultur *Kunstwiese Folgejahre* gewählt werden. Diese verfügt über die selben Kulturperioden und Kalenderdaten wie die *Kunstwiese 1. Jahr* aber verwendet als RBA-Wert für jede dieser Perioden ebenfalls die Konstante 0.004. Durch diesen technischen Kniff wird die Kunstwiese laut Kulturkalender zwar theoretisch jedes mal geerntet und neu gesät, doch bleibt der RBA-Wert ab dem Erreichen der vollständigen Bodenbedeckung am theoretischen Erntedatum des ersten Jahres stets konstant bei 0.004 für die etablierte Kunstwiese. Da der RBA-Wert konstant bleibt, macht es für die Berechnung des C-Faktors keinen Unterschied, ob eine einzige durchgängige Kulturperiode ab Erreichen der vollständigen Bodenbedeckung besteht, oder ob die Kunstwiese über die Jahre theoretisch in mehrere einzelne Kulturen unterteilt ist. Denn die Summe der C-Faktor-Anteile ist für die Dauer der Kunstwiese schlussendlich unabhängig von der Anzahl Perioden identisch. Bei der Anwendung der Berechnung muss eine mehrjährige Kunstwiese immer mit der Hauptkultur *Kunstwiese 1. Jahr* begonnen

und als Zwischennutzung stets Fall 8 verwendet werden. Für jedes weitere Jahr, während dem die Kunstwiese besteht, wird als Hauptkultur *Kunstwiese Folgejahre* und Fall 8 als Zwischennutzung angegeben. Die Kunstwiese endet mit dem Bodenbearbeitungsdatum der nächsten Hauptkultur, welche keine Kunstwiese mehr ist. Falls bei der Anwendung trotzdem der Fall abgebildet werden möchte, dass eine Kunstwiese bereits im Herbst direkt auf eine Vorkultur folgt, kann die Berechnung ausgetrickst und eine gute Näherung erreicht werden. Dazu muss nach der Vorkultur eine winterharte Zwischenkultur gemäss Fall 5b folgen, welche für die Kulturperioden 1 bis 5 praktisch identische RBA-Werte wie die *Kunstwiese 1. Jahr* hat. Lediglich der RBA-Wert der sechsten Periode ist bei der winterharten Zwischenkultur bei Pflugeinsatz mit 0.02 und bei Mulch- und Direktsaatverfahren mit 0.01 nennenswert höher als die 0.004 der Kunstwiese. Da die sechste Periode bei Fall 5 jedoch nur einen einzelnen Tag von der Ernte der Zwischenkultur bis zur Bodenbearbeitung der Folgekultur umfasst, wirkt sich dieser Unterschied bei der C-Faktor-Berechnung nicht merklich aus. Wenn nun als Folgekultur direkt *Kunstwiese Folgejahre* mit durchgängigem RBA-Wert von 0.004 gewählt wird, ergibt sich bei der C-Faktor-Berechnung eine sehr gute Näherung für den Fall, dass eine Kunstwiese im Herbst direkt auf eine Vorkultur folgt (vgl. Kapitel 4.3.2.6).

4.2.4 Berechnung Schritt 2: Erstellung des Kulturkalenders

Die Erstellung des Kulturkalenders ist neben den Korrekturfaktoren der komplizierteste Teil der angepassten Berechnungsweise. Bereits bei der Testversion einer Operationalisierung nach dem ABAG-Verfahren in Kapitel 4.1.2 zeigte sich, dass die kulturübergreifenden Abhängigkeiten, wie das zur Vervollständigung der jeweils letzten Kulturperiode benötigte Bodenbearbeitungsdatum der Folgekultur, eine technische Herausforderung sind. Mit den oben beschriebenen Zwischennutzungs-Fällen wird die technische Operationalisierung gegenüber einer Berechnung mit ausschliesslich Hauptkulturen deutlich komplexer. Bei einem tabellenbasierten, manuellen Berechnungsverfahren stellt dies kein Problem dar, da Werte jederzeit und an allen Stellen angepasst und Abhängigkeiten gegebenenfalls neu ausgelesen oder berechnet werden können. Eine technisch ausgerichtete Berechnungsweise muss jedoch strikt der Logik der Programmierung folgen und erlaubt keine rückwirkenden Änderungen. Entsprechend müssen bei der angepassten Berechnungsweise die Kalenderdaten der Hauptkulturen zuerst feststehen, bevor die Kulturperioden der Zwischennutzungen und damit die Übergänge zwischen den Hauptkulturen ermittelt werden können. Aus diesem Grund kann auch der Zwischennutzungs-Fall 7 technisch nicht realisiert werden, weil Änderungen bei den Kalenderdaten der Hauptkultur nötig wären (vgl. Kapitel 4.2.3.7). Zur Erstellung des Kulturkalenders werden folglich zuerst für jede Hauptkultur die sechs Kalenderdaten von der Bodenbearbeitung bis zur Ernte ausgelesen. Anschliessend wird für jedes Jahr die Art der Zwischennutzung geprüft und entsprechend die Zwischenperiode(n) gebildet. Im Falle

einer Zwischenkultur bei den Fällen 5 und 6 werden die Kalenderdaten der Kulturperioden analog zum Vorgehen bei den Hauptkulturen aus der jeweiligen Tabelle gelesen.

```

105
106 ▾ class kulturkalender:
107
108
109     # Definition der __init__ Funktion
110     #-----
111
112     # Die Region aus dem User-Input kann als globales
113     → # Argument der Klasse kulturkalender verwendet werden
114 ▾ def __init__(self, region):
115         self.region = region
116

```

Abbildung 4.9: Scriptausschnitt C-Faktor-Tool: Definition der Klasse *kulturkalender* mit der Region als globalem Argument (Kupferschmied 2018)

Im C-Faktor-Tool ist dieses Vorgehen folgendermaßen operationalisiert. Die einzelnen Berechnungsschritte zum Auslesen der Kalenderdaten und deren Zusammenstellung in Listen werden als eigene Funktionen definiert. Diese Funktionen können dann im Script bei der eigentlichen Erstellung des Kulturkalenders aufgerufen und mit Argumenten

ausgeführt werden. Dies ermöglicht, dass bspw. der Code zu einem Zwischennutzungs-Fall im Script nur einmal geschrieben werden muss auch wenn der Fall in der Fruchtfolge mehrmals vorkommt. Erst dadurch wird ein dynamischer Code möglich, welcher beliebige Fruchtfolgekonstellationen verarbeiten kann. Alle Funktionen zum Kulturkalender werden in einer Klasse zusammengefasst. Python ermöglicht als objektorientierte Programmiersprache in einer Klasse ein globales Argument bzw. Objekt zu definieren, welches von allen Funktionen verwendet werden kann. Im C-Faktor-Tool wird damit für die ganze Klasse des Kulturkalenders die vom Benutzer angegebene Region als Argument gegeben (Abb. 4.9). Die Region bestimmt aus welchen Tabellen die einzelnen Funktionen die Kalenderdaten zu den Kulturperioden holen.

Die erste Funktion liest für eine bestimmte Kulturnummer die Kalenderdaten für die einzelnen Phasen einer Hauptkultur aus der Datenbank und schreibt sie in eine Liste. Eine Funktion in Python arbeitet immer mit Argumenten (Abb. 4.10, Zeile 124), welche beim Aufrufen der Funktion angegeben werden. Das erste Argument (*self*) ist durch die Klasse definiert und gibt der Funktion die vom Benutzer gewählte Region an (vgl. Abb. 4.8, Zeile 75), welche in der Funktion ausschlaggebend für die Wahl der korrekten Query ist (Abb. 4.10, Zeilen 138-152). So wird abhängig von der Region über die Query die entsprechende Tabelle in der Datenbank aufgerufen. Das zweite Argument entspricht der Kulturnummer der jeweiligen Hauptkultur für welche die Daten ausgelesen werden sollen. Diese Kulturnummer wird beim Ausführen der Query mitgegeben und definiert für welche Kultur die Kalenderdaten ausgelesen werden (Abb. 4.10, Zeile 161). Diese Funktion kann dank dem for-Loop nicht nur eine einzelne Kulturnummer als Argument annehmen, sondern gleich eine Liste mit mehreren Kulturnummern. Dies wird später die Liste mit den

Kulturnummern aller Hauptkulturen der Fruchtfolge sein, wobei die Funktion eine Liste von Listen mit den Daten zu allen Hauptkulturen ausgibt.

```
121 # Definition der Funktion kk_hauptkultur
122 #-----
123
124 def kk_hauptkultur(self, knr):
125     """Die Funktion kk_hauptkultur erstellt den Kulturkalender für die gewählten
126     Hauptkulturen.
127     Das Argument knr muss die Kulturnummer der jeweiligen Hauptkultur sein.
128     Die Query wird abhängig von der klassenweit gültigen Region (self) bestimmt.
129     Die Query enthält einen Platzhalter über welchen der Zugriffsort variiert wird.
130     Die Funktion führt in einem Loop für jede Kulturnummer die Query mit knr als
131     Zugriffsort aus, schreibt die ausgelesenen Daten der Kulturperioden für jede
132     Hauptkultur in eine separate Liste kk_jahr und fügt sie als Element der Liste
133     kk_hk an. Das Resultat der Funktion ist kk_hk, eine Liste mit Listen für jede
134     Hauptkultur bzw. jedes Jahr mit den Daten der einzelnen Kulturperioden.
135     Jedes Datum kann über einen doppelten Index i[x][y] eindeutig indexiert werden,
136     wobei x eine Kultur und y ein Datum in der Kultur x bestimmt."""
137
138     # Bestimme Query abhängig von Region
139     if self.region is 'tal':
140         query_kk_hk = """
141         SELECT "KK_HK_Tal_BB", "KK_HK_Tal_S", "KK_HK_Tal_10", "KK_HK_Tal_50",
142         → → → → "KK_HK_Tal_75", "KK_HK_Tal_E"
143         FROM "KK_HK_Tal" as kkhk
144         WHERE kkhk."KK_HK_Tal_Knr" = %s
145         """
146     elif self.region is 'hug':
147         query_kk_hk = """
148         SELECT "KK_HK_Hug_BB", "KK_HK_Hug_S", "KK_HK_Hug_10", "KK_HK_Hug_50",
149         → → → → "KK_HK_Hug_75", "KK_HK_Hug_E"
150         FROM "KK_HK_Hug" as kkhk
151         WHERE kkhk."KK_HK_Hug_Knr" = %s
152         """
153
154     # Erstelle leere Liste kk_hk
155     kk_hk = []
156
157     # Liest für jedes Jahr die Daten aller Kulturperioden der jeweiligen Hauptkultur
158     # über die gegebene Kulturnummer (knr) als ID aus der Datenbank,
159     # macht daraus eine Liste kk_jahr und hängt diese der äusseren Liste kk_hk an.
160     for k in knr:
161         cursor.execute(query_kk_hk, [k])
162         for record in cursor:
163             kk_jahr = list(record)
164             kk_hk.append(kk_jahr)
165     return kk_hk
```

Abbildung 4.10: Scriptausschnitt C-Faktor-Tool: Definition der Funktion zur Bestimmung der Kalenderdaten von Hauptkulturen (Kupferschmied 2018)

Mit den Kalenderdaten der Hauptkulturen in dieser Liste, können nun die Funktionen zu den einzelnen Zwischennutzungs-Fällen den Kulturkalender der Fruchtfolge vervollständigen. Jeder Zwischennutzungs-Fall ist in einer Funktion vertreten. Anhand der Funktion für die Fälle 1 bis 4 und der Funktion zum Fall 5 wird exemplarisch aufgezeigt, wie die Zwischennutzung technisch operationalisiert werden konnte und inwiefern sich die Fälle dabei unterscheiden.

```

171 # Definition der Funktion kk_zn_fall1234 (zn = Zwischennutzung)
172 #-----
173
174 @staticmethod
175 def kk_zn_fall1234(hk_x, hk_y):
176     """Die Funktion kk_zn_fall1234 integriert die Zwischennutzung für die Fälle 1-4 in
177     den Kulturkalender. Bei diesen Fällen folgt auf die Vorkultur entweder direkt die
178     Folgekultur (Fall 1) oder die Zeit dazwischen wird durch eine Stoppel- (Fall 2-3)
179     oder Schwarzbrache (Fall 4) überbrückt.
180     Hinsichtlich des Kulturkalenders sind die Fälle 1-4 technisch identisch. Einziger
181     Unterschied ist die Dauer zwischen dem Erntedatum der Vorkultur und dem Datum der
182     Bodenbearbeitung der Folgekultur.
183     Als Argumente werden die Kulturkalender-Listen der Vorkultur (hk_x) und der
184     Folgekultur (hk_y) benötigt.
185     Es werden keine zusätzlichen Daten aus der Datenbank benötigt, entsprechend
186     entfällt eine Query und die Funktion ist eine @staticmethod.
187     Die Funktion kopiert zuerst die Liste hk_x in kk_x und hängt dieser das Datum der
188     Bodenbearbeitung der Folgekultur an."""
189
190     # Nimmt den KK der Vorkultur und erstellt daraus eine neue Liste kk_x
191     kk_x = list(hk_x)
192
193     # Nimmt das Datum der Bodenbearbeitung der Folgekultur und hängt es an kk_x
194     kk_x.append(hk_y[0])
195
196     # Gibt den vollständigen KK für Jahr X mit 7 Daten für 6 Perioden aus
197     return kk_x

```

Abbildung 4.11: Scriptausschnitt C-Faktor-Tool: Definition der Funktion zur Bestimmung der Kalenderdaten für die Zwischennutzungs-Fälle 1 bis 4 (Kupferschmied 2018)

In Bezug auf den Kulturkalender sind die Zwischennutzungs-Fälle 1 bis 4 technisch identisch, da an die fünf Kulturperioden der Hauptkultur jeweils eine sechste für die Phase zwischen der Ernte der Vorkultur und der Bodenbearbeitung der Folgekultur angehängt wird. Die Funktion ist entsprechend einfach, da lediglich das erste Datum der Folgekultur bestimmt und an die bestehende Liste der entsprechenden Hauptkultur angehängt werden muss. Da keine zusätzlichen Kalenderdaten aus der Datenbank mehr benötigt werden, verfügt die Funktion über keine Query und kein self-Argument zur Bestimmung der Region, weshalb sie eingangs als *@staticmethod* deklariert wird (Abb. 4.11, Zeile 174). Die Funktion benötigt die Listen mit den Kulturkalenderdaten der Vorkultur und der Folgekultur, welche über die beiden Argumente verwendet werden. Die Liste der Vorkultur wird kopiert und das erste Datum aus der Liste der Folgekultur (Index [0] = erstes Element der Liste), welches deren Bodenbearbeitung entspricht, an die Liste der Vorkultur angehängt (Abb. 4.11, Zeilen 191, 194). Der Output der Funktion ist eine neue Liste mit dem vollständigen Kulturkalender der Vorkultur bestehend aus sieben Kalenderdaten zur Bildung der sechs Kulturperioden.

Beim Zwischennutzungs-Fall 5 folgt auf die Vorkultur eine Zwischenkultur, welche analog zur Hauptkultur eigene Kulturperioden aufweist. Die Kalenderdaten hängen dabei von der Vorkultur ab und müssen aus der Datenbank gelesen werden. Entsprechend verfügt diese Funktion wie jene der Hauptkultur über das regionsbestimmende self-Argument und eigene Queries (Abb. 4.12, Zeilen 206, 228-239). Auch die Funktion zum Fall 5 benötigt die Listen

mit den Kalenderdaten der Vor- und Folgekultur als Argumente. Da die Kalenderdaten der Zwischenkultur von der Vorkultur abhängen, wird zusätzlich deren Kulturnummer zur Abfrage der Datenbank als Argument verwendet (Abb. 4.12, Zeile 206, 245). Die Daten der Zwischenkultur werden analog zum Vorgehen bei der Hauptkultur ausgelesen und der Vorkultur angehängt (Abb. 4.12, Zeilen 242-250). Da die Zwischenkultur laut der Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) einen Tag vor der Bodenbearbeitung der Folgekultur geerntet wird, werden am Schluss diese beiden Daten aus der Liste der Kalenderdaten der Folgekultur ermittelt und zur Vervollständigung des Kulturkalenders der Vorkultur deren Liste angehängt.

```
203 # Definition der Funktion kk_zn_fall5
204 #-----
205
206 def kk_zn_fall5(self, hk_x, hk_y, knr_x):
207     """Die Funktion kk_zn_fall5 integriert die Zwischennutzung für die Fälle 5a
208     (abfrierendes) und 5b (winterhartes Zwischenfutter) in den Kulturkalender.
209     Bei diesen Fällen folgt auf die Vorkultur eine Zwischenkultur mit
210     Zwischenfutter.
211     Hinsichtlich des Kulturkalenders sind die Fälle 5a und 5b technisch identisch.
212     Einziger Unterschied sind die verschiedenen RBA-Werte für abfrierendes und
213     winterhartes Zwischenfutter. Entsprechend gibt es für den Kulturkalender nur
214     eine Funktion aber für die RBA-Werte zwei (rba_zn_fall5a bzw b).
215     Als Argumente werden die Kulturkalender-Listen der Vorkultur (hk_x) und der
216     Folgekultur (hk_y), sowie für den Datenbank-Zugriff noch die Kulturnummer
217     der Vorkultur (knr_x) benötigt.
218     Die Query wird abhängig von der klassenweit gültigen Region (self) bestimmt.
219     Die Query enthält einen Platzhalter über welchen der Zugriffsort variiert wird.
220     Die Funktion kopiert zuerst die Liste hk_x in kk_x, führt in einem Loop für jede
221     Kulturnummer die Query mit knr_x als Zugriffsort aus, schreibt die ausgelesenen
222     Daten der Kulturperioden für die Zwischenkultur in eine separate Liste kk_zk und
223     hängt sie an kk_x an. Das Erntedatum der Zwischenkultur ist als der Tag vor der
224     Bodenbearbeitung der Folgekultur definiert, also hängt die Funktion diese beiden
225     Daten ebenfalls an kk_x an."""
226
227     # Bestimme Query abhängig von Region
228     if self.region is 'tal':
229         query_kk_zk = """
230             SELECT "KK_ZK_Tal_BB", "KK_ZK_Tal_S", "KK_ZK_Tal_10", "KK_ZK_Tal_50", "KK_ZK_Tal_75"
231             FROM "KK_ZK_Tal" as kkzk
232             WHERE kkzk."KK_ZK_Tal_Knr" = %s
233             """
234     elif self.region is 'hug':
235         query_kk_zk = """
236             SELECT "KK_ZK_Hug_BB", "KK_ZK_Hug_S", "KK_ZK_Hug_10", "KK_ZK_Hug_50", "KK_ZK_Hug_75"
237             FROM "KK_ZK_Hug" as kkzk
238             WHERE kkzk."KK_ZK_Hug_Knr" = %s
239             """
240
241     # Nimmt den KK der Vorkultur und erstellt daraus eine neue Liste kk_x
242     kk_x = list(hk_x)
243
244     # Liesst die Daten der Zwischenkultur aus der Datenbank und erstellt damit die Liste kk_zk
245     cursor.execute(query_kk_zk, [knr_x])
246     for record in cursor:
247         kk_zk = list(record)
248
249     # Fügt kk_x und kk_zk zusammen
250     kk_x = list(kk_x + kk_zk)
251
252     # Hängt die Daten für Ernte Zwischenkultur (1 Tag vor BB) und die Bodenbearbeitung der Folgekultur an
253     kk_x.append(hk_y[0]-1)
254     kk_x.append(hk_y[0])
255     return kk_x
```

Abbildung 4.12: Scriptausschnitt C-Faktor-Tool: Definition der Funktion zur Bestimmung der Kalenderdaten für den Zwischennutzungs-Fall 5 (Kupferschmied 2018)

```
351 # Erstellen der Kulturkalender
352 #*****
353
354 # Nutze input_region als globales self-Argument der Klasse kulturkalender
355 KKClass = kulturkalender(input_region)
356
357 # Erstellen der Fruchtfolge aus den Hauptkulturen
358 ff = [year_kk[0] for year_kk in user_input]
359
360 # Erstelle den Kulturkalender hk, welcher nur aus den Hauptkulturen besteht.
361 # Note: Die Funktionen für die Zwischennutzungen benötigen Daten der jeweiligen Vor- und Folgekultur,
362 # deshalb müssen zuerst alle Daten der Hauptkulturen bereitstehen und indexierbar sein.
363 hk = KKClass.kk_hauptkultur(ff)
364
365 # Erstelle nun jahresweise den Kulturkalender inkl. Zwischennutzung
366 kk = []
367 for index_kk, year_kk in enumerate(user_input):
368     # Fall-Nr. der Zwischennutzung
369     fall_kk = year_kk[2]
370     # Kulturnummer der Vorkultur -> ist ID für Datenbank
371     knr_vor = year_kk[0]
372     # Kulturkalender-Daten der Vorkultur
373     hk_vor = hk[index_kk]
374     # Generiert next_index_kk um per Index auf die Folgekultur zuzugreifen
375     next_index_kk = index_kk + 1
376     # Wenn nächster Index Limit (Anzahl Jahre) überschreitet, wird wieder erstes Element genommen
377     # Note: Dadurch schliesst der Kulturkalender nach N ganzen Jahren wieder am Tag des Beginns
378     if next_index_kk == len(user_input):
379         next_index_kk = 0
380     # Kulturkalender-Daten der Folgekultur
381     hk_folge = hk[next_index_kk]
382
383     # Erstelle den Kulturkalender abhängig vom Fall der Zwischennutzung
384     if fall_kk <= 4:
385         kk_mit_zn = KKClass.kk_zn_fall1234(hk_vor, hk_folge)
386     elif fall_kk == 5 or fall_kk == 55:
387         kk_mit_zn = KKClass.kk_zn_fall5(hk_vor, hk_folge, knr_vor)
388     elif fall_kk == 6:
389         kk_mit_zn = KKClass.kk_zn_fall6(hk_vor, hk_folge, knr_vor)
390     elif fall_kk == 8:
391         kk_mit_zn = KKClass.kk_zn_fall8(hk_vor, hk_folge)
392
393     # Füge alle Listen der jährlichen Kulturkalender in einer Liste kk zusammen
394     kk.append(kk_mit_zn)
```

Abbildung 4.13: Scriptausschnitt C-Faktor-Tool: Erstellung des Kulturkalenders (Kupferschmied 2018)

Die vorgestellten Funktionen zeigen exemplarisch auf, wie die Kalenderdaten zu den Hauptkulturen und Zwischennutzungen im C-Faktor-Tool ermittelt werden können. Diese Funktionen werden nun verwendet, um den Kulturkalender nach dem Vorgehen der angepassten Berechnungsweise für eine beliebige Fruchtfolge zu erstellen. Die Funktion der Hauptkulturen kann als Argument eine Liste mit den Kulturnummern aller Hauptkulturen der Fruchtfolge verarbeiten, weshalb zuerst eine solche Liste aus den Benutzereingaben generiert und für die Ermittlung der Kalenderdaten aller Hauptkulturen verwendet wird (Abb. 4.13, Zeilen 358, 363). In einem zweiten Schritt wird zu jedem Jahr der Fruchtfolge die Zwischennutzung aus der Benutzereingabe ermittelt (Abb. 4.13, Zeile 369) und unter Verwendung der entsprechenden Funktion der Kulturkalender für das Jahr ergänzt. Dazu benötigen die Funktionen der Zwischennutzungs-Fälle Angaben zur Kulturnummer der Hauptkultur vom jeweiligen Jahr (Abb. 4.13, Zeile 371), sowie die Listen mit den Kalenderdaten der aktuellen und der folgenden Hauptkultur (Abb. 4.13, Zeilen 373, 381). Um im

for-Loop die Vor- und Folgekultur einer Zwischennutzung über einen Index ansteuern zu können, ohne dass dieser über die Länge der Liste hinaus geht und dadurch einen Fehler im Programm verursacht, wird die Folgekultur jeweils über einen *next_index* definiert. Dieser wird beim Erreichen des letzten Jahres der Fruchtfolge auf 0 zurückgesetzt und gibt dadurch als Folgekultur für das letzte Jahr wieder die erste Kultur der Fruchtfolge an (Abb. 4.13, Zeilen 375-379). So schliesst die letzte Kulturperiode der Fruchtfolge am gleichen Tag wie die erste begonnen hat, was eine Fruchtfolge aus ganzen Jahren ergibt und wichtig für eine korrekte Berechnung des C-Faktors ist (vgl. Kapitel 4.1.2). Diese technische Lösung für das Problem der rückbezüglichen Abhängigkeit innerhalb der Fruchtfolge wurde mit Hilfe von Lukas Vonlanthen (CDE) erarbeitet. Mit der Kulturnummer der Vorkultur und den Kalenderdaten der Vor- und Folgekultur kann anschliessend für jedes Jahr die entsprechende Funktion der Zwischennutzung zur Vervollständigung der Kulturperioden ausgeführt (Abb. 4.13, Zeilen 384-391) und die Daten von jedem Jahr zum Kulturkalender der Fruchtfolge zusammengefügt werden (Abb. 4.13, Zeile 394). Im C-Faktor-Tool entspricht der Kulturkalender der ganzen Fruchtfolge einer Liste, welche wiederum für jede Hauptkultur und damit jedes Jahr der Fruchtfolge eine Liste mit den jeweiligen Kalenderdaten der Kulturperioden in Form des Tages im Jahr enthält (vgl. Abb. 4.5 und 4.22). Mit dieser Liste kann in der angepassten Berechnungsweise nun zu jedem Datum der entsprechende R-Anteil ermittelt werden.

4.2.5 Berechnung Schritt 3: Berechnung der Relativen R-Anteile (RRA)

Die Berechnung der relativen R-Anteile von Kulturperioden verläuft in der angepassten Berechnungsweise sehr ähnlich wie beim herkömmlichen ABAG-Verfahren. Der einzige Unterschied besteht in der Auswirkung der Region auf die R-Anteile zu den Kalenderdaten. In der Datengrundlage zum R-Faktor von Schmidt et al. (2016) stehen Datensätze für das schweizerische Talgebiet und das Hügel- bzw. Berggebiet zur Verfügung. Dadurch lassen sich die Daten von Schmidt et al. (2016) in der angepassten Berechnungsweise gut zusammen mit den Kulturkalender-Datensätzen von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) verwenden, welche ebenfalls in Tal- und Hügelgebiet unterscheiden. In der Berechnung werden abhängig von der gewählten Region zuerst zu den Kalenderdaten aller Kulturperioden einer Fruchtfolge die entsprechenden R-Anteile aus der DB gelesen.

Zur Bestimmung dieser R-Anteile existiert im C-Faktor-Tool wieder eine Funktion, welche bei der Berechnung der relativen R-Anteile der Fruchtfolge aufgerufen wird. Wie die Funktionen des Kulturkalenders verwendet die Funktion *r_anteil* ein globales Argument zur Bestimmung der Region, welche bestimmt auf welche Tabelle in der DB zugegriffen werden soll (Abb. 4.14, Zeilen 425, 439-451). Zudem erhält die Funktion bei der Berechnung den Kulturkalender der Fruchtfolge als Argument und liest daraus zu jedem Kalenderdatum den entsprechenden R-Anteil aus der Datenbank. Das Vorgehen ist dabei durch die Struktur

```

422 .....# Definition der Funktion r_anteil
423 .....#-----
424 .....
425 ▾ .....def r_anteil(self, kalender):
426 .....    """Die Funktion r_anteil liest von jeder Kultur für jedes Kalenderdatum den
427 .....    entsprechenden relativen R-Anteil aus der Datenbank.
428 .....    Das Argument kalender muss der komplette Kulturkalender der Fruchtfolge sein.
429 .....    Die Query wird abhängig von der klassenweit gültigen Region (self) bestimmt.
430 .....    Die Query enthält einen Platzhalter über welchen der Zugriffsort variiert wird.
431 .....    Die Funktion erstellt in einem äusseren Loop für jedes Jahr im kalender erneut
432 .....    die Liste r_jahr, führt in einem inneren Loop die Query mit date als Zugriffsort
433 .....    aus und schreibt die ausgelesenen Werte in r_jahr. Aufgrund des Dateiformats in
434 .....    der Datenbank sind diese Werte Tuples und müssen zu Integers konvertiert werden.
435 .....    Im äusseren Loop wird die Liste mit den Integer-Werten (rj) für jedes Jahr an
436 .....    die Liste r_ff gehängt."""
437 .....
438 .....    # Bestimme Query abhängig von Region
439 ▾ .....    if self.region is 'tal':
440 ▾ .....        query_r = """
441 .....        SELECT "R_Proz_Tal"
442 .....        FROM "R_Tal" as r
443 .....        WHERE r."R_Tag_Tal" = %s
444 .....        """
445 .....
446 ▾ .....    elif self.region is 'hug':
447 ▾ .....        query_r = """
448 .....        SELECT "R_Proz_Hug"
449 .....        FROM "R_Hug" as r
450 .....        WHERE r."R_Tag_Hug" = %s
451 .....        """
452 .....
453 .....    # Erstelle leere Liste r_ff in welche die Listen r_jahr für die gesamte Fruchtfolge geschrieben werden
454 .....    r_ff = []
455 .....
456 .....    # Äusserer for-Loop über die Listen (=Jahre) im kk.
457 ▾ .....    for year in kalender:
458 .....        # Im äusseren Loop wird die leere Subliste r_jahr erstellt
459 .....        r_jahr = []
460 .....
461 .....        # Innerer Loop schreibt die R-Anteile für jedes Datum eines Jahres in die Liste r_jahr
462 ▾ .....        for date in year:
463 .....            cursor.execute(query_r, [date])
464 ▾ .....            for record in cursor:
465 .....                r_jahr.append(record)
466 .....                # Datatype real in Datenbank führt zu Tuples in r_jahr -> die Liste rj besteht aus Integer
467 .....                rj = [i[0] for i in r_jahr]
468 .....                r_ff.append(rj)
469 .....
470 .....    return r_ff

```

Abbildung 4.14: Scriptausschnitt C-Faktor-Tool: Definition der Funktion zur Bestimmung der R-Anteile von Kalenderdaten (Kupferschmied 2018)

des Kulturkalenders vorgegeben. Für jedes Jahr, also jede Liste, wird in dieser Funktion ebenfalls eine Liste erstellt und die R-Anteile zu jedem Datum eingetragen (Abb. 4.14, Zeilen 425, 454-468). Der Output der Funktion ist analog zum Kulturkalender der Fruchtfolge eine Liste mit Listen zu jedem Jahr, welche nun die R-Anteile der Kalenderdaten enthalten. Zur Bestimmung der relativen R-Anteile der Kulturperioden muss nun jeweils der R-Anteil des Enddatums einer Periode von jenem zu Beginn der Kulturperiode subtrahiert werden (vgl. Abb. 4.6). Enthält eine Kulturperiode einen Jahreswechsel, so ist allerdings der R-Anteil zu Beginn der Periode im alten Jahr höher, als jener am Ende der Periode im neuen Jahr, da die R-Anteile den kumulativen Summenprozent eines Jahres entsprechen. In diesem Fall muss in der Berechnung der R-Anteil am Ende der Kulturperiode um 1 erhöht werden, da die Summenprozente von 0-1 gehen, was 0-100% entspricht. Um diese Anpassung bei der Berechnung nicht einzeln prüfen und durchführen zu müssen, wurde dazu ebenfalls

eine kleine Funktion namens *rdiff* geschrieben, welche in der angepassten Berechnung die Subtraktion durchführt und die Daten dabei gleich auf allfällige Jahreswechsel in den Kulturperioden hin überprüft und gegebenenfalls anpasst. Die Berechnung der relativen R-Anteile aller Kulturperioden der Fruchtfolge ist dadurch einfach zu operationalisieren und umfasst abgesehen von den Funktionen nur wenige Zeilen Code im C-Faktor-Tool (Abb. 4.15). Nach dem Bestimmen der Region (Abb. 4.15, Zeile 503) und den R-Anteilen der Kalenderdaten (Abb. 4.15, Zeile 506) über die Funktion *r_anteil* werden für die Kulturperioden der Fruchtfolge jahresweise die relativen R-Anteile als Differenz zwischen dem End- und Anfangsdatum jeder Periode berechnet (Abb. 4.15, Zeilen 511-518). Der Output dieser Berechnung ist ebenfalls eine Liste aus Listen zu jedem Jahr der Fruchtfolge. Die RRA-Werte in den Jahreslisten entsprechen nun allerdings den Kulturperioden selbst und nicht mehr wie beim Kulturkalender und dessen R-Anteilen den Kalenderdaten für Anfang und Ende der Perioden.

```
499 # Berechnung RRA
500 #*****
501
502 # Nutze input_region als globales self-Argument der Klasse rra
503 RRAClass = rra(input_region)
504
505 # Erstelle Liste r_anteile in welcher jedes Jahr eine Liste mit R-Anteilen je Datum ist
506 r_anteile = RRAClass.r_anteil(kk)
507
508 # RRA-Werte für alle Perioden von jedem Jahr der Fruchtfolge
509 rra_ff = []
510
511 for year_rra in r_anteile:
512     rra_jahr = []
513     x = 1
514     while x < len(year_rra):
515         diff = RRAClass.rdiff(year_rra[x-1], year_rra[x])
516         rra_jahr.append(diff)
517         x += 1
518     rra_ff.append(rra_jahr)
```

Abbildung 4.15: Scriptausschnitt C-Faktor-Tool: Berechnung der Relativen R-Anteile (RRA) einer Fruchtfolge (Kupferschmied 2018)

4.2.6 Berechnung Schritt 4: Ermittlung der Relativen Bodenabträge (RBA)

Die relativen Bodenabträge der Kulturperioden einer Fruchtfolge hängen von den Angaben zu Haupt- und Zwischennutzung, sowie deren Bodenbearbeitungsverfahren ab (vgl. Abb. 4.6). Die Hauptkultur und ihr Bodenbearbeitungsverfahren bestimmen die RBA-Werte der ersten fünf Kulturperioden eines jeden Jahres von der Bodenbearbeitung bis zur Ernte der Hauptkultur. Die Zwischennutzung definiert anschliessend, ob in der Zeit bis zur nächsten Hauptkultur lediglich eine sechste Periode oder im Falle einer Zwischenkultur mehrere Kulturperioden an die fünf der Hauptkultur angehängt werden. Von der Art der Zwischennutzung hängen dann auch die RBA-Werte der Zwischenperioden ab. Im Falle einer

Zwischenkultur wie in den Fällen 5 und 6 ist zusätzlich das Bodenbearbeitungsverfahren der Zwischenkultur entscheidend für deren RBA-Werte. In allen anderen Fällen hängt der RBA-Wert der Zwischenperiode entweder von der Bodenbearbeitung der Hauptkultur ab oder ist eine fallspezifische Konstante wie bei der Schwarzbrache in Fall 4. Im Folgenden wird die Bestimmung der RBA-Werte nach dem Verfahren der angepassten Berechnungsweise für jeden Zwischennutzungs-Fall beschrieben.

Das Vorgehen zur Bestimmung der RBA-Werte ist für die Fälle 1 bis 3 identisch, da bei diesen Fällen die Zeit zwischen zwei Hauptkulturen durch eine einzige Kulturperiode mit dem RBA-Wert der sechsten Periode der Vorkultur definiert wird (vgl. Kapitel 4.2.3.1, 4.2.3.2, 4.2.3.3). Der RBA-Wert zur sechsten Periode einer Hauptkultur entspricht in der Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) jeweils dem kulturspezifischen Wert einer Fläche nach der Ernte aber noch vor einer Bodenbearbeitung. Dieser Zustand wird als Stoppelbrache bezeichnet, da nach der Ernte keine eigentliche Kultur aber dennoch die Erntereste der Vorkultur auf dem Acker vorliegen. Da Grösse und Menge der Erntereste und damit deren Erosionsschutzwirkung durch die Bodenbedeckung von der Vorkultur abhängen, sind die RBA-Werte von Stoppelbrachen durch die Vorkultur und ihr Bodenbearbeitungsverfahren bestimmt. Bei den Zwischennutzungs-Fällen 2 und 3 verbleibt nach der Vorkultur eine Stoppelbrache während wenigen Wochen oder einigen Monaten bis zur Bodenbearbeitung der Folgekultur auf dem Acker (vgl. Kapitel 4.2.3.2, 4.2.3.3). Unabhängig von der Dauer bis zur nächsten Kultur wird diese Übergangsphase durch eine einzelne sechste Kulturperiode von der Ernte der Vor- bis zur Bodenbearbeitung der Folgekultur beschrieben und erhält den RBA-Wert der Kulturperiode von der Vorkultur für die Stoppelbrache. Im Zwischennutzungs-Fall 1 verbleibt zwar nicht explizit eine Stoppelbrache, da die Phase bis zur Folgekultur nur wenige Tage dauert und entsprechend nicht als Zwischennutzung definiert wird. Faktisch liegt jedoch in diesen Tagen zwischen Ernte und Bodenbearbeitung eine Stoppelbrache vor und die Phase wird analog zu den Fällen 2 und 3 durch eine Kulturperiode mit dem RBA-Wert von Periode 6 der Vorkultur beschrieben.

Beim Zwischennutzungs-Fall 4 verbleibt ebenfalls eine Brache bis zur nächsten Hauptkultur auf dem Acker und die Phase wird durch eine einzelne Kulturperiode abgedeckt. Hingegen werden bei diesem Fall nach der Ernte durch den Pflugeinsatz bei der Herbstfurche die Erntereste der Vorkultur von der Ackerfläche entfernt und über den Winter eine gepflügte Schwarzbrache stehen gelassen. Da die Vorkultur und deren Bodenbearbeitung nach diesem Pflugeinsatz keine direkte Auswirkung mehr auf den relativen Bodenabtrag haben, wird der Schwarzbrache in dieser sechsten Periode ein konstanter RBA-Wert von 0.32 (Prasuhn 2017, unveröffentlicht: 6) zugeteilt. Der Pflugeinsatz der Herbstfurche wirkt sich hingegen negativ auf den relativen Bodenabtrag der nächsten Hauptkultur aus, weshalb als Bodenbearbeitungsverfahren für Hauptkulturen nach dem Zwischennutzungs-Fall 4 zwingend Pflugeinsatz angegeben werden muss. Diese Abhängigkeit ist mit dem gewählten

technischen Ansatz bei der Operationalisierung der Berechnungsweise aber nicht direkt im Python-Script realisierbar und muss vom Benutzer bei der Anwendung des Tools berücksichtigt werden. Solche Einschränkungen werden grundsätzlich über die graphische Benutzeroberfläche gemacht und können bei der Entwicklung der WebGIS-Applikation eingebaut werden (vgl. Kapitel 5.2).

Beim Zwischennutzungs-Fall 5 folgt auf die Vorkultur eine Zwischenkultur mit eigenen Kulturperioden analog zu jenen der Hauptkulturen. Die kurze Phase von wenigen Tagen zwischen der Ernte der Vorkultur und der Bodenbearbeitung der Zwischenkultur wird durch die Kulturperiode 6 der Vorkultur mit ihrem RBA-Wert der Stoppelbrache abgedeckt. Die RBA-Werte der Zwischenkultur hängen einerseits von deren Bodenbearbeitungsverfahren und andererseits von der Art der Zwischenfrucht ab. Dabei wird in abfrierende und winterharte Zwischenkulturen unterschieden, welche in den späteren Kulturperioden leicht unterschiedliche RBA-Werte aufweisen. Während die Kulturperioden selbst bei beiden identisch sind und beim Kulturkalender für den Fall 5 keine Unterscheidung nötig ist, wird bei der Bestimmung der RBA-Werte in zwei Fälle 5a für abfrierendes und 5b für winterhartes Zwischenfutter differenziert. Für die sechs Kulturperioden der beiden Zwischenkulturen ab deren Bodenbearbeitung bis zur Bodenbearbeitung der folgenden Hauptkultur stehen wie für Hauptkulturen jeweils sechs individuelle RBA-Werte zur Verfügung (Anhang A2).

Der sechste Zwischennutzungs-Fall ist dem fünften sehr ähnlich. Auch bei diesem Fall folgt auf die Vorkultur eine Zwischenkultur, jedoch wird diese im Spätherbst geerntet und über den Winter verbleibt eine Schwarzbrache. Die RBA-Werte für die Übergangsphase zwischen Vor- und Zwischenkultur, sowie deren ersten fünf Kulturperioden bis zur Ernte werden analog zu Fall 5 bestimmt, wobei für das Herbstzwischenfutter ebenfalls eigene RBA-Werte in den Datensätzen vorhanden sind (Anhang A2). Die sechste Kulturperiode der Zwischenkultur, bzw. die zwölfte Periode des Jahres wenn jene der Vorkultur mitgezählt werden, welche der Phase zwischen der Ernte der Zwischenkultur und der Bodenbearbeitung der Folgekultur entspricht, erhält analog zu Fall 4 den RBA-Wert 0.32 für eine gepflügte Schwarzbrache.

Der achte Zwischennutzungs-Fall ist im Rahmen der angepassten Berechnungsweise speziell für die Implementierung von mehrjährigen Kunstwiesen entwickelt worden. Dieser Fall wird ausschliesslich nach einer Kunstwiese als Zwischennutzung gewählt. Er hängt an die theoretische Ernte der Kunstwiese eine sechste Kulturperiode bis zur Bodenbearbeitung der Folgekultur an und verwendet für die Periode den RBA-Wert 0.004 einer vollständig entwickelten Kunstwiese (Prasuhn 2017, unveröffentlicht: 3). Dadurch wird bei der Berechnung des C-Faktors gewährleistet, dass die Kunstwiese aufgrund des RBA-Werts faktisch auf dem Feld bestehen bleibt. Um mehrjährige Kunstwiesen zu ermöglichen wurde für die angepasste Berechnungsweise zusätzlich die auswählbare Hauptkultur *Kunstwiese Folgejahre* integriert. Diese ermöglicht durch das Verwenden der RBA-Konstante 0.004 für alle Kulturperioden ebenfalls ein faktisches Fortbestehen von Kunstwiese bei der C-Faktor-Berechnung.

```

822 # Definition der Funktion rba_zn_fall6
823 # -----
824 #
825 def rba_zn_fall6(self, knr, bbhk, bbzk):
826     """Die Funktion rba_zn_fall6 liest für den Zwischennutzungs-Fall 6 die Werte
843     """
844     # Bestimme Query der Hauptkultur abhängig von der Bodenbearbeitung bbhk
845     if bbhk is 'pflug':
846         query_rba_hk = """
847         SELECT "RBA_Pflug_P1", "RBA_Pflug_P2", "RBA_Pflug_P3", "RBA_Pflug_P4", "RBA_Pflug_P5", "RBA_Pflug_P6"
848         FROM "RBA_Pflug" as rbapf
849         WHERE rbapf."RBA_Pflug_Knr" = %s
850         """
851     elif bbhk is 'mulch_u30':
852         query_rba_hk = ""
853     elif bbhk is 'mulch_o30':
854         query_rba_hk = ""
855     elif bbhk is 'direktsaat':
856         query_rba_hk = ""
857     #
858     #
859     # Bestimme Query der Zwischenkultur abhängig von der Bodenbearbeitung bbzk
860     if bbzk is 'pflug':
861         query_rba_zk = ""
862     elif bbzk is 'mulch_u30':
863         query_rba_zk = ""
864     elif bbzk is 'mulch_o30':
865         query_rba_zk = ""
866     elif bbzk is 'direktsaat':
867         query_rba_zk = ""
868     #
869     #
870     # Liesst die RBA-Werte der Hauptkultur aus der Datenbank und erstellt rba_hk
871     cursor.execute(query_rba_hk, [knr])
872     for record in cursor:
873         rba_hk = list(record)
874     #
875     #
876     # Liesst die RBA-Werte der Zwischenkultur aus der Datenbank und erstellt rba_zk
877     cursor.execute(query_rba_zk)
878     for record in cursor:
879         rba_zk = list(record)
880     # Hängt den Wert 0.32 für eine Schwarzbrache in Kulturperiode 6 an
881     rba_zk.append(0.32)
882     #
883     #
884     # Füge rba_hk und rba_zk zu rba_fall zusammen
885     rba_fall = list(rba_hk + rba_zk)
886     return rba_fall

```

Abbildung 4.16: Scriptausschnitt C-Faktor-Tool: Definition der Funktion zur RBA-Bestimmung für den Zwischennutzungs-Fall 6 *Herbstzwischenfutter vor Schwarzbrache im Winter*. Hinweis: Der Beschreibungstext und alle Queries ausser der Ersten sind auf der Abbildung minimiert (Kupferschmied 2018)

Zur technischen Operationalisierung der RBA-Bestimmung nach der angepassten Berechnungsweise werden wie beim Kulturkalender für jeden Zwischennutzungs-Fall eigene Funktionen definiert. Anhand der Funktion zum Fall 6 (Abb. 4.16) kann exemplarisch aufgezeigt werden, wie die Fälle operationalisiert sind. Die Funktionen arbeiten mit der Kulturnummer der aktuellen Hauptkultur, deren Bodenbearbeitung und gegebenenfalls der Bodenbearbeitung der Zwischenkultur als Argumente (Abb. 4.16, Zeile 825). Durch die Angabe der Bodenbearbeitungsverfahren wird die passende Query und damit die Tabelle mit den entsprechenden RBA-Werten angesteuert (Abb. 4.16, Zeilen 844-897, 904, 909). Für die Fälle 5 (a, b) und 6 müssen zusätzlich die RBA-Werte der Zwischenkultur aus der DB gelesen werden, weshalb diese Fälle auch die Bodenbearbeitung der Zwischenkultur als Argument benötigen und über vier zusätzliche Queries verfügen. Über die Queries wird ebenfalls die für den jeweiligen Fall benötigte Anzahl Kulturperioden definiert. Über die Kulturnummer der Hauptkultur werden deren RBA-Werte inklusive dem der Stoppelbrache

aus der Datenbank gelesen und in eine Liste geschrieben (Abb. 4.16, Zeilen 904-906). Die RBA-Werte der Zwischenkultur sind durch den Fall definiert (abfrierend, winterhart, Herbstzwischenfutter) und werden über die entsprechenden Queries direkt ausgelesen (Abb. 4.16, Zeilen 909-911). Konstanten für die Schwarzbrache oder Kunstwiese werden direkt als Zahlenwert in die Liste integriert (Abb. 4.16, Zeile 913). Im Falle von Zwischenkulturen werden die Listen der Haupt- und Zwischenkultur zusammengefügt (Abb. 4.16, Zeile 916), sodass von der Funktion eine Liste mit den RBA-Werten der Kulturperioden ausgegeben wird.

```

1001 # Berechnung RBA
1002 #*****
1003
1004 # Die Klasse rba wird ohne globales Argument genutzt
1005 RBAClass = rba()
1006
1007 # Erstelle jahresweise die Listen rba_jahr und füge jede in rba_ff an
1008 rba_ff = []
1009 for index_rba, year_rba in enumerate(user_input):
1010     # Kulturnummer der Hauptkultur -> ist ID für Datenbank
1011     knr_rba = year_rba[0]
1012     # Bodenbearbeitungsmethode der Hauptkultur
1013     bbhk_rba = year_rba[1]
1014     # Fall-Nr. der Zwischennutzung
1015     fall_rba = year_rba[2]
1016     # Bodenbearbeitungsmethode der Zwischennutzung
1017     bbzk_rba = year_rba[3]
1018     ...
1019     # Erstelle Liste rba_jahr mit den RBA-Werten abhängig vom Fall der Zwischennutzung
1020     if fall_rba <= 3:
1021         rba_jahr = RBAClass.rba_zn_fall123(knr_rba, bbhk_rba)
1022     elif fall_rba == 4:
1023         rba_jahr = RBAClass.rba_zn_fall4(knr_rba, bbhk_rba)
1024     elif fall_rba == 5:
1025         rba_jahr = RBAClass.rba_zn_fall5a(knr_rba, bbhk_rba, bbzk_rba)
1026     elif fall_rba == 55:
1027         rba_jahr = RBAClass.rba_zn_fall5b(knr_rba, bbhk_rba, bbzk_rba)
1028     elif fall_rba == 6:
1029         rba_jahr = RBAClass.rba_zn_fall6(knr_rba, bbhk_rba, bbzk_rba)
1030     elif fall_rba == 8:
1031         rba_jahr = RBAClass.rba_zn_fall8(knr_rba, bbhk_rba)
1032     ...
1033     # Füge alle Listen der jährlichen RBA-Werte in einer Liste rba_ff zusammen
1034     rba_ff.append(rba_jahr)

```

Abbildung 4.17: Scriptausschnitt C-Faktor-Tool: Bestimmung der Relativen Bodenabträge einer Fruchtfolge (Kupferschmied 2018)

Sind die verschiedenen Fälle einmal als Funktionen definiert und abrufbar, ist die eigentliche Bestimmung der RBA-Werte der Fruchtfolge vergleichsweise einfach. In einem for-Loop werden für jedes Jahr die von den Funktionen benötigten Argumente wie Kulturnummer und Bodenbearbeitung der Hauptkultur, sowie Bodenbearbeitung der Zwischennutzung als Variablen definiert (Abb. 4.17, Zeilen 1011, 1013, 1017). Diese Angaben werden über Indices direkt aus der Liste der Benutzereingaben (vgl. Abb. 4.8) gelesen. Zusätzlich wird die Nummer des Zwischennutzungs-Falles vom jeweiligen Jahr bestimmt, um damit

anschliessend die entsprechende Funktion unter Verwendung der definierten Argumente auszuführen (Abb. 4.17, Zeilen 1015, 1020-1031). Die Fallnummer 5 entspricht dabei der abfrierenden (5a), die Fallnummer 55 der winterharten Zwischenkultur (5b). Der Output ist eine Liste aus Listen mit den RBA-Werten zu den Kulturperioden von jedem Jahr im gleichen Format wie die RRA-Liste (vgl. Kapitel 4.2.5 und Abb. 4.22).

4.2.7 Berechnung Schritt 5: Bestimmung und Verrechnung der Korrekturfaktoren

Bei der angepassten Berechnungsweise des C-Faktors müssen die RBA-Werte aufgrund von Carry-over-Effekten (vgl. Kapitel 2.3.2) gegebenenfalls noch mit bestimmten Korrekturfaktoren verrechnet werden. Ob und welche Korrekturfaktoren zum Einsatz kommen hängt von den Hauptkulturen der Fruchtfolge und deren Bodenbearbeitungsverfahren ab (vgl. Abb. 4.6). Am stärksten wirken sich die Korrekturfaktoren jeweils beim Pflugverfahren aus, während bei Direktsaatverfahren nur geringe oder keine Korrekturen wirksam werden. Nach der Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht: 9, 10) gibt es drei verschiedene Bedingungen, welche eine Korrektur veranlassen:

- Kunstwiese war Vorkultur
- Blattfruchtanteil der Fruchtfolge liegt bei 50% oder höher
- Wurzelfrucht war Vorkultur von Getreide oder Raps

Ist mindestens eine dieser Bedingungen erfüllt, werden die RBA-Werte der betroffenen Hauptkultur(en) um bestimmte Faktoren korrigiert. Die RBA-Werte von Zwischenkulturen bei den Zwischennutzungs-Fällen 5 und 6 werden grundsätzlich nicht korrigiert, wohl aber die RBA-Werte der jeweils sechsten Kulturperiode (E-BB) in den Fällen 1 bis 4. Kunstwiese und damit auch der Zwischennutzungs-Fall 8 sind selbst von keiner Korrektur betroffen. Je nach Bedingung existieren in den Datensätzen unterschiedliche Korrekturfaktoren (vgl. Anhang A4.1), wobei für eine Kultur in der Fruchtfolge auch mehrere Faktoren angewendet werden können. Zur Übersicht werden die möglichen Korrekturfälle kurz erläutert.

Wenn in der Fruchtfolge auf eine Kunstwiese eine beliebige Hauptkultur, ausser Kunstwiese selbst, folgt, so werden die RBA-Werte dieser Hauptkultur aufgrund des positiven Carry-over-Effekts der Kunstwiese (vgl. Kapitel 2.3.2) um bestimmte Faktoren reduziert. Dabei liegen abhängig von der Bodenbearbeitung der zu korrigierenden Hauptkultur für jede der sechs Kulturperioden individuelle Korrekturfaktoren vor (vgl. Anhang A4.1). Mit der Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) könnten die Korrekturfaktoren für Kunstwiese analog zum Verfahren von Mosimann & Rüttimann (2006) etwas abgeschwächt auch noch auf die übernächste Kultur im zweiten Jahr nach der Kunstwiese angewendet werden. Dies wurde bei der angepassten Berechnungsweise mit Blick auf deren Operationalisierung weggelassen, da die technische Umsetzung der Korrekturfaktoren bereits

sehr komplex ausfällt und die Auswirkungen auf den C-Faktor in den meisten Fällen vernachlässigbar sind. Mit der Datengrundlage besteht jedoch grundsätzlich die Möglichkeit dies nachträglich zum Beispiel bei der Entwicklung der WebGIS-Applikation bei Bedarf zu implementieren.

Wenn der Blattfruchtanteil der ganzen Fruchtfolge bei 50% oder höher liegt, werden die RBA-Werte aller Blattfrüchte aufgrund ihrer negativen Auswirkungen auf die Fruchtfolge (vgl. Kapitel 2.3.2) um einen bestimmten Faktor erhöht. Zu den Blattfrüchten zählen bspw. Mais, Raps, Rüben oder Kartoffeln (vgl. Anhang A4.1, A4.2). Dabei existiert abhängig von der Bodenbearbeitung der jeweiligen Blattfrucht ein einzelner Korrekturfaktor, der auf alle sechs Kulturperioden angewendet wird. Falls die Blattfrucht auf eine Kunstwiese folgt, so wird ebenfalls abhängig von der Bodenbearbeitung ein entsprechend abgeschwächter Korrekturfaktor angewandt, der den positiven Einfluss der Kunstwiese berücksichtigt. Jedoch wird auch im Fall Blattfrucht nach Kunstwiese nur ein einziger Korrekturfaktor für alle sechs Kulturperioden der Blattfrucht angewendet und nicht, wie bei der alleinigen Korrektur zum Kunstwieseneinfluss, ein individueller Faktor zu jeder Kulturperiode verwendet.

Wenn auf eine Wurzelfrucht ein Getreide oder Raps folgt, so werden die RBA-Werte des Getreides bzw. Raps aufgrund des negativen Carry-over-Effekts der vorangehenden Wurzelfrucht (vgl. Kapitel 2.3.2) um einen bestimmten Faktor erhöht. Zu den Wurzelfrüchten zählen etwa Rüben oder Kartoffeln (vgl. Anhang A4.1, A4.2). Der Korrekturfaktor ist abhängig vom Bodenbearbeitungsverfahren der betroffenen Getreide- oder Rapskultur und wird auf deren Kulturperioden angewendet. Da der Kunstwieseneinfluss im zweiten Folgejahr in der angepassten Berechnungsweise nicht berücksichtigt wird und da die Vorkultur bekanntlich eine Wurzelfrucht ist, benötigt es für diesen Korrekturfaktor keine Anpassung an die Kunstwiese. Allerdings ist Raps eine Blattfrucht und kann zusätzlich zum Korrekturfaktor einer vorangegangenen Wurzelfrucht auch vom Korrekturfaktor für Blattfrüchte betroffen sein. In diesem Fall werden die beiden Korrekturfaktoren für den Blattfruchtanteil und für die Wurzelfrucht als Vorkultur einzeln auf die unkorrigierten RBA-Werte vom Raps angewendet und der Durchschnitt daraus berechnet. Dieser Durchschnitt aus beiden Korrekturen ist als korrigierter RBA-Wert zu verwenden. Bei Getreide ist dies nicht nötig, da es nicht wie Raps zu den Blattfrüchten zählt.

In der angepassten Berechnungsweise werden die RBA-Werte bei Bedarf mit den entsprechenden Korrekturfaktoren verrechnet und zusammen mit den nicht zu korrigierenden Werten in einer neuen Liste als korrigierte RBA-Werte gespeichert, um die weitere Berechnung des C-Faktors zu vereinfachen (vgl. Abb 4.6).

Die technische Umsetzung der Korrekturfaktoren im C-Faktor-Tool ist komplex und wurde teilweise mit der Hilfe von Lukas Vonlanthen (CDE) realisiert. Die drei Bedingungen Kunstwiese, Blattfruchtanteil und Wurzelfrucht und ihr jeweiliges Vorgehen bei der Korrektur

```

1124 def korr_blattfrucht(self, unkorr_rba, bb, zuordnung_vorjahr):
1125     """Die Funktion korr_blattfrucht korrigiert die RBA-Werte von Blattfrüchten in
1139     ...
1140     # Korrekturfaktoren für Blattfrüchte abhängig von der Bodenbearbeitung und
1141     # davon ob die Vorkultur eine Kunstwiese war
1142     korr_data = {
1143         # [Ohne Kunstwieseneinfluss, Mit Kunstwieseneinfluss]
1144         'pflug': [1.50, 1.39],
1145         'mulch_u30': [1.35, 1.21],
1146         'mulch_o30': [1.20, 1.16],
1147         'direktsaat': [1.00, 1.00]
1148     }
1149     # Über index wird abhängig von zuordnung_vorjahr der Korrekturfaktor aus korr_data gewählt
1150     index = 0 if zuordnung_vorjahr != 'K' else 1
1151     korr_faktoren = korr_data[bb][index]
1152     # Korrigiert die RBA-Werte um den gewählten Korrekturfaktor und hängt sie der Liste korr_rba an
1153     korr_rba = []
1154     for i, value in enumerate(unkorr_rba):
1155         # Nur die RBA-Werte der Hauptkultur werden korrigiert (ersten sechs Kulturperioden eines Jahres)
1156         if i < 6:
1157             value = value * korr_faktoren
1158     korr_rba.append(value)
1159     return korr_rba

```

Abbildung 4.18: Scriptausschnitt C-Factor-Tool: Definition der Funktion zum Korrekturfaktor für den Blattfruchtanteil der Fruchtfolge. Hinweis: Der Beschreibungstext ist auf der Abbildung minimiert (Kupferschmied 2018)

sind im Python-Script als Funktionen definiert. Die Funktionen verwenden grundsätzlich die unkorrigierten RBA-Werte und die Bodenbearbeitung der betroffenen Hauptkultur als Argumente (Abb. 4.18, Zeile 1124). Im Falle der Blattfruchtkorrektur ist zusätzlich eine Information zur Zuordnung der Vorkultur nötig, welche anschliessend näher erklärt wird, damit im Falle einer vorangegangenen Kunstwiese der entsprechende Korrekturfaktor verwendet werden kann (Abb. 4.18, Zeilen 1124, 1151-1152). Der Korrekturfaktor wird in der Liste der unkorrigierten RBA-Werte nun auf die ersten sechs Kulturperioden der Hauptkultur angewendet und die korrigierten Werte in eine neue Liste geschrieben (Abb. 4.18, Zeilen 1154-1160). Das Vorgehen bei den Funktionen zu den anderen beiden Fällen ist ähnlich zum hier genannten.

Um zu wissen, ob eine Bedingung gegeben ist, müssen die Hauptkulturen der Fruchtfolge auf ihre Zugehörigkeit zu Kunstwiese, Blattfrüchten, Wurzelfrüchten, sowie Getreide und Raps geprüft werden. Dazu existiert in der DB eine Tabelle, welche jede Hauptkultur diesen Gruppen zuordnet (Anhang A4.2). Über eine Funktion, welche auf diese Tabelle zugreift, wird eine Liste erstellt, welche die Benutzereingaben zur Fruchtfolge und die Information der Zuordnung enthält (Abb. 4.19, Zeile 1249). Da aber gewisse Kulturen zu mehreren Gruppen gehören bzw. weil für die Berechnung der korrigierten RBA-Werte bei gewissen Fällen eine differenzierte Unterscheidung nötig ist, sind diese in der Tabelle unter verschiedenen Kürzeln aufgeführt. Raps bspw. muss sowohl als Blattfrucht und als Raps (BR) identifiziert werden können, während Kartoffeln sowohl zu den Wurzelfrüchten und den Blattfrüchten zählen (WB). Für die Berechnung werden mit den Informationen aus der DB entsprechende Zuordnungsgruppen gebildet (Abb. 4.19, Zeilen 1252-1256). Der Korrekturfaktor für Blattfrüchte kommt nur bei einem Blattfruchtanteil in der Fruchtfolge von 50% und mehr zum Tragen, weshalb für jede Hauptkultur die Zugehörigkeit zur Blattfruchtgruppe geprüft und der Anteil in der Fruchtfolge berechnet wird (Abb. 4.19,

Zeile 1259). Mit all diesen Angaben kann nun die eigentliche Berechnung der korrigierten RBA-Werte gemacht werden.

```
1245 # Die Klasse korrekturfaktoren wird ohne globales Argument genutzt
1246 KORRclass = korrekturfaktoren()
1247
1248 # Erstelle den user_input_korr mit der Zuordnung der Kulturen zu Getreide, Raps, Kunstwiese, Blatt- oder Wurzelfrucht
1249 user_input_korr = KORRclass.korr_input(user_input)
1250
1251 # Bilde verschiedene Zuordnungsgruppen um alle (Spezial-)fälle zu berechnen
1252 blattfrucht = ['WB', 'B', 'BR']
1253 wurzelfrucht = ['WB']
1254 getreide = ['G']
1255 raps = ['BR']
1256 getreide_raps = getreide + raps
1257
1258 # Berechne den Blattfrucht-Anteil der Fruchtfolge
1259 blattfrucht_anteil = len([x for x in user_input_korr if x[4] in blattfrucht]) / len(user_input_korr)
1260
1261
1262 # Berechne jahresweise die korrigierten RBA-Werte
1263 rba_korr = []
1264 for index_korr, year_korr in enumerate(user_input_korr):
1265     ...
1266     rba_unkorr_jahr = rba_ff[index_korr] ... # unkorrigierter RBA-Wert vom gegenwärtigen Jahr
1267     bb_jahr = year_korr[1] ... # Bodenbearbeitung der Hauptkultur vom gegenwärtigen Jahr
1268     zuordnung_jahr = year_korr[4] ... # Systematische Zuordnung der Hauptkultur vom gegenwärtigen Jahr
1269     ...
1270     # Erstes Jahr
1271     if index_korr == 0:
1272         # Wenn kein Korrekturfaktor angewendet wird, unkorrigierte RBA-Werte übernehmen
1273         rba_korr_jahr = rba_unkorr_jahr
1274         ...
1275         # Korrekturfaktor für Blattfrüchte kann im ersten Jahr bereits eintreten, da auf Kultur selbst angewendet
1276         # Note: Da im ersten Jahr keine zuordnung_vorjahr möglich ist, wird 'not K' als Argument mitgegeben
1277         if blattfrucht_anteil >= 0.5 and zuordnung_jahr in blattfrucht:
1278             rba_korr_jahr = KORRclass.korr_blattfrucht(rba_unkorr_jahr, bb_jahr, 'not K')
1279             ...
1280             rba_korr.append(rba_korr_jahr)
1281             continue
```

Abbildung 4.19: Scriptausschnitt C-Faktor-Tool: Berechnung der korrigierten RBA-Werte. Erstellung der Zuordnungen, Ermittlung des Blattfruchtanteils und Berechnung der korrigierten RBAs für das erste Jahr der Fruchtfolge (Kupferschmid 2018)

Zur Verwendung der vordefinierten Funktionen zu den Korrekturbedingungen müssen deren Argumente für das jeweils aktuelle Jahr im for-Loop aus den Benutzereingaben generiert werden (Abb. 4.19, Zeilen 1266-1268). Da bei der Berechnung der korrigierten RBA-Werte für die Korrekturfaktoren nach Kunstwiese und nach Wurzelfrucht wieder rückbezügliche Abhängigkeiten vorkommen, muss wie schon beim Erstellen des Kulturkalenders das technische Problem mit den Indices ausserhalb der Listengrenze gelöst werden (vgl. Kapitel 4.2.4). Eine Rücksetzung des Index wie beim Kulturkalender ist hier jedoch nicht möglich (Abb. 4.13, Zeilen 374-379). Allerdings ist es so, dass im ersten Jahr der Fruchtfolge keine Vorkultur zu berücksichtigen ist. Und der einzig mögliche Korrekturfaktor im ersten Jahr ist jener des Blattfruchtanteils, da er als einziger auf die den Fall auslösenden Kulturen selbst angewendet wird und kein Carry-over-Effekt auf eine Folgekultur ist. Entsprechend kann das erste Jahr der Fruchtfolge separat berechnet werden (Abb. 4.19, Zeilen 1271-1281), was für die Folgejahre das Indexproblem löst. Für die restlichen Jahre der Fruchtfolge müssen nun eine Reihe von Zuordnungsbedingungen definiert werden (Abb. 4.20, Zeilen 1284-1289) über welche anschliessend geprüft wird, ob und welche Korrekturfaktoren angewendet werden müssen. Die unkorrigierten RBA-Werte werden in eine neue Liste

```

1283 ....# Alle folgenden Jahre
1284 ....zuordnung_vorjahr -= user_input_korr[index_korr-1][4] ....# Systematische Zuordnung der Hauptkultur vom Vorjahr
1285 ....ist_blattfrucht -= zuordnung_jahr.in.blattfrucht
1286 ....war_wurzelfrucht -= zuordnung_vorjahr.in.wurzelfrucht
1287 ....ist_getreide -= zuordnung_jahr.in.getreide
1288 ....ist_raps -= zuordnung_jahr.in.raps
1289 ....ist_getreide_raps -= zuordnung_jahr.in.getreide_raps
1290 ....
1291 ....# Wenn kein Korrekturfaktor angewendet wird, unkorrigierte RBA-Werte übernehmen
1292 ....rba_korr_jahr -= rba_unkorr_jahr
1293 ....
1294 ....# Wende Korrekturfaktor für Kultur nach Kunstwiese an
1295 ....if zuordnung_vorjahr == 'K' and zuordnung_jahr != 'K':
1296 .....rba_korr_jahr -= KORRClass.korr_kunstwiese(rba_unkorr_jahr, bb_jahr)
1297 .....
1298 ....# Wende Korrekturfaktor für Blattfrucht bei Blattfrucht-Anteil > 50% an
1299 ....# Note: Wenn zuordnung_vorjahr == 'K' dann wurden die RBA-Werte beim vorherigen if-Statement bereits korrigiert.
1300 ....# Hier wird nun der Korrekturfaktor für Blattfrucht nach Kunstwiese verwendet und die bereits korrigierten
1301 ....# RBA-Werte in rba_korr_jahr werden überschrieben.
1302 ....if blattfrucht_anteil >= 0.5 and ist_blattfrucht:
1303 .....rba_korr_jahr -= KORRClass.korr_blattfrucht(rba_unkorr_jahr, bb_jahr, zuordnung_vorjahr)
1304 .....
1305 ....# Wende Korrekturfaktor für Getreide und Raps nach Wurzelfrucht bei Blattfrucht-Anteil < 50% an
1306 ....if blattfrucht_anteil < 0.5 and war_wurzelfrucht and ist_getreide_raps:
1307 .....rba_korr_jahr -= KORRClass.korr_wurzelfrucht(rba_unkorr_jahr, bb_jahr)
1308 .....
1309 ....if blattfrucht_anteil >= 0.5 and war_wurzelfrucht:
1310 .....# Wende Korrekturfaktor für Getreide nach Wurzelfrucht an
1311 .....if ist_getreide:
1312 .....rba_korr_jahr -= KORRClass.korr_wurzelfrucht(rba_unkorr_jahr, bb_jahr)
1313 .....# Wende Durchschnitt von Korrekturfaktoren für Blattfrucht und für Raps nach Wurzelfrucht an
1314 .....# Note: Da Raps eine Blattfrucht ist, müssen bei einem Blattfrucht-Anteil > 50%
1315 .....# und nach Wurzelfrucht für Raps beide Korrekturfaktoren angewandt werden
1316 .....elif ist_raps:
1317 .....# Verwende die bereits für Blattfrüchte korrigierten RBA-Werte aus rba_korr_jahr
1318 .....rba_korr_jahr_blattfrucht -= rba_korr_jahr
1319 .....rba_korr_jahr_wurzelfrucht -= KORRClass.korr_wurzelfrucht(rba_unkorr_jahr, bb_jahr)
1320 .....rba_korr_jahr -= KORRClass.korr_durchschnitt(rba_korr_jahr_blattfrucht, rba_korr_jahr_wurzelfrucht)
1321 .....
1322 ....rba_korr.append(rba_korr_jahr)

```

Abbildung 4.20: Scriptausschnitt C-Faktor-Tool: Berechnung der korrigierten RBA-Werte für die restlichen Jahre der Fruchtfolge (Kupferschmied 2018)

für die korrigierten Werte kopiert (Abb. 4.20, Zeilen 1292). Falls keine Korrekturfaktoren zum Einsatz kommen, bleiben diese Werte unverändert in der korrigierten Liste und können für die weitere C-Faktor-Berechnung verwendet werden. Wenn eine Korrektur angewandt wird, werden die entsprechenden unkorrigierten Werte in dieser Liste mit den korrigierten überschrieben. Wie sich gleich zeigen wird ist dadurch die Reihenfolge, in der die Korrekturfaktoren angewendet werden, wichtig, damit die verschiedenen Bedingungen in eine lineare Logik gebracht werden können. Zuerst wird die Korrektur für Kulturen nach einer Kunstwiese angewendet (Abb. 4.20, Zeilen 1295-1296). Danach erfolgt die Überprüfung des Blattfruchtanteils und gegebenenfalls die Korrektur aller Blattfrüchte der Fruchtfolge (Abb. 4.20, Zeilen 1302-1303). Wie in Abbildung 4.18 (Zeile 1151) zu erkennen ist, wird dabei ebenfalls geprüft, ob die Vorkultur eine Kunstwiese war und allenfalls ein anderer Korrekturfaktor verwendet. Falls dies der Fall ist, wurden die RBA-Werte entsprechend bereits im vorherigen Schritt mit dem Korrekturfaktor für Kunstwiese verrechnet, werden jetzt aber mit den Werten für eine Blattfrucht nach einer Kunstwiese überschrieben. Im nächsten Schritt wird der Korrekturfaktor für Getreide und Raps nach einer Wurzelfrucht für den Fall angewendet, dass der Blattfruchtanteil unter 50% liegt und die Blattfrüchte nicht korrigiert wurden (Abb. 4.20, Zeilen 1306-1307). In diesem Fall liegen die RBA-Werte noch unkorrigiert vor, da die Vorkultur gegebenenfalls eine Wurzelfrucht und damit keine

Kunstwiese ist und der Raps als Blattfrucht aufgrund des Blattfruchtanteils von unter 50% ebenfalls nicht korrigiert wurde. Liegt der Blattfruchtanteil jedoch über 50% wird der Korrekturfaktor von Wurzelfrüchten vorerst nur auf Getreide angewandt (Abb. 4.20, Zeilen 1311-1312). Für Raps müssen zuerst die aufgrund des Blattfruchtanteils korrigierten RBA-Werte separat als Variable gespeichert werden, bevor der Korrekturfaktor für Raps nach einer Wurzelfrucht angewendet werden kann und die Werte überschreibt (Abb. 4.20, Zeilen 1318-1319). Mithilfe einer vordefinierten Funktion wird dann für die RBA-Werte aller Kulturperioden des Raps jeweils der Durchschnitt aus den RBA-Werten von der Blattfruchtkorrektur und der Wurzelfruchtkorrektur ausgerechnet und damit die vorherigen Werte überschrieben (Abb. 4.20, Zeile 1320). Aufgrund dieser komplexen technischen Operationalisierung der Korrekturfaktoren wurde bei der angepassten Berechnungsweise der Korrekturfaktor von Kunstwiese wie oben erwähnt nicht über zwei Jahre gerechnet. Der Output der Berechnung ist eine Liste aus Listen mit den korrigierten RBA-Werten zu allen Kulturperioden der Fruchtfolge.

4.2.8 Berechnung Schritt 6: Berechnung des C-Faktors der Fruchtfolge

Mit den korrigierten RBA-Werten und den RRA-Werten kann nun abschliessend der C-Faktor der Fruchtfolge berechnet werden. Dazu werden zuerst die RBA- und RRA-Werte aller Kulturperioden der Fruchtfolge miteinander multipliziert, um die C-Faktor-Anteile der Kulturperioden zu erhalten. Diese werden dann über die Fruchtfolge aufsummiert und durch die Anzahl Jahre der Fruchtfolge geteilt (vgl. Abb. 4.6).

Im C-Faktor-Tool ist die Multiplikation der RBA- und RRA-Werte dank dem Listenformat der Daten mit Python elegant zu lösen. Mit der Python-Funktion `zip` können zwei Listen mit selbem Format und Umfang zu einer Liste zusammengefügt werden, wobei jeweils die beiden Elemente aus den Listen, welche an der selben Stelle in der Liste stehen, zusammengelegt werden. Die RBA- und RRA-Werte liegen jeweils als Listen vor, welche wiederum für jedes Jahr der Fruchtfolge eine Liste mit den entsprechenden Werten der einzelnen Kulturperioden beinhalten. In einem äusseren for-Loop können mit der `zip`-Funktion die Listen von RBA und RRA jahresweise zusammen angesteuert und die darin enthaltenen Werte zu den Kulturperioden in einem inneren for-Loop mit der `zip`-Funktion elementweise multipliziert werden (Abb. 4.21, Zeilen 1341-1345). Die dabei entstehenden C-Faktor-Anteile werden für alle Jahre in eine neue Liste geschrieben und diese wiederum in einer Liste zur Fruchtfolge zusammengefasst. Alle C-Faktor-Anteile können mit Python wieder in einem for-Loop und einer Summenfunktion zuerst jahresweise und anschliessend für die ganze Fruchtfolge aufsummiert werden (Abb. 4.21, Zeilen 1355-1362). Die Summe aller C-Faktor-Anteile der Fruchtfolge wird noch durch die Anzahl Jahre der Fruchtfolge geteilt, um den C-Faktor der Fruchtfolge zu erhalten. Die Anzahl Jahre entspricht hierbei der Anzahl Hauptkulturen in der Fruchtfolge. Bei der Erstellung des Kulturkalenders

wurde eine Liste mit den Kulturnummern aller Hauptkulturen der Fruchtfolge erstellt (vgl. Kapitel 4.2.4 und Abb. 4.13, Zeile 358). Die Länge dieser Liste bzw. die Anzahl Elemente darin kann nun für die Division der C-Faktor-Anteile verwendet werden, was den C-Faktor der Fruchtfolge ergibt.

```

1333 #·Berechnung·C-Anteile
1334 #*****
1335
1336 #·Die·Werte·für·RRA·und·RBA·werden·elementweise·multipliziert,
1337 #·um·die·C-Anteile·jeder·Kulturperiode·aller·Kulturen·zu·erhalten
1338
1339 c_anteile·=·[]
1340
1341 for·row_rra,·row_rba·in·zip(rra_ff,·rba_korr):
1342     ····rra_list·=·list(row_rra)
1343     ····rba_list·=·list(row_rba)
1344     ····c_anteile_jahr·=·[a*b·for·a,b·in·zip(rra_list,·rba_list)]
1345     ····c_anteile.append(c_anteile_jahr)
1346
1347
1348
1349
1350
1351 #·Berechnung·der·Summe·aller·C-Anteile
1352 #*****
1353
1354 #·Summiere·die·C-Anteile·für·alle·Kulturperioden·eines·Jahres·und·schreibe·sie·in·c_summe_jahr
1355 c_summe_jahr·=·[]
1356 for·row_anteil·in·c_anteile:
1357     ····c_sum_row·=·sum(row_anteil)
1358     ····c_summe_jahr.append(c_sum_row)
1359
1360
1361 #·Summiere·die·C-Anteile·aus·c_summe_jahr·für·die·ganze·Fruchtfolge·und·schreibe·sie·in·c_summe_ff
1362 c_summe_ff·=·sum(c_summe_jahr)
1363
1364
1365
1366
1367
1368 #·Berechnung·C-Faktor
1369 #*****
1370
1371 #·Teile·die·Summe·aller·C-Anteile·aus·c_summe_ff·durch·die·Anzahl·Jahre·der·Fruchtfolge,
1372 #·um·den·C-Faktor·der·Fruchtfolge·zu·erhalten
1373
1374 c_faktor_ff·=·(c_summe_ff·/·len(ff))

```

Abbildung 4.21: Scriptausschnitt C-Faktor-Tool: Berechnung des C-Faktors der Fruchtfolge (Kupferschmied 2018)

4.2.9 Output des C-Faktor-Tools

Das C-Faktor-Tool verfügt über Print-Statements, welche beim Ausführen des Python-Scripts einen detaillierten Output liefern. Die Abbildung 4.22 zeigt diesen Output für eine vierjährige Fruchtfolge aus Sommerweizen, Speisekartoffeln, Sommergerste und Silomais. Die Fruchtfolge wurde für diese Abbildung so gewählt, dass möglichst viele Elemente der angepassten Berechnungsweise ersichtlich sind. So lässt sich bspw. die unterschiedliche Anzahl Kulturperioden abhängig von der Wahl der Zwischennutzung erkennen. Oder die

Auswirkungen der Korrekturfaktoren auf die RBA-Werte können für einen Blattfruchtanteil von über 50% und für Sommergerste nach Speisekartoffeln nachvollzogen werden.

```

User-Input Beschreibung:
Jahr 1 Sommerweizen direktsaat Zwischenfutter winterhart mulch_u30
Jahr 2 Speisekartoffeln pflug Schwarzbrache im Winter pflug
Jahr 3 Sommergerste pflug Zwischenfutter abfrierend mulch_u30
Jahr 4 Silomais mulch_o30 Stoppelbrache im Winter pflug
-----
User-Input (raw) mit Zuordnung für Korrekturfaktoren:
Jahr 1 : [8, 'direktsaat', 55, 'mulch_u30', 'G']
Jahr 2 : [22, 'pflug', 4, 'pflug', 'WB']
Jahr 3 : [11, 'pflug', 5, 'mulch_u30', 'G']
Jahr 4 : [29, 'mulch_o30', 3, 'pflug', 'B']
-----
Region: tal
-----
BF-Anteil: 50.0 %
=====
Kulturkalender:
KK 1 : [75, 76, 108, 125, 142, 214, 219, 220, 230, 240, 250, 103, 104]
KK 2 : [104, 105, 131, 151, 162, 255, 79]
KK 3 : [79, 80, 110, 129, 141, 198, 203, 204, 214, 224, 234, 129, 130]
KK 4 : [130, 131, 160, 182, 191, 272, 75]
=====
R-Anteile von Kalenderdaten:
R-Ant 1 : [0.046, 0.046, 0.067, 0.112, 0.166, 0.659, 0.675, 0.685, 0.766, 0.809, 0.837, 0.066, 0.066]
R-Ant 2 : [0.066, 0.066, 0.116, 0.186, 0.203, 0.856, 0.049]
R-Ant 3 : [0.049, 0.049, 0.067, 0.114, 0.164, 0.465, 0.512, 0.584, 0.659, 0.709, 0.784, 0.114, 0.116]
R-Ant 4 : [0.116, 0.116, 0.202, 0.343, 0.402, 0.901, 0.046]
-----
RRA der Perioden:
RRA 1 : [0.0, 0.021, 0.044, 0.054, 0.493, 0.016, 0.01, 0.081, 0.043, 0.029, 0.228, 0.0]
RRA 2 : [0.0, 0.051, 0.07, 0.016, 0.654, 0.192]
RRA 3 : [0.0, 0.019, 0.047, 0.049, 0.301, 0.047, 0.072, 0.075, 0.049, 0.075, 0.33, 0.002]
RRA 4 : [0.0, 0.085, 0.141, 0.059, 0.499, 0.145]
=====
Unkorrigierter RBA der Perioden:
RBA 1 : [0.08, 0.08, 0.06, 0.01, 0.01, 0.02, 0.16, 0.16, 0.09, 0.03, 0.01, 0.01]
RBA 2 : [0.32, 2.0, 0.5, 0.05, 0.1, 0.32]
RBA 3 : [0.32, 0.46, 0.38, 0.03, 0.01, 0.03, 0.16, 0.16, 0.09, 0.02, 0.02, 0.01]
RBA 4 : [0.11, 0.11, 0.07, 0.02, 0.01, 0.1]
--
Korrigierter RBA der Perioden:
RBAkorr 1 : [0.08, 0.08, 0.06, 0.01, 0.01, 0.02, 0.16, 0.16, 0.09, 0.03, 0.01, 0.01]
RBAkorr 2 : [0.48, 3.0, 0.75, 0.075, 0.15, 0.48]
RBAkorr 3 : [0.4, 0.575, 0.475, 0.037, 0.013, 0.037, 0.16, 0.16, 0.09, 0.02, 0.02, 0.01]
RBAkorr 4 : [0.132, 0.132, 0.084, 0.024, 0.012, 0.12]
=====
C-Anteile der Perioden:
C-Ant 1 : [0.0, 0.002, 0.003, 0.001, 0.005, 0.0, 0.002, 0.013, 0.004, 0.001, 0.002, 0.0]
C-Ant 2 : [0.0, 0.152, 0.053, 0.001, 0.098, 0.092]
C-Ant 3 : [0.0, 0.011, 0.022, 0.002, 0.004, 0.002, 0.012, 0.012, 0.004, 0.002, 0.007, 0.0]
C-Ant 4 : [0.0, 0.011, 0.012, 0.001, 0.006, 0.017]
-----
Summe jährlicher C-Anteile:
CsumYr 1 : 0.032
CsumYr 2 : 0.396
CsumYr 3 : 0.077
CsumYr 4 : 0.048
-----
Summe aller C-Anteile:
C-Summe: 0.552
=====
C-Faktor der Fruchtfolge:
FF: [8, 22, 11, 29]
Anz Jahre: 4 Jahre

-----
|C-FAKTOR|: 0.138
,-----

```

Abbildung 4.22: Detaillierter Print-Output des C-Faktor-Tools für eine vierjährige Fruchtfolge (Kupferschmied 2018)

Im folgenden Kapitel werden nun mit dem C-Faktor-Tool berechnete C-Faktoren in einem Vergleich mit anderen C-Faktor-Werten auf ihre Plausibilität hin überprüft.

4.3 Überprüfung der Plausibilität von mit der angepassten Berechnungsweise errechneten C-Faktoren

Die Plausibilität von C-Faktoren, welche mit dem neuen C-Faktor-Tool auf Basis der angepassten Berechnungsweise errechnet werden, wird anhand von Vergleichen mit C-Faktor-Werten von zwei anderen Tools überprüft. Das Programm ErosionCH von Mosimann & Rüttimann (2006) und die Excel-Anwendung zur C-Faktor-Berechnung vom Erosionsschutzberatungsinstrument EMiL der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (Hiller 2007) sind die beiden einzigen ähnlichen C-Faktor-Tools im deutschen Sprachraum (vgl. Kapitel 2.3.4.1) und werden für die Vergleiche verwendet. Das im Rahmen dieser Masterarbeit entwickelte C-Faktor-Tool wird im Folgenden als *CTool* bezeichnet, *ErosionCH* ist das Programm von Mosimann & Rüttimann (2006) und die Excel-Anwendung aus NRW wird der Einfachheit halber *EMiL* genannt.

In Bezug auf die Datengrundlage und den Funktionsumfang ist ErosionCH sehr ähnlich zum CTool. Beim CTool ist zusätzlich die Wahl einer Region möglich, die Kalenderdaten der Kulturperioden sind teils verändert und die R-Faktordaten von Schmidt et al (2016) sind neu. Viele der beim CTool verwendeten RBA-Werte stammen allerdings von Mosimann & Rüttimann (2006) und wurden nur teilweise von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) überarbeitet. Auch die Korrekturfaktoren wurden im CTool mit Ausnahme der Kunstwiese ähnlich verwendet wie bei ErosionCH. Im Gegensatz zum CTool ist bei ErosionCH eine Angabe zum Beginn der Zwischenperiode möglich. Dadurch sind Überschneidungen der Kulturkalender zu verhindern, was beim CTool nicht möglich ist. Während die Datengrundlage bei ErosionCH bekannt ist, kann das exakte Vorgehen der Berechnung mangels Transparenz nicht rekonstruiert werden. Folglich ist nicht eindeutig, wie sich bspw. die Angabe zum Beginn der Zwischenperiode auf die Erstellung des Kulturkalenders auswirkt. Diese Unterschiede zwischen CTool und ErosionCH in der operationalisierten Berechnungsweise und die teils veränderte Datengrundlage können sich auf die berechneten C-Faktoren auswirken. Dennoch sollten mit den beiden Tools errechnete C-Faktoren ähnlich sein und Variationen der unterschiedlichen Variablen wie das Verändern des Bodenbearbeitungsverfahrens sollten sich bei beiden Tools im Verhältnis etwa gleich auswirken. Die Unterschiede vom CTool zu EMiL sind hingegen deutlich umfangreicher. So bietet EMiL bspw. nicht direkt die Möglichkeit eine Zwischennutzung für jede Hauptkultur anzugeben und die Datengrundlage ist weitgehend eine andere. Wohl dürften einige RBA-Werte, welche auf die Literatur von Wischmeier & Smith (1978) und Schwertmann et al. (1987) zurück gehen, ähnlich sein, doch Kulturkalender und R-Faktorwerte sollten sich erwartungsgemäss merklich unterscheiden. Trotzdem wird das CTool auch mit EMiL verglichen, da durch das Erosionsmodell ABAG dennoch eine gewisse Ähnlichkeit zu erwarten ist und weil ein Vergleich mit drei Tools eine bessere Referenz liefert, wenn sich etwa die Werte von ErosionCH und EMiL systematisch ähneln aber die Werte vom CTool abweichen sollten.

Die Plausibilitätsanalyse ist in zwei Vergleichsansätze unterteilt. In einem systematischen Vergleich (Kapitel 4.3.1) wird eine bestimmte Fruchtfolge unter Verwendung bestimmter Variablen mit allen Tools berechnet und als Referenz definiert. Anschliessend werden systematisch die einzelnen Variablen der Berechnung bei gleichbleibender Kulturabfolge variiert und ihre Auswirkungen auf die resultierenden C-Faktoren ausgewertet. Zusätzlich werden anhand von idealisierten Fruchtfolgen die Effekte von einzelnen Korrekturfaktoren sowie die Auswirkung der überarbeiteten RBA-Werte von Kartoffeln in der neuen Datengrundlage (Prasuhn 2017, unveröffentlicht) analysiert. Die Veränderungen sollten dabei bei den unterschiedlichen Tools in einem ähnlichen Verhältnis zueinander sein, um als plausibel bezeichnet werden zu können. Allerdings sind die durch die Variationen entstehenden Fruchtfolgen grundsätzlich nicht realistisch, da sie systematisch generiert werden, um die einzelnen Variablen hervorzuheben. Um die Plausibilität von mit den Tools berechneten C-Faktoren für praxisrelevante Berechnungen zu beurteilen, werden in einem zweiten Vergleich (Kapitel 4.3.2) typische in der Schweiz verwendete Fruchtfolgen mit allen Tools gerechnet und verglichen. Dadurch wird untersucht, inwiefern mit dem CTool in der Praxis plausible C-Faktoren berechnet werden können und wie stark sich die Neuerungen tatsächlich auf die C-Faktoren auswirken. Ausserdem wird bei diesem zweiten Vergleich die Kulturabfolge variiert, während diese beim systematischen Vergleich, abgesehen von den Änderungen für die Korrekturfaktoren und Kartoffeln, grundsätzlich gleich bleibt. Während also beim systematischen Vergleich die Sensitivität der unterschiedlichen Variablen der C-Faktor-Berechnung untersucht werden kann, zeigt sich beim praxisorientierten Vergleich die Sensitivität der unterschiedlichen Ackerfrüchte bei der Berechnung des C-Faktors.

4.3.1 Systematischer Vergleich von C-Faktoren nach Tool und Variable

Für den systematischen Vergleich wird zuerst eine Referenzfruchtfolge definiert und mit allen drei Tools berechnet. Anschliessend wird jede Variable der Bewirtschaftung einzeln variiert und die Veränderung des C-Faktors analysiert. Diese Variablen umfassen die Region, das Bodenbearbeitungsverfahren und die Zwischennutzung. Zusätzlich zu diesen Variablen werden Fruchtfolgen gerechnet, welche gezielt einzelne Korrekturfaktoren auslösen. Abschliessend wird eine Fruchtfolge mit 40% Kartoffelanteil gerechnet und verglichen, da die RBA-Werte von Kartoffeln in der Datengrundlage des CTools stark erhöht wurden. Alle im Rahmen des systematischen Vergleichs berechneten C-Faktoren sind tabellarisch in Anhang A5 aufgeführt.

4.3.1.1 Referenzfruchtfolge des systematischen Vergleichs

Die Referenzfruchtfolge besteht aus 60% Sommerweizen und je 20% Körnermais und Zuckerrüben. In Kapitel 3.3.1 ist beschrieben wie die Referenzfruchtfolge gewählt wurde.

Referenz- Fruchtfolge	Fruchtfolge (FF):	G G G M M G G G R R		
	Tool:	CTool	ErosionCH	EMiL
	Region:	Talgebiet	keine Angabe	bis 100m
	Bodenbearbeitung Hauptkultur:	Pflug	Pflug	Frühjahrsfurche
	Zwischennutzung:	Stoppelbrache im Winter	Stoppelbrache im Winter	Standard
	C-Faktor:	0.104	0.102	0.116

Abbildung 4.23: Tabelle zur Referenzfruchtfolge mit toolspezifischen Angaben zu den verwendeten Variablen und den C-Faktor-Werten (G=Sommerweizen, M=Körnermais, R= Zuckerrüben) (Kupferschmied 2018)

Die Tabelle in Abbildung 4.23 zeigt die Referenzfruchtfolge mit den toolspezifischen Angaben zu den einzelnen Variablen und die Referenzwerte des C-Faktors für jedes Tool. Als Region wird beim CTool das Talgebiet für die Referenzfruchtfolge verwendet, da der Grossteil der Schweizer Ackerfläche in dieser Region liegt. Das Programm ErosionCH erlaubt keine vergleichbare Auswahlfunktion, die sich auf den C-Faktor auswirkt. Allerdings ist ErosionCH für die Verwendung im Schweizer Mittelland gedacht, was beim CTool grundsätzlich dem Talgebiet entspricht. Bei EMiL stehen drei Höhenstufen (bis 100m, 100-200m, über 200m) zur Auswahl. Als Referenzeinstellung wird die niedrigste Stufe bis 100m gewählt, da in NRW der Grossteil aller Ackerflächen unter 100 m.ü.M. liegen (LWK NRW 2018: 19) und die Einstellung am ehesten dem Talgebiet des CTools entspricht. Als Bodenbearbeitungsverfahren für die Referenz wird das Pflugverfahren gewählt und die Zwischennutzung ist eine Stoppelbrache im Winter. Bei EMiL sind diese Einstellungen nicht in gleicher Form vorhanden und etwas irreführend. Einerseits existiert bei EMiL eine Einstellung zur Bodenbearbeitung für die ganze Fruchtfolge und andererseits eine Auswahl des Bestellverfahrens für jede Kultur (vgl. Abb. 2.11). Beim Bestellverfahren kann für jede Kultur zwischen Frühjahrs- und Herbstfurche sowie Mulch- und Direktsaatverfahren gewählt werden. Damit entspricht diese Einstellung grundsätzlich dem kulturspezifischen Bodenbearbeitungsverfahren beim CTool und ErosionCH, wobei Frühjahrs- und Herbstfurche beides Pflugverfahren sind. Die in EMiL als Bodenbearbeitung bezeichnete Einstellung, welche die Optionen Ungünstig, Standard und Günstig umfasst, dürfte vereinfacht der Zwischennutzung von CTool und ErosionCH entsprechen. Denn Schwertmann et al. (1987: 48, 49) geben C-Faktoren von Fruchtfolgen jeweils für einen ungünstigen und einen günstigen Fall an. Beim günstigen Fall verbleiben Erntereste auf dem Acker und werden nicht oder nur oberflächlich eingearbeitet. Eine eventuelle Zwischenfrucht wird in das mit Ernterückständen bedeckte Saatbett gesät und der Zeitraum zwischen wendender Bodenbearbeitung (Pflugeinsatz) und der Aussaat der Folgekultur ist kurz. Beim ungünstigen Fall verbleiben hingegen keine oder wenige Erntereste auf dem Acker, es wird keine Zwischenfrucht gesät und die Zeit zwischen wendender Bodenbearbeitung und Folgefrucht ist lang. Diese Beschreibung lässt sich in etwa auf die verschiedenen Zwischennutzungen vom CTool und ErosionCH übertragen. Das Verbleiben von Ernterückständen auf dem Acker beschreibt

eine Stoppelbrache, während eine Bereinigung mittels Pflug zusammen mit einer langen Dauer zwischen wendender Bodenbearbeitung und Aussaat der Folgefrucht einer gepflügten Schwarzbrache im Winter entspricht. Die Saat einer Zwischenfrucht ist beim CTool und ErosionCH ebenfalls mit entsprechenden Zwischennutzungs-Fällen anzugeben. Bei EMiL existiert zusätzlich zu den Fällen günstig und ungünstig von Schwertmann et al. (1987:48) ein Standardfall. Für den Vergleich wird für die Einstellungen Bodenbearbeitung und Bestellverfahren bei EMiL mangels einer Beschreibung der Funktionen und gestützt auf die Beschreibung von Schwertmann et al. (1987:48) folgende Annahmen getroffen. Die Kombination von ungünstiger Bodenbearbeitung zusammen mit dem Bestellverfahren Herbstfurche entspricht bei EMiL dem Zwischennutzungs-Fall einer gepflügten Schwarzbrache im Winter vom CTool und ErosionCH. Für die Stoppelbrache im Winter von CTool und ErosionCH wird bei EMiL die Kombination von Standard als Bodenbearbeitung und Frühjahrsfurche als Bestellverfahren gewählt. Und für die verschiedenen Fälle von Zwischenkulturen beim CTool und ErosionCH wird bei EMiL die Kombination von günstiger Bodenbearbeitung und Frühjahrsfurche als Bestellverfahren verwendet. Inwiefern diese Optionen bei EMiL wirklich mit den Beschreibungen von Schwertmann et al. (1987:48) übereinstimmen und ob die Annahmen zu EMiL wirklich den entsprechenden Zwischennutzungs-Fällen vom CTool und ErosionCH entsprechen, kann jedoch nicht näher beurteilt werden.

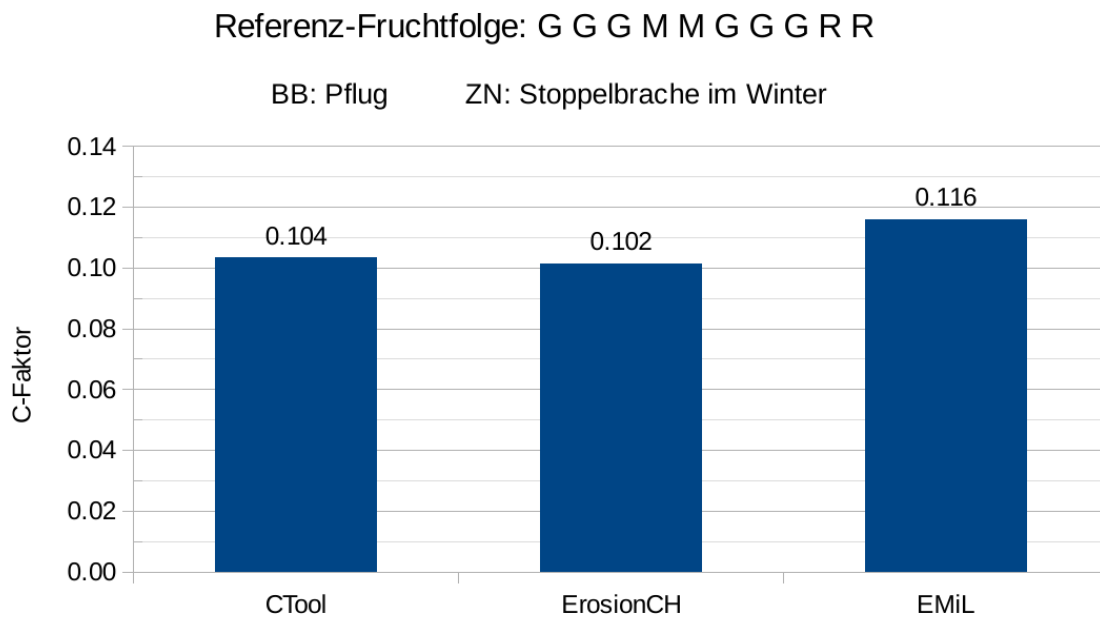


Abbildung 4.24: Berechnete C-Faktoren der Referenzfruchtfolge (G=Sommerweizen, M=Körnermais, R=Zuckerrüben, BB=Bodenbearbeitung, ZN=Zwischennutzung) (Kupferschmid 2018)

Die zur geschilderten Referenzfruchtfolge berechneten C-Faktoren der drei Tools sind in Abbildung 4.24 einander gegenübergestellt. Während die C-Faktoren von CTool und ErosionCH mit 0.104 bzw. 0.102 bei einer Abweichung von 1.8% praktisch identisch sind,

liegt der mit EMiL berechnete C-Faktor mit 0.116 um rund 12% höher als jener vom CTool. Die Abweichung zwischen EMiL und CTool bzw. ErosionCH kann mehrere Ursachen haben. Einerseits ist sie geographisch-klimatisch durch vermutlich andere Kulturkalenderdaten und RRA-Werte zu erklären. Da die Daten dazu für EMiL nicht verfügbar sind, lässt sich das Ausmass der dadurch entstehenden Abweichung jedoch nicht näher analysieren. Andererseits kann der Unterschied zwischen den C-Faktoren auch dadurch begründet sein, dass die bei EMiL getroffenen Annahmen für Bodenbearbeitung und Bestellverfahren nicht genau den Einstellungen von CTool und ErosionCH entsprechen, was jedoch ebenfalls nicht eindeutig bestimmt werden kann. Mit Blick auf den regulären Wertebereich des C-Faktors, welcher je nach Fruchtfolge i.d.R. zwischen 0.02 und 0.30 (Mosimann & Rüttimann 2006: D1) liegt, und unter Berücksichtigung der Verschiedenheit zwischen EMiL und den beiden anderen Tools, ist der C-Faktor von EMiL mit 0.116 gegenüber jenem vom CTool mit 0.104 dennoch plausibel. Wird davon ausgegangen, dass die Berechnungsweise von ErosionCH robust ist, spricht die Übereinstimmung der C-Faktoren von CTool und ErosionCH klar für die Plausibilität des mit dem CTool berechneten C-Faktors.

Auf Basis dieser Referenzfruchtfolge werden im Folgenden die Variablen Region, Bodenbearbeitung und Zwischennutzung variiert und die C-Faktoren miteinander verglichen.

4.3.1.2 Vergleichs-Variable: Region

Das CTool bietet dem Benutzer die Möglichkeit zwischen Tal- und Hügelland zu wählen, was sich bei der Berechnung des C-Faktors auf die Kulturkalenderdaten und die R-Faktordaten auswirkt (vgl. Kapitel 4.2.4 und 4.2.5). Das Programm ErosionCH verfügt zur Berechnung des C-Faktors über keine vergleichbare Funktion. Zwar kann im Programm im ersten Schritt eine geographische Region angegeben werden, diese wirkt sich allerdings nicht auf die C-Faktor-Berechnung sondern erst auf die Berechnung der Erosionsgefährdung aus. Bei EMiL kann aus drei Höhenstufen (bis 100m, 100-200m, über 200m) ausgewählt werden.

Variable	Variationen	C-Faktoren		
		CTool	ErosionCH	EMiL
Region	Talgebiet	0.104	-	-
	Hügelland	0.099	-	-
	bis 100m	-	-	0.116
	100-200m	-	-	0.133
	ab 200m	-	-	0.148

Abbildung 4.25: Tabelle mit C-Faktoren nach Tool und Variation der Variable Region. Blau sind die Werte der Referenzfruchtfolge, grau bedeutet keine Werte verfügbar (Kupferschmied 2018)

Aufgrund der unterschiedlichen Einstellungen und der fehlenden Werte von ErosionCH ist ein direkter Vergleich der C-Faktoren schwierig (Tabelle in Abb. 4.25). Beim CTool

reduziert sich der C-Faktor für die Hügelregion gegenüber dem Talgebiet um 4.3% auf 0.099. Bei EMiL erhöht sich der C-Faktor für beide höhergelegenen Stufen merklich. So liegt der C-Faktor für die Höhenstufe 100-200m mit 0.133 um 14.7% höher als jener bis 100m und der C-Faktor über 200m ist mit 0.148 sogar um 27.6% grösser als der Referenzwert. Beim CTool verändert die Wahl der Region die Daten des Kulturkalenders und zur Berechnung wird eine andere Summenkurve für die R-Anteile verwendet. Für die Referenzfruchtfolge bedeutet dies, dass der aus diesen Daten berechnete relative R-Anteil im Hügelgebiet durch die Verschiebung insgesamt etwas geringer ausfällt. Das führt bei gleichbleibenden RBA-Werten zur Abnahme des C-Faktors um 4.3%. Da sich sowohl die Kalenderdaten wie auch die RBA-Werte für die beiden Regionen meist nur geringfügig bzw. um einzelne Tage unterscheiden, fällt auch die Differenz bei den C-Faktoren nur gering aus. Die Variation der Region bei weiteren Fruchtfolgen hat gezeigt, dass sich der C-Faktor zwischen Tal- und Hügelregion je nach Fruchtfolge meist um wenige Prozent positiv oder negativ verändert. Dabei weisen Fruchtfolgen mit hohem Blattfruchtanteil (ab 40%) meist eine leichte Erhöhung des C-Faktors im Hügelgebiet um etwa 1-4% auf. Die Ausnahme dieser Regel bilden Fruchtfolgen mit Mais, welche im Hügelgebiet bereits ab einem geringen Maisanteil einen um 4-8% reduzierten C-Faktor aufweisen können. Eine hohe Anzahl einzelner Kunstwiesejahre führt im Hügelgebiet zu einer merklichen Zunahme des C-Faktors um über 10% gegenüber der Talregion. Bei mehrjähriger Kunstwiese ist der Unterschied hingegen nur marginal.

Bei EMiL ist aufgrund der Intransparenz des Tools bzw. seiner Berechnungsweise nicht mit Sicherheit zu sagen, wie sich die Wahl der Höhenstufe genau auf die C-Faktor-Berechnung auswirkt. Da sich die drei berechneten C-Faktoren allerdings so stark unterscheiden, müssen die Veränderungen bei Kalender und R-Anteilen entweder beträchtlich sein oder die Berechnungsweise verwendet zusätzliche Anpassungen wie bspw. Korrekturfaktoren. Auch Variationen der Höhenstufen bei einzelnen weiteren Fruchtfolgen zeigen grundsätzlich eine merkliche Erhöhung des C-Faktors mit zunehmender Höhenlage. Dabei erhöht sich der C-Faktor gegenüber der Referenz für die Höhenstufe 100-200m um 10-16% und für Höhenlagen über 200m um 26-35%. Eine kulturabhängige Tendenz wie beim CTool kann bei EMiL nicht festgestellt werden.

Die meist relativ geringen Unterschiede von wenigen Prozent zwischen C-Faktoren des Tal- und Hügelgebiets beim CTool weisen auf eine geringe Sensitivität der Region auf den C-Faktor hin. Zwar ist eine Aussage zur Plausibilität der C-Faktoren ohne wirkliche Vergleichbarkeit der Werte schwierig, doch widerspiegeln die geringen Unterschiede bei den C-Faktoren die ebenfalls nur geringfügigen Anpassungen bei Kalenderdaten und R-Faktordaten, welche durch die Wahl der Region in der Berechnungsweise unternommen werden. Dass sich für unterschiedliche Fruchtfolgen kulturspezifische Tendenzen bei der Veränderung der C-Faktoren abzeichnen, spricht ebenfalls für deren Plausibilität.

4.3.1.3 Vergleichs-Variable: Bodenbearbeitungsverfahren

Das CTool und ErosionCH unterscheiden beide die selben vier Bodenbearbeitungsverfahren Pflug, Mulchsaat mit 10-30% Bodenbedeckung, Mulchsaat mit über 30% Bodenbedeckung und das Direktsaatverfahren. Bei EMiL kann für das Pflugverfahren zwischen Frühjahr- und Herbstfurche gewählt werden, dafür macht das Tool beim Mulchverfahren keinen Unterschied im Bodenbedeckungsgrad und bietet nur eine Auswahl für Mulchsaat an. Das Direktsaatverfahren ist bei EMiL wie bei den anderen beiden Tools vorhanden. Da in der Referenzfruchtfolge ausschliesslich Sommerkulturen vorkommen und die Referenz-Zwischennutzung eine Stoppelbrache im Winter ist, wird bei EMiL für die Bodenbearbeitung Pflugverfahren nur die Frühjahrsturche verwendet. Die Herbstfurche wird erst im nächsten Kapitel zur Variation der Zwischennutzung angewendet.

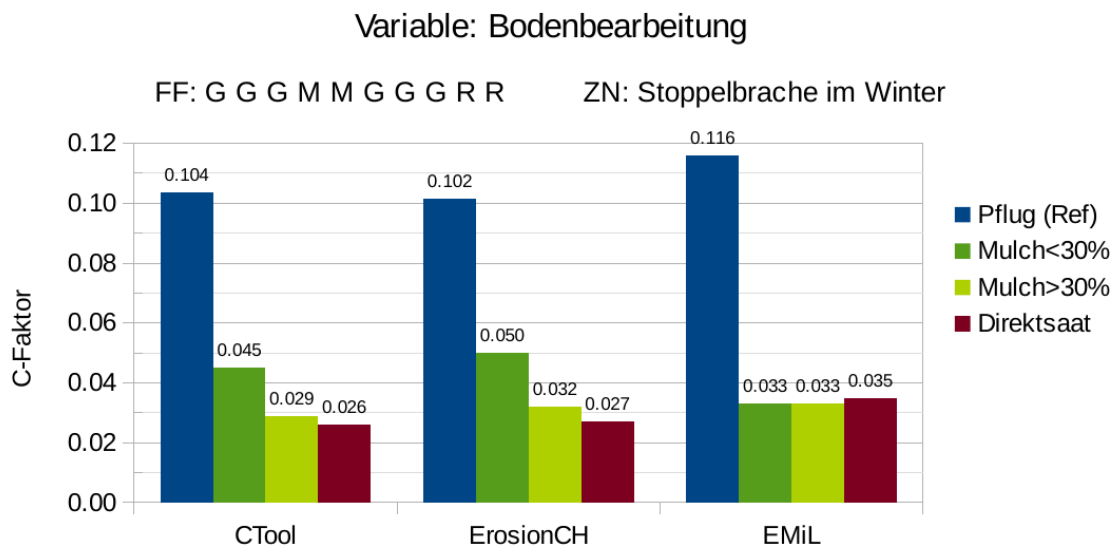


Abbildung 4.26: Diagramm der C-Faktoren nach Tool und Variation der Variable Bodenbearbeitung. Pflug entspricht dem Verfahren der Referenzfruchtfolge. EMiL kennt nur ein Mulchsaatverfahren, weshalb zweimal der selbe Wert verwendet wird. EMiL hat als Pflugverfahren hier die Frühjahrsturche (Kupferschmied 2018)

Wie aus Abbildung 4.26 hervorgeht, ist das Bodenbearbeitungsverfahren eine sehr sensitive Variable der C-Faktor-Berechnung. Konservierende Verfahren wie Mulch- und Direktsaat erzielen bei allen Tools C-Faktoren welche noch der Hälfte oder gar nur einem Viertel des C-Faktors vom konventionellen Pflugverfahren betragen. Beim CTool beträgt der C-Faktor von Mulchsaat mit unter 30% Bodenbedeckung 0.045 und ist damit um 56.5% geringer als der Referenzwert mit Pflugverfahren. Bei ErosionCH ist dieser Wert mit 0.050 geringfügig höher als beim CTool und um 50.8% geringer als der entsprechende C-Faktor vom Pflugverfahren. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Mulchsaat mit mehr als 30% Bedeckung. Hier liegen die C-Faktoren von CTool und ErosionCH mit 0.029 bzw. 0.032

ebenfalls sehr nahe beieinander, wobei der C-Faktor gegenüber dem Pflugverfahren beim CTool um 72% und bei ErosionCH um 68.5% reduziert ist. Der C-Faktor von Mulchsaat ist bei EMiL vergleichbar mit der Mulchsaat mit über 30% Bedeckung vom CTool und ErosionCH. Bei EMiL ist der C-Faktor von Mulchsaat mit 0.033 im gleichen Bereich wie bei den anderen Tools und ist um 71.6% geringer als der C-Faktor der Frühjahrsfurche. Beim Direktsaatverfahren liegen die C-Faktoren von CTool und ErosionCH mit 0.026 bzw. 0.027 ebenfalls sehr nahe zusammen und stellen gegenüber dem jeweiligen C-Faktor für Pflug eine Reduktion um 74.9% bzw. 73.4% dar. Interessanterweise ist bei EMiL der C-Faktor von Direktsaat mit 0.035 geringfügig höher als jener von Mulchsaat. Gegenüber der Frühjahrsfurche ist der C-Faktor für Direktsaat bei EMiL um 69.8% geringer. Weshalb der C-Faktor von Direktsaat allerdings höher ist als von Mulchsaat lässt sich aufgrund mangelnder Datentransparenz nicht erklären.

Die Variation der Bodenbearbeitung zeigt die hohe Sensitivität auf den C-Faktor zwischen konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung, während die einzelnen konservierenden Verfahren untereinander deutlich weniger sensitiv auf den C-Faktor wirken. Die drei Tools liefern zu den unterschiedlichen Verfahren jeweils ähnliche C-Faktoren, wobei sich das Mulchverfahren bei EMiL mit der Mulchsaat bei über 30% Bodenbedeckung von CTool und ErosionCH vergleichen lässt. Besonders die gute Übereinstimmung und gleichmässige Abstufung der C-Faktoren von CTool und ErosionCH bedeuten für das CTool plausible C-Faktoren. Die geringfügigen Unterschiede lassen sich durch die aktuellere Datengrundlage des CTools mit leicht abweichenden Kulturkalenderdaten und RRA-Werten erklären. Während bei EMiL der Wert von Mulchsaat gut mit dem CTool und ErosionCH übereinstimmt, ist der C-Faktor von Direktsaat entgegen den anderen Tools leicht höher als jener von Mulchsaat. Damit weicht EMiL zwar im Verhalten der Werte von den anderen Tools ab, bleibt aber mit dem C-Faktor von Direktsaat im Vergleich zum Pflugverfahren trotzdem im gleichen Verhältnis wie die anderen Tools.

4.3.1.4 Vergleichs-Variable: Zwischennutzung

In Abbildung 4.27 sind C-Faktoren von unterschiedlichen Zwischennutzungen nach Tool abgebildet. Während das CTool und ErosionCH über die selben Zwischennutzungs-Fälle verfügen, bietet EMiL keine direkte Angabe einer Zwischennutzung an. Allerdings kann bei EMiL zwischen einer ungünstigen, standardmässigen und günstigen Bodenbearbeitung unterschieden werden. Gestützt auf eine ähnliche Unterscheidung bei Schwertmann et al. (1987:48) wird angenommen, dass sich bei EMiL diese Angaben auf die Zwischennutzung auswirken (vgl. Kapitel 4.3.1.1). Als Pendant zur Schwarzbrache im Winter von CTool und ErosionCH wird bei EMiL eine ungünstige Bodenbearbeitung in Kombination mit einer Herbstfurche als Bestellverfahren gewählt. Die Zwischenkulturen bei CTool und ErosionCH werden nur nach den Getreidekulturen als Zwischennutzung gewählt, nach Körnermais und Zuckerrüben wird die Stoppelbrache im Winter beibehalten. Denn bei Sommerweizen nach

Körnermais käme es beim CTool bei Verwendung einer Zwischenkultur nach Körnermais beim Übergang zum Sommerweizen zu einer Überschneidung der Kalenderdaten und damit zu einem Loopjahr. Bei ErosionCH kann als Anfangsdatum der Zwischenkultur spätestens die Zeit zwischen 1. – 15.9. gewählt werden, wobei der Körnermais nach dem Kulturkalender von Mosimann & Rüttimann (2006: D5) erst am 23.10. geerntet wird. Diese Überschneidungen der Kalenderdaten liegen darin begründet, dass in der Praxis nach Körnermais oder Zuckerrüben i.d.R. keine Zwischenkultur gesät wird, weil diese Kulturen eben erst so spät geerntet werden. Weiter wird für die Zwischenkulturen als Bodenbearbeitungsverfahren nicht das Pflugverfahren sondern Mulchsaat mit unter 30% Bodenbedeckung verwendet, weil dieses Verfahren für Zwischenkulturen in der Praxis am meisten verwendet wird (Prasuhn 2017, unveröffentlicht: 6).

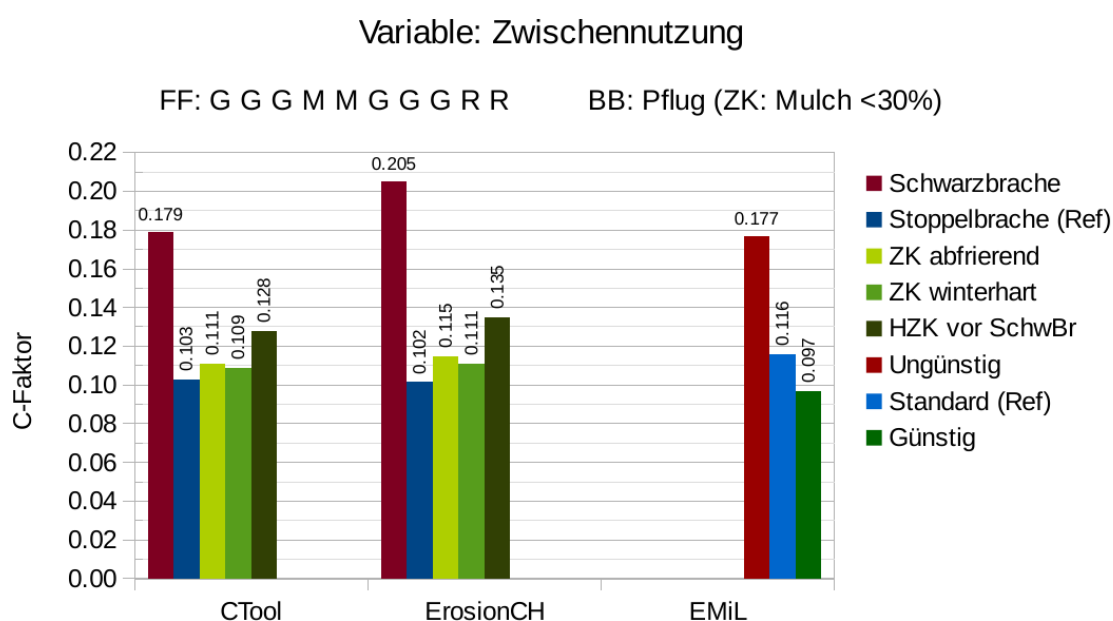


Abbildung 4.27: Diagramm der C-Faktoren nach Tool und Variation der Variable Zwischennutzung. EMiL erlaubt keine direkte Angabe der Zwischennutzung aber unterscheidet eine ungünstige, standardmässige und günstige Bodenbearbeitung (ZK=Zwischenkultur, HZK=Herbstzwischenkultur, Schw-Br=Schwarzbrache) (Kupferschmied 2018)

Die C-Faktoren der Referenzfruchtfolge sind in Abbildung 4.27 blau dargestellt und verwenden als Zwischennutzung eine Stoppelbrache im Winter bzw. bei EMiL die Standard-Bodenbearbeitung mit Frühjahrsfurche. Die C-Faktoren einer Schwarzbrache im Winter (rot) sind bei allen Tools deutlich höher als der Referenzwert. Beim CTool entspricht der C-Faktor der Schwarzbrache von 0.179 einer Zunahme um 73.8% gegenüber der Stoppelbrache. Bei ErosionCH verdoppelt sich der Wert der Schwarzbrache gegenüber der Stoppelbrache sogar auf 0.205. Für EMiL wird als Pendant zur Schwarzbrache der ungünstige Bodenbearbeitungsfall zusammen mit einer Herbstfurche verwendet und ergibt einen C-Faktor von

0.177, was einer Zunahme von 52.6% gegenüber dem Referenzfall entspricht. Die Werte von CTool und EMiL liegen damit sehr nahe beieinander, wobei die Veränderung gegenüber dem Referenzfall bei EMiL deutlich geringer ausfällt als beim CTool. ErosionCH hebt sich bei der Schwarzbrache mit einer Zunahme gegenüber der Stoppelbrache um 101.8% und einem C-Faktor über 0.2 klar von den beiden anderen Tools ab.

In den drei Fällen einer Zwischenkultur (grün) beim CTool und bei ErosionCH liegen die C-Faktoren der beiden Tools jeweils nahe beieinander. Für abfrierendes Zwischenfutter beträgt der C-Faktor beim CTool 0.111 und liegt um 7.8% über dem Referenzwert. Bei ErosionCH liegt der C-Faktor mit 0.115 um 13.2% höher als die Stoppelbrache. Die C-Faktoren einer winterharten Zwischenkultur liegen mit 0.109 beim CTool und 0.111 bei ErosionCH um 5.8% bzw. 9.3% höher als der Referenzwert und sind damit etwas niedriger als jene des abfrierenden Zwischenfutters. Für den Fall einer Herbstzwischenkultur mit anschließender Schwarzbrache im Winter fallen die C-Faktoren bei beiden Tools erwartungsgemäss höher aus. Das CTool verzeichnet eine Zunahme gegenüber der Referenz um 24.3% auf einen C-Faktor von 0.128 und ErosionCH eine Zunahme um 32.9% auf 0.135. Bei EMiL wurde zum Vergleich mit den Zwischenkulturen der günstige Bodenbearbeitungsfall mit Frühjahrsfurche verwendet. Im Gegensatz zu den beiden anderen Tools liegt der C-Faktor in diesem Fall mit 0.097 um 16.4% niedriger als der Referenzwert.

Die Abweichungen zwischen CTool und ErosionCH lassen sich einerseits durch leicht abweichende Kulturkalenderdaten und andererseits mit teils anderen RBA-Werten erklären. Die Kalenderdaten zu den Kulturperioden weichen zwischen den beiden Tools teilweise um einige Tage voneinander ab. Zudem verfügt ErosionCH über eine Angabe zum Beginn der Zwischenperiode, welche beim CTool nicht existiert. Jedoch geht aus der Dokumentation zu ErosionCH (Mosimann & Rüttimann 2006) nicht klar hervor, wie sich diese Angabe exakt auf die Berechnung auswirkt. Beim CTool beginnen die Zwischenperioden für Schwarz- oder Stoppelbrache jeweils direkt am Tag der Ernte der Vorkultur und dauern bis zur Bodenbearbeitung der Folgekultur. Die Kulturperioden einer Zwischenkultur sind beim CTool durch kulturabhängige Kalenderdaten definiert (vgl. Anhang A1.3 bis A1.6), bei ErosionCH aber unbekannt. Zusammen mit den neuen R-Faktordaten können die unterschiedlichen Kalenderdaten zu merklichen Abweichungen beim RRA und damit beim C-Faktor führen. Ferner verwendet ErosionCH für Stoppelbrachen nach Blattfrüchten unterschiedliche RBA-Werte abhängig vom gewählten Anfangsdatum der Zwischenphase (Mosimann & Rüttimann 2006: D10). Das CTool hingegen nutzt für Stoppelbrachen kulturabhängige RBA-Werte. Dies führt dazu, dass ErosionCH für eine Stoppelbrache nach Körnermais und nach Zuckerrüben jeweils den selben RBA von 0.13 für das Pflugverfahren verwendet, während das CTool für eine Stoppelbrache nach Körnermais einen RBA von 0.01 aber nach Zuckerrüben den RBA 0.44 nutzt. Der RBA von Körnermais ist deshalb so niedrig, weil er zusätzlich zu den Stopfeln im Boden sehr viel schwer zersetzbares Mulchmaterial von den Stängeln liefert, welches lange eine vollständige Mulchbedeckung garantiert. Bei Zuckerrüben verbleiben hingegen

einerseits keine Stoppeln im Boden und die Blätter sind schnell abgebaut und liefern keine anhaltende Bodenbedeckung. Für eine Stoppelbrache nach Halmfrüchten verwenden beide Tools den selben RBA von 0.03. Auch für die drei Fälle von Zwischenkulturen nutzen beide Tools identische RBA-Werte. Bei anderen Bodenbearbeitungsverfahren fällt dieser Unterschied etwas geringer aus, wobei das CTool dabei meist höhere RBA-Werte aufweist als ErosionCH. Dass die C-Faktoren von CTool und ErosionCH für die Stoppelbrache trotzdem so gut übereinstimmen liegt daran, dass die Unterschiede bei den RBA-Werten durch die Verschiebungen in den Kulturkalenderdaten und entsprechend abweichender RRA-Werte ausgeglichen werden. Sowohl bei der Schwarzbrache als auch bei den Zwischenkulturen liegt ErosionCH stets über den C-Faktoren vom CTool, während es bei der Stoppelbrache minim darunter liegt. Für die Zwischenkulturen und die Schwarzbrache verwenden beide Tools identische RBA-Werte. Die höheren C-Faktoren von ErosionCH sind folglich durch die Abweichungen beim Kulturkalender und den R-Faktordaten zu begründen. Da die Zwischenkulturen mehrere Kulturperioden mit meist niedrigen RBA-Werten aufweisen, sind die Abweichungen für die drei Fälle mit Zwischenkulturen zwischen CTool und ErosionCH vergleichsweise gering. Der Unterschied bei der Schwarzbrache fällt allerdings aufgrund des durchgängig hohen RBA-Werts von 0.32 deutlich höher aus, was sich ebenfalls im grösseren Unterschied bei Herbstzwischenfutter vor Schwarzbrache zeigt. Trotz den Abweichungen liegen die C-Faktoren beider Tools für die unterschiedlichen Zwischennutzungen, abgesehen von der Schwarzbrache, nahe zusammen. Dies bedeutet eine hohe Sensitivität für den C-Faktor zwischen Schwarzbrache und anderen Zwischennutzungen, wobei zwischen diesen eine mittlere Sensitivität für den C-Faktor herrscht. Abgesehen von Schwarzbrache sind die absoluten Werte sowie die Abstufungen zwischen den jeweiligen Werten für beide Tools sehr ähnlich (vgl. Abb. 4.27), wonach die C-Faktoren des CTools als plausibel zu beurteilen sind.

Ein Vergleich mit EMiL ist schwierig, da das Tool keine direkte Angabe der Zwischennutzung nach jeder Kultur erlaubt. Dass eine günstige Bodenbearbeitung dabei einen niedrigeren C-Faktor ausgibt als eine standardmässige Bearbeitung, ist naheliegend. Interessant ist, dass die C-Faktoren der standardmässigen Bodenbearbeitung nahe an den C-Faktoren der Zwischenkulturen von CTool und ErosionCH liegt, während die günstige Bearbeitung näher bei der Stoppelbrache der beiden anderen Tools ist. Möglicherweise hätte für die Referenzfruchtfolge mit Stoppelbrache bei EMiL die günstige Bodenbearbeitung gewählt werden müssen und für die Zwischenkulturen die standardmässige Bearbeitung. Dann lägen die C-Faktoren aller Tools sehr nahe beieinander. Mangels einer Dokumentation zu EMiL mit einer Beschreibung der unterschiedlichen Fälle, kann dies jedoch nicht bestätigt werden. Einzig die Schwarzbrache dürfte mit grosser Sicherheit der gewählten Kombination aus ungünstiger Bodenbearbeitung und Herbstfurche entsprechen. Die gute Übereinstimmung der C-Faktoren für die Schwarzbrache zwischen EMiL und dem CTool könnte entsprechend darauf hindeuten, dass die beiden Tools mit den richtigen Einstellungen bei EMiL durchaus auf sehr ähnliche C-Faktoren kommen könnten.

4.3.1.5 Vergleich der Korrekturfaktoren

Die Referenzfruchtfolge ist so gewählt, dass sie keine Korrekturfaktoren auslöst (vgl. Kapitel 4.3.1.1). Um nun die Auswirkungen der unterschiedlichen Korrekturfaktoren auf den C-Faktor vergleichen zu können, muss die Fruchtfolge so angepasst werden, dass die gewollten Korrekturfaktoren ausgelöst werden (vgl. hierzu Kapitel 4.2.7). Entsprechend wird für jeden Korrekturfaktor eine andere Fruchtfolge verwendet (vgl. Tabelle in Abb. 4.28), was die Vergleichbarkeit der Korrekturfaktoren untereinander weitgehend aufhebt. So werden im Folgenden die C-Faktoren der drei Tools für jeden Korrekturfaktor einzeln miteinander verglichen. Während das CTool und ErosionCH abgesehen vom Korrekturfaktor für Kunstwiese die selben Korrekturfaktoren verwenden, ist für EMiL nicht bekannt inwiefern Korrekturen der RBA-Werte oder des C-Faktors vorgenommen werden. Zudem verfügt EMiL nicht über Sommerraps als Hauptkultur, welcher für die Fruchtfolge mit den beiden kombinierten Korrekturfaktoren *Blattfruchtanteil von 50% und mehr* und *Getreide oder Raps nach einer Wurzelfrucht* verwendet wird. Auch Kunstwiese ist bei EMiL nicht vertreten. Entsprechend fehlen für EMiL die C-Faktoren zu jenen Korrekturfaktoren. Als Zwischennutzung wird grundsätzlich die Stoppelbrache der Referenz verwendet. Bei Kunstwiese wird jedoch im CTool der Zwischennutzungs-Fall 8 für Kunstwiese und bei ErosionCH keine Zwischenkultur verwendet, wie dies die beiden Tools voraussetzen.

Variable	Variationen	C-Faktoren		
		CTool	ErosionCH	EMiL
Korrekturfaktoren	Blattfruchtanteil > 50% FF: G G G M M M G G R R	0.167	0.152	0.192
	Wurzelfrucht vor Getreide FF: G R G R G R G R G G	0.104	0.091	0.092
	Blattfruchtanteil und Wurzelfrucht FF: R Rp R G R Rp R G R Rp	0.160	0.133	-
	Kunstwiese FF: Kw G G Kw M Kw Kw G Kw R	0.054	0.040	-

Abbildung 4.28: Tabelle von C-Faktoren nach Tool und Korrekturfaktor. EMiL verfügt nicht über Sommerraps und Kunstwiese, weshalb die entsprechenden Werte fehlen (G=Sommerweizen, M=Körnermais, R= Zuckerrüben, Rp=Sommerraps, Kw=Kunstwiese) (Kupferschmid 2018)

Liegt der Blattfruchtanteil einer Fruchtfolge bei 50% oder höher, so wird beim CTool und bei ErosionCH ein Korrekturfaktor auf die RBA-Werte der Blattfrüchte in der Fruchtfolge angewandt. Um diesen Korrekturfaktor auszulösen, wird in der ansonsten gleichbleibenden Referenzfruchtfolge ein Jahr Sommerweizen durch drittes Jahr Körnermais ersetzt (vgl. Tabelle in Abb. 4.28). Dies erhöht den C-Faktor gegenüber der Referenzfruchtfolge bei allen drei Tools deutlich um 50-60% auf 0.167 beim CTool, 0.152 bei ErosionCH und 0.192 bei EMiL. Obwohl der Austausch eines Jahres Sommerweizen durch ein weiteres Jahr Körnermais bereits einen merklichen Einfluss auf den C-Faktor hat, zeigt die starke Erhöhung der C-Faktoren, dass bei allen Tools ein Korrekturfaktor greifen dürfte. Der

korrigierte C-Faktor von ErosionCH ist dabei um 9% geringer und jener von EMiL um 15% höher als der korrigierte C-Faktor vom CTool. Da beim CTool und bei ErosionCH der selbe Korrekturfaktor von 1.5 bei Pflugverfahren verwendet wird, ist der Unterschied des C-Faktors einerseits auf die Abweichungen beim RRA und andererseits auf die unterschiedlichen RBA-Werte der Stoppelbrache nach den Blattfrüchten zurückzuführen (vgl. Kapitel 4.3.1.4). Das Verhältnis zur Referenzfruchtfolge kann nicht direkt für die Überprüfung der Plausibilität herangezogen werden, weil sich die Fruchtfolge um die eine Kultur geändert hat. Allerdings sollte die Differenz zur Referenzfruchtfolge trotzdem nicht zu gross ausfallen. Bei ErosionCH liegt der korrigierte C-Faktor um 49.6% über jenem der Referenz und entspricht damit interessanterweise sehr genau dem Korrekturfaktor, welcher allerdings nur auf die Blattfrüchte angewandt wird und nicht mit der Veränderung in der Fruchtfolge gleichgesetzt werden kann. Beim CTool ist der korrigierte C-Faktor um 61.3% höher als jener der Referenz, was gut auf die Veränderungen beim RRA zurückzuführen ist. Das zusätzliche Jahr Körnermais macht sich beim CTool mit einem jährlichen C-Anteil von über 0.3 deutlich bemerkbar. Bei EMiL ist der korrigierte C-Faktor einerseits deutlich höher als bei den anderen beiden Tools. Im Vergleich zur Referenzfruchtfolge hat der C-Faktor bei EMiL allerdings nur um 65.5% zugenommen und liegt damit nicht viel über dem CTool. Eine Zunahme von rund 60% gegenüber der Referenz ist für das CTool angesichts der veränderten Fruchtfolge mit einem zusätzlichen Jahr Körnermais anstatt Sommerweizen und dem verwendeten Korrekturfaktor von 1.5 eine plausible Veränderung. Auch ErosionCH weist eine plausible Zunahme auf, die allerdings etwas geringer ausfällt. Die Differenz liegt jedoch in einem Bereich, welcher sich durch veränderte RRA-Werte aufgrund abweichender Kulturkalender- und R-Faktordaten erklären lässt. Die unterschiedlichen RBA-Werte der Stoppelbrachen nach Blattfrüchten (vgl. Kapitel 4.3.1.4) tragen ebenfalls zum Unterschied zwischen CTool und ErosionCH bei. EMiL liegt zwar höher als die anderen beiden Tools, ist aber im Verhältnis zur Referenz nicht abwegig. Da für EMiL nicht bekannt ist, inwiefern ein Korrekturfaktor verwendet wird, wie hoch dieser ist und wie er verrechnet wird, ist die Zunahme gegenüber der Referenz im Vergleich mit dem CTool durchaus plausibel.

Folgt ein Getreide oder Raps auf eine Wurzelfrucht, werden die RBA-Werte vom Getreide oder Raps bei Pflugverfahren um 1.25 erhöht. Für diesen Korrekturfaktor wurde die Referenzfruchtfolge so stark verändert, dass ein Vergleich mit ihr nicht mehr möglich ist. Diese Anpassung wurde gemacht, damit der Effekt dieses Korrekturfaktors möglichst stark zum Tragen kommt. Die Fruchtfolge besteht aus einer wechselnden Abfolge von Sommerweizen und Zuckerrüben wobei der Blattfruchtanteil unter 50% gehalten wird (vgl. Tabelle in Abb. 4.28). Die C-Faktoren liegen nahe beieinander, wobei die Werte von ErosionCH und EMiL mit 0.091 bzw. 0.092 fast identisch sind. Das CTool liegt mit 0.104 etwas mehr als 10% über den beiden anderen Tools. Der Unterschied zwischen dem CTool und ErosionCH ist auch hier in einem Verhältnis, welches mit abweichenden RRA-Werten zu erklären ist. Die gute Übereinstimmung zwischen allen drei Tools deutet auf plausible Werte hin.

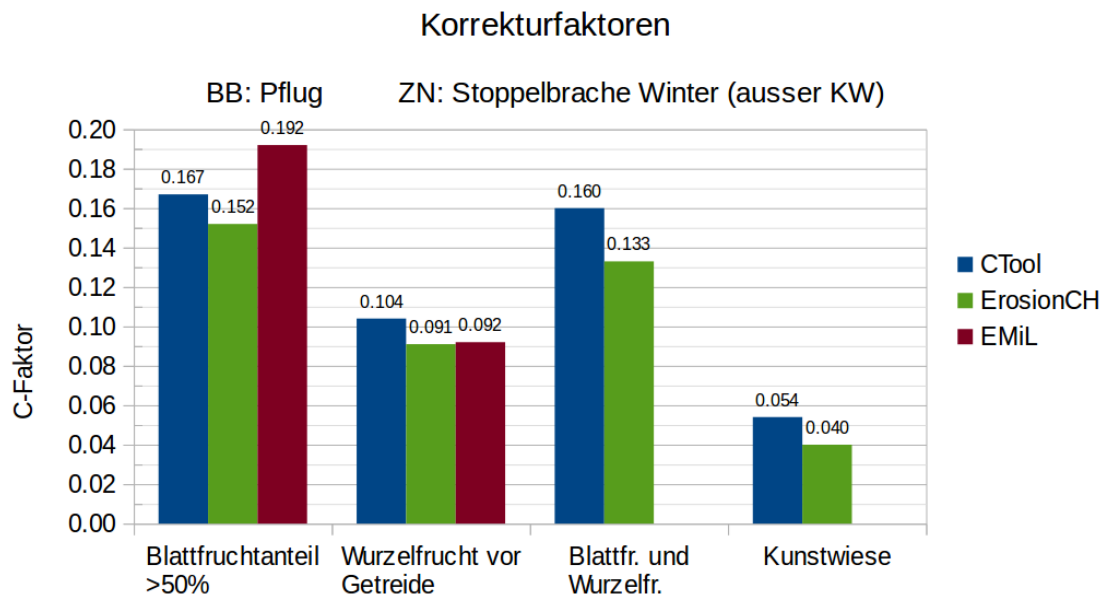


Abbildung 4.29: Diagramm der C-Faktoren nach Tool und Korrekturfaktoren (Kupferschmied 2018)

Beim CTool können die beiden Korrekturfaktoren für *Blattfruchtanteil von 50% und mehr* und *Getreide oder Raps nach einer Wurzelfrucht* im Falle von Raps, welcher eine Blattfrucht ist, gleichzeitig angewendet werden (vgl. Kapitel 4.2.7). Grundsätzlich sollte dies auch bei ErosionCH der Fall sein, wird in der Dokumentation von Mosimann & Rüttimann (2006) jedoch nicht explizit erwähnt. Um die Kombination der beiden Korrekturfaktoren zu testen, wird eine gemischte Fruchtfolge aus Zuckerrüben, Sommerraps und Sommerweizen mit einem Blattfruchtanteil von 80% verwendet (vgl. Tabelle in Abb. 4.28). Da EMiL nicht über Sommerraps verfügt, existieren zu diesem Vergleich keine Werte für EMiL. Der C-Faktor von ErosionCH liegt in diesem Fall mit 0.133 rund 17% unter dem vom CTool mit 0.160. Dieser Unterschied lässt sich vermutlich nicht alleine durch Abweichungen beim RRA erklären. Beim CTool wird auf den Raps nicht nur der Korrekturfaktor von 1.25 bei Pflugverfahren für die vorangegangene Wurzelfrucht, sondern auch der Korrekturfaktor von 1.5 für Blattfrüchte angewandt. Die tatsächlich für Raps verwendeten RBA-Werte entsprechen dem Durchschnitt der korrigierten RBA-Werte der beiden Korrekturfaktoren und liegen damit höher, als wenn nur der Korrekturfaktor für Raps nach Wurzelfrucht zum Einsatz kommt. Da aus der Dokumentation zu ErosionCH das Vorgehen zur Verrechnung der Korrekturfaktoren nicht hervorgeht, ist eine andere Berechnungsweise eine mögliche Erklärung für den Unterschied der C-Faktoren zwischen ErosionCH und CTool. Aufgrund des sehr hohen Blattfruchtanteils von 80% lässt sich der Unterschied auch durch andere RBA-Werte für die Stoppelbrache der Blattfrüchte erklären (vgl. Kapitel 4.3.1.4). Die fünf Jahre Zuckerrüben erhalten bei ErosionCH für die Stoppelbrache einen RBA von 0.13, während er beim CTool mit 0.44 deutlich höher liegt. Andererseits liegt bei ErosionCH

der RBA der Stoppelbrache nach Raps mit 0.60 im Vergleich zum RBA 0.03 vom CTool ebenfalls viel höher. Auch beim Raps ist der niedrige RBA des CTools, wie beim Körnermais, durch das viele schwer zersetzbares Mulchmaterial der Stängel begründet. Diese RBA-Werte tragen wohl stark zum Unterschied zwischen beiden Tools bei. Die Analyse des Outputs vom CTool zeigt jedenfalls, dass die hohen Beiträge an den C-Anteilen von den Zuckerrüben stammen, welche auf eine jährliche Summe der C-Anteile von über 0.27 kommen. Inwiefern die C-Faktoren der beiden Tools plausibel sind, lässt sich damit allerdings nur bedingt beurteilen. Angesichts der starken Korrekturfaktoren und dass beim CTool in dieser Fruchtfolge auf jede einzelne Kultur mindestens ein Korrekturfaktor angewandt wird, sind die Werte jedenfalls nicht abwegig.

Der letzte Korrekturfaktor betrifft Folgekulturen von Kunstwiese. Bei EMiL existiert keine Auswahl für Kunstwiese weshalb für EMiL zu diesem Vergleich keine Werte vorhanden sind. Auch für diesen Korrekturfaktor wurde eine stark angepasste Fruchtfolge aus 50% Kunstwiese, 30% Sommerweizen, sowie je 10% Zuckerrüben und Körnermais verwendet (vgl. Tabelle in Abb. 4.28). Diese wurde so gestaltet, dass einerseits im zweiten und dritten Jahr zweimal die selbe Kultur auf eine Kunstwiese im ersten Jahr folgt. Dies ist relevant, weil bei ErosionCH der Korrekturfaktor für Kunstwiese auch auf die übernächste Kultur im zweiten Jahr nach Kunstwiese noch angewendet wird. Beim CTool wird der Korrekturfaktor hingegen nur für die erste Folgekultur verwendet. Andererseits ist in der Fruchtfolge auch eine mehrjährige Kunstwiese enthalten, da die beiden Tools diese möglicherweise unterschiedlich verrechnen. Bei ErosionCH besteht die Auswahl zwischen einer Sommer-/Herbstaat und einer Frühjahrssaat. Da beim CTool nur eine Frühjahrssaat möglich ist, wird diese auch bei ErosionCH verwendet. Der C-Faktor von ErosionCH ist mit 0.040 um 26.7% niedriger als jener vom CTool mit 0.054. Diese Differenz ist einerseits auf die unterschiedliche Berechnungsweise von Kunstwiese selbst zurückzuführen. Denn um die Kunstwiese im CTool implementieren zu können, mussten einige Anpassungen auch am Kulturkalender vorgenommen werden (vgl. Kapitel 4.2.3.8 und 4.2.7). Andererseits bewirkt die Anwendung des Korrekturfaktors auf zwei Folgejahre bei ErosionCH einen geringeren C-Faktor der Fruchtfolge. Obwohl der C-Faktor des CTools im Verhältnis zu ErosionCH merklich höher liegt, ist der absolute Wert erwartungsgemäss gering. Dennoch überschätzt das CTool möglicherweise den C-Faktor von Fruchtfolgen mit besonders hohem Anteil einjähriger Kunstwiese aufgrund der stark auf die technische Umsetzung angepassten Berechnung von Kunstwiese. Für lange Phasen mehrjähriger Kunstwiese ist der Unterschied zwischen den beiden Tools deutlich geringer, da beide Tools den konstanten RBA-Wert von 0.004 verwenden (vgl. Kapitel 4.3.2.6).

4.3.1.6 Vergleich einer Fruchtfolge mit 40% Kartoffelanteil

Ein letzter systematischer Vergleich wird für eine Fruchtfolge mit 40% Kartoffelanteil gemacht. Die Fruchtfolge wurde so gestaltet, dass ein möglichst hoher Kartoffelanteil vorliegt

ohne dass Korrekturfaktoren greifen. Sie besteht aus sechs aufeinanderfolgenden Jahren Sommerweizen und anschliessend vier Jahren Speisekartoffeln (vgl. Abb. 4.30 (Titel)). Bodenbearbeitung und Zwischennutzung sind wie bei der Referenzfruchtfolge Pflug und Stoppelbrache im Winter. Dieser Vergleich wird gemacht, weil die RBA-Werte von Kartoffeln in der für das CTool verwendeten Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) teilweise drastisch erhöht worden sind. So liegen bspw. die RBA-Werte der Kulturperioden nach der Saatbettbereitung und nach der Ernte bei konventioneller Bodenbearbeitung über dem theoretischen Maximalwert von 1.0 einer gepflügten Schwarzbrache. Der RBA-Wert nach der Saat wird auf 2.0 gesetzt, weil die Dammformung nach aktuellem Forschungsstand (vgl. Chow & Rees 1994; Prasuhn et al. 2017) den Oberflächenabfluss kanalisiert und Bodenerosion begünstigt. Der RBA-Wert nach der Ernte wird auf 1.5 erhöht, weil der Boden nach der Ernte stellenweise durch die Erntemaschinen verdichtet und andererseits durch das Herausziehen der Knollen gelockert ist und da nur sehr wenig Ernterückstände auf dem Acker verbleiben (vgl. hierzu die Kapitel 2.3.2, 2.3.2.1, 3.1.1).

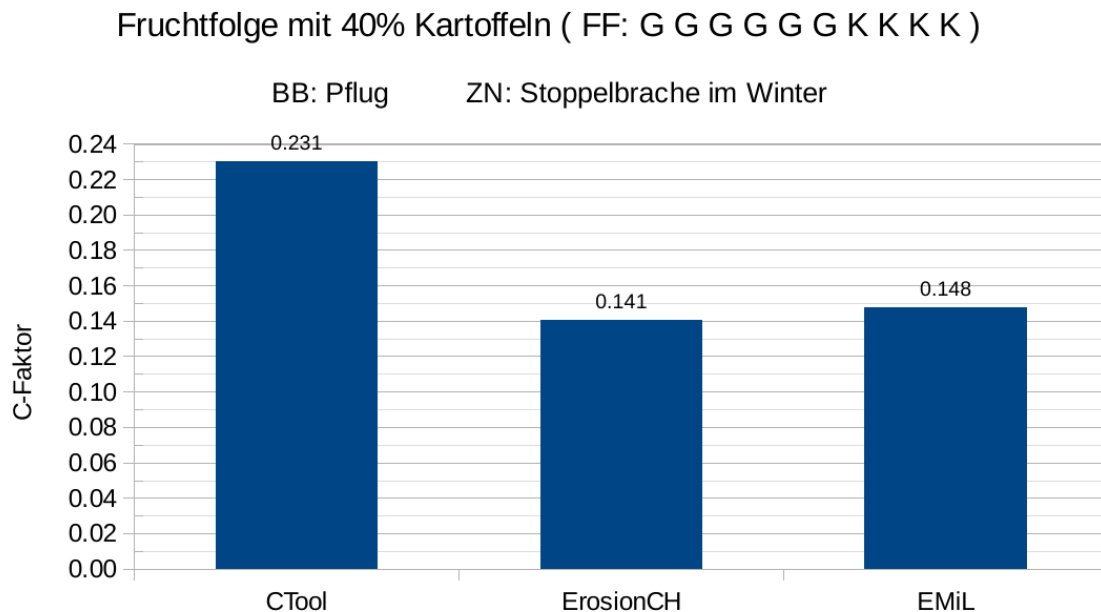


Abbildung 4.30: Diagramm der C-Faktoren nach Tool für eine Fruchtfolge mit 40% Kartoffelanteil (G=Sommerweizen, K=Speisekartoffeln) (Kupferschmied 2018)

Die C-Faktoren von ErosionCH und EMiL sind mit 0.141 bzw. 0.148 sehr ähnlich und damit knapp 40% geringer als der C-Faktor vom CTool mit 0.231. Eine Analyse des CTool-Outputs (Abb. 4.31) zeigt deutlich, dass die hohen RBA-Werte nach Saat und Ernte der Kartoffeln für den hohen C-Faktor der Fruchtfolge verantwortlich sind. Die jährlichen C-Anteile der Kartoffeln liegen bei 0.517 bzw. 0.487 im letzten Jahr, wobei die Kulturperiode nach der Saat einen C-Anteil von 0.101 und jene der Stoppelbrache nach der Ernte einen C-Anteil von 0.314 bzw. 0.285 im letzten Jahr aufweisen. Am meisten Einfluss auf den hohen C-Faktor hat demnach der RBA von 1.5 der Stoppelbrache. Bei ErosionCH wird

für die Stoppelbrache ein RBA-Wert von 0.6 verwendet und nach der Saat ein RBA von 0.8. Besonders die lange Stoppelbrache im Winter bewirkt also den viel höheren C-Faktor des CTools, welcher damit eine plausible Grössenordnung hat. In der Praxis folgt auf eine Kartoffelkultur i.d.R. keine Stoppelbrache, sondern eine Winterhauptkultur oder ein Zwischenfutter. Dies reduziert den hohen jährlichen C-Anteil von Kartoffeln in praxisnahen Fruchtfolgen grundsätzlich. Allerdings wirkt dem gegebenenfalls der Korrekturfaktor für Blattfrüchte entgegen, wie im folgenden Kapitel anhand eines praxisorientierten Vergleichs von C-Faktoren gezeigt werden kann (vgl. Kapitel 4.3.2.1, 4.3.2.2).

C-Anteile der Perioden:						Summe jährlicher C-Anteile:		
C-Ant 1 :	[0.0,	0.01,	0.017,	0.002,	0.005,	0.012]	CSumYr 1 :	0.045
C-Ant 2 :	[0.0,	0.01,	0.017,	0.002,	0.005,	0.012]	CSumYr 2 :	0.045
C-Ant 3 :	[0.0,	0.01,	0.017,	0.002,	0.005,	0.012]	CSumYr 3 :	0.045
C-Ant 4 :	[0.0,	0.01,	0.017,	0.002,	0.005,	0.012]	CSumYr 4 :	0.045
C-Ant 5 :	[0.0,	0.01,	0.017,	0.002,	0.005,	0.012]	CSumYr 5 :	0.045
C-Ant 6 :	[0.0,	0.01,	0.017,	0.002,	0.005,	0.012]	CSumYr 6 :	0.045
C-Ant 7 :	[0.0,	0.101,	0.035,	0.001,	0.065,	0.314]	CSumYr 7 :	0.517
C-Ant 8 :	[0.0,	0.101,	0.035,	0.001,	0.065,	0.314]	CSumYr 8 :	0.517
C-Ant 9 :	[0.0,	0.101,	0.035,	0.001,	0.065,	0.314]	CSumYr 9 :	0.517
C-Ant 10 :	[0.0,	0.101,	0.035,	0.001,	0.065,	0.285]	CSumYr 10 :	0.487

Abbildung 4.31: Ausschnitt aus dem Output des CTools zur Berechnung einer Fruchtfolge mit 40% Kartoffelanteil mit den C-Anteilen der Kulturperioden und den jährlichen Summen. Die Jahre 1 bis 6 sind Sommerweizen, die Jahre 7 bis 10 Speisekartoffeln jeweils mit Pflugverfahren und Stoppelbrache im Winter (Kupferschmied 2018)

4.3.2 Praxisorientierter Vergleich von C-Faktoren nach Tool und Fruchtfolge

Ergänzend zum systematischen Vergleich von C-Faktoren im vorherigen Kapitel (4.3.1) werden nun C-Faktoren der drei Tools CTool, ErosionCH und EMiL für praxisnahe Fruchtfolgen analysiert. Mit diesem praxisorientierten Vergleich sollen die C-Faktoren zusätzlich für realistische Fruchtfolgen auf ihre Plausibilität geprüft werden und eine Aussage zur Praxistauglichkeit des CTools ermöglichen. Die Fruchtfolgen wurden mithilfe von Expertenwissen zusammengestellt und entsprechen realen Fruchtfolgen aus dem Berner Mittelland. Insgesamt werden die C-Faktoren von sechs Fruchtfolgen verglichen. Die ersten beiden Fruchtfolgen weisen einen Kartoffelanteil von 20% auf und wurden aufgrund der angepassten RBA-Werte von Kartoffeln in der beim CTool verwendeten Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) ausgewählt. Die dritte und vierte Fruchtfolge weisen einen hohen Blattfruchtanteil von mindestens 50% auf, wobei in der dritten Fruchtfolge vorwiegend konventionelle Bodenbearbeitung mit Pflug zum Einsatz kommt, während die vierte für Blattfrüchte mehrheitlich konservierende Bearbeitungsverfahren wie Mulch- und Direktsaat verwendet. Die fünfte Fruchtfolge weist einen hohen Getreideanteil auf und die sechste kennzeichnet sich durch eine fünfjährige Kunstwiese aus. In Abbildung 4.32 sind

die C-Faktoren nach Tool für die sechs Fruchtfolgen dargestellt. Im Folgenden wird jede Fruchtfolge einzeln analysiert.

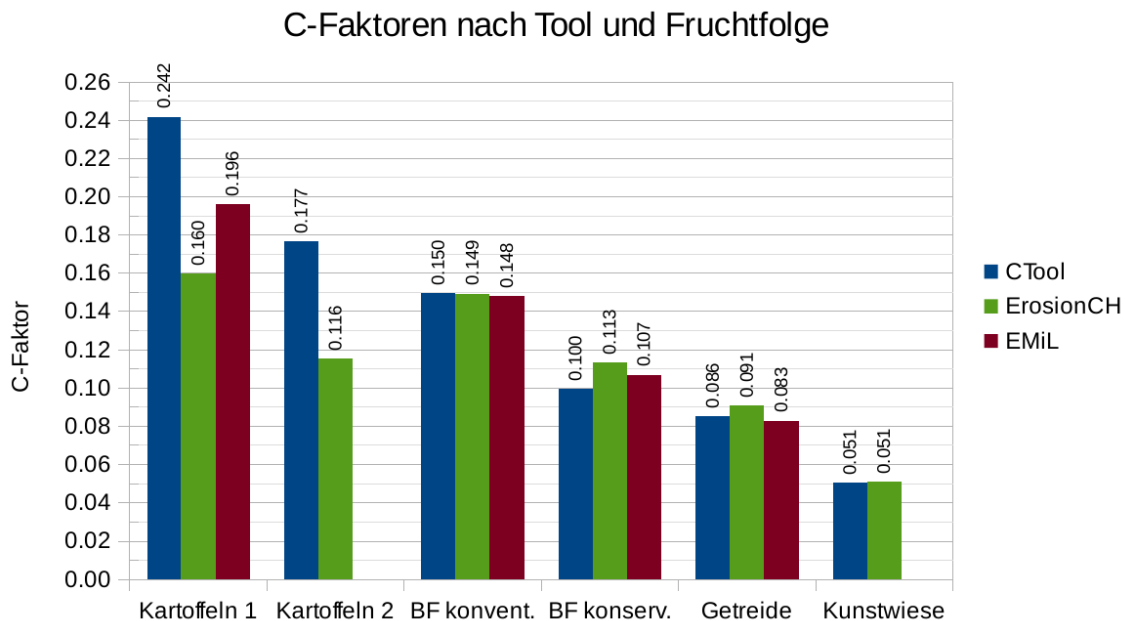


Abbildung 4.32: C-Faktoren nach Tool für sechs reale Fruchtfolgen. EMiL verfügt nicht über Kunstwiese weshalb für die Fruchtfolgen Kartoffeln 2 und Kunstwiese keine Werte verfügbar sind (Kupferschmied 2018)

4.3.2.1 Fruchtfolge mit 20% Kartoffeln (1) bei 50% Blattfruchtanteil und konventioneller Bodenbearbeitung

Die erste Kartoffel-Fruchtfolge enthält 20% Saatkartoffeln, 20% Silomais und 10% Zuckerrüben und erreicht damit einen Blattfruchtanteil von 50%. Die restlichen 50% decken Winterweizen und Wintergerste ab. Die verwendete Bodenbearbeitung der Hauptkulturen ist das Pflugverfahren, ausser bei den Zuckerrüben kommt Direktsaat zum Einsatz. Blatt- und Halmfrüchte wechseln sich ab, wobei auf die Halmfrüchte jeweils eine Zwischenkultur mit Mulchsaat folgt (vgl. Abb. 4.33).

Bei dieser ersten Kartoffel-Fruchtfolge liegen die C-Faktoren der beiden Tools ErosionCH und EMiL deutlich unter jenem des CTools. Der C-Faktor von EMiL liegt mit 0.196 19% niedriger als das CTool und jener von ErosionCH mit 0.160 gar knapp 34% tiefer, womit sich der C-Faktor von EMiL etwa mittig zwischen den Werten der anderen beiden Tools einordnen lässt (vgl. Abb. 4.32, 4.33). Der hohe C-Faktor des CTools von 0.242 ist einerseits durch die neuen, hohen RBA-Werte von Kartoffeln und andererseits durch die Auswirkungen von Korrekturfaktoren zu erklären. Durch den Blattfruchtanteil von 50% werden die RBA-Werte aller Blattfrüchte mit Pflugverfahren um den Faktor 1.5 erhöht. Die Zuckerrüben erhalten aufgrund des verwendeten Direktsaatverfahrens keine

Fruchtfolge mit Kartoffeln 1

Jahr	Hauptkultur	BB HK	Zwischennutzung	BB ZN
Jahr 1	Silomais	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 2	Winterweizen Standard	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Mulch >30%
Jahr 3	Saatkartoffeln	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 4	Wintergerste	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Mulch <30%
Jahr 5	Silomais	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 6	Winterweizen Standard	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Mulch <30%
Jahr 7	Saatkartoffeln	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 8	Wintergerste	Pflug	Zwischenfutter abfrierend	Mulch <30%
Jahr 9	Zuckerrüben	Direktsaat	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 10	Winterweizen nach Rüben, Körnermais	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Mulch <30%

Tool	C-Faktor
CTool	0.242
ErosionCH	0.160
EMiL	0.196

Abkürzungen: BB=Bodenbearbeitung
HK=Hauptkultur
ZN=Zwischennutzung

Abbildung 4.33: Kartoffel-Fruchtfolge 1 mit C-Faktoren nach Tool (Kupferschmied 2018)

RBA-Erhöhung. Zusätzlich werden für die Jahre 4, 8 und 10 die RBA-Werte der Getreide um den Faktor 1.25 erhöht, weil sie auf Wurzelfrüchte folgen. Diese Korrekturen wirken sich unter anderem merklich auf den Silomais, die Saatkartoffeln und den Winterweizen nach Zuckerrüben aus (vgl. Abb. 4.34). Die beiden Jahre Silomais tragen je mit jährlichen C-Anteilen von 0.3 zum hohen C-Faktor bei und das letzte Jahr Winterweizen mit über 0.1. Am stärksten wirken sich aber die Saatkartoffeln mit jährlichen C-Anteilen von 0.674 aus. Diese hohen Werte entstehen in erster Linie durch die hohen RBAs von 3.0 nach der Saat und 2.25 nach der Ernte. Während der RRA in der Periode nach der Saat nur 4.3% beträgt, fallen in der Zeit zwischen der Ernte der Kartoffeln und der Bodenbearbeitung der folgenden Wintergerste vom 12.8. bis 26.9. ganze 18.7% des erosiven Jahresniederschlags an, was zusammen mit dem hohen RBA von 2.25 einen C-Anteil von 0.421 allein in dieser Periode bewirkt. In der neuen Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht), welche das CTool verwendet, wurden die RBA-Werte von Kartoffeln unter anderem für die Perioden nach der Saat auf 2.0 und nach der Ernte auf 1.5 erhöht (vgl. Kapitel 2.3.2.1, 3.1.1). Zusammen mit dem Korrekturfaktor für Blattfrüchte von 1.5 kommen die hohen RBA-Werte der beiden Perioden zustande. Der hohe C-Faktor vom CTool lässt sich somit plausibel erklären. Der Vergleich mit den C-Faktoren von ErosionCH (0.160) und EMiL (0.196) zeigt dann auch, dass ErosionCH den C-Anteil von Kartoffeln wohl unterschätzt (vgl. Abb. 4.32, 4.33). Die auf Chow & Rees (1994) gestützte Überarbeitung der Datensätze von ErosionCH (Mosimann & Rüttimann 2006) durch Prasuhn (2017, unveröffentlicht) bewirkt für Fruchtfolgen mit Kartoffeln beim CTool folglich den angestrebten höheren C-Faktor gegenüber ErosionCH. Damit sind Kartoffeln beim CTool die mit Abstand sensitivsten Ackerfrüchte bezüglich ihrer Auswirkung auf den C-Faktor. Ob die zusätzliche Erhöhung der RBA-Werte von Kartoffeln durch den Korrekturfaktor für Blattfrüchte gar zu einer

Überschätzung des C-Faktors führt, kann mit den vorliegenden Daten nicht beurteilt werden und müsste in zukünftigen Arbeiten untersucht werden.

C-Anteile der Perioden:						Summe jährlicher C-Anteile:								
C-Ant 1 :	[0.0,	0.121,	0.095,	0.011,	0.064,	0.01]	CSumYr 1 :	0.3						
C-Ant 2 :	[0.001,	0.031,	0.026,	0.0,	0.005,	0.002,	0.0,	0.01,	0.002,	0.001,	0.002,	0.0]	CSumYr 2 :	0.081
C-Ant 3 :	[0.0,	0.129,	0.043,	0.002,	0.078,	0.421]	CSumYr 3 :	0.674						
C-Ant 4 :	[0.0,	0.015,	0.016,	0.003,	0.004,	0.002,	0.001,	0.025,	0.007,	0.001,	0.004,	0.0]	CSumYr 4 :	0.08
C-Ant 5 :	[0.0,	0.121,	0.095,	0.011,	0.064,	0.01]	CSumYr 5 :	0.3						
C-Ant 6 :	[0.001,	0.031,	0.026,	0.0,	0.005,	0.002,	0.0,	0.015,	0.003,	0.001,	0.002,	0.0]	CSumYr 6 :	0.087
C-Ant 7 :	[0.0,	0.129,	0.043,	0.002,	0.078,	0.421]	CSumYr 7 :	0.674						
C-Ant 8 :	[0.0,	0.015,	0.016,	0.003,	0.004,	0.002,	0.001,	0.025,	0.007,	0.001,	0.007,	0.0]	CSumYr 8 :	0.082
C-Ant 9 :	[0.0,	0.006,	0.007,	0.003,	0.018,	0.001]	CSumYr 9 :	0.035						
C-Ant 10 :	[0.001,	0.063,	0.008,	0.001,	0.006,	0.002,	0.0,	0.015,	0.003,	0.001,	0.003,	0.0]	CSumYr 10 :	0.105

Abbildung 4.34: Ausschnitt aus dem Output des CTools zur Berechnung der Kartoffeln-Fruchtfolge 1 mit den C-Anteilen der Kulturperioden und den jährlichen Summen (Kupferschmied 2018)

4.3.2.2 Fruchtfolge mit 20% Kartoffeln (2) bei 60% Blattfruchtanteil, teils konservierender Bodenbearbeitung und Kunstwiese

Die zweite Kartoffel-Fruchtfolge besteht aus 20% Saatkartoffeln, 20% Zuckerrüben und 20% Sommereiwisserbsen und erreicht damit einen Blattfruchtanteil von 60%. Hinzu kommen 30% Winterweizen und eine einjährige Kunstwiese. Die Bodenbearbeitung wird durch Pflugverfahren und Mulchsaat getätigt. Sowohl nach Getreide wie auch nach Blattfrüchten wird meist eine Zwischenkultur gesät, sofern keine Winterkultur oder Kunstwiese folgt (vgl. Abb. 4.35). Bei ErosionCH wird die Kunstwiese im Herbst gesät, während das CTool technisch nur eine Frühjahrssaat erlaubt. Da bei EMiL keine Kunstwiese auswählbar ist, sind zu dieser Fruchtfolge für EMiL keine Daten verfügbar.

Fruchtfolge mit Kartoffeln 2

Jahr	Hauptkultur	BB HK	Zwischennutzung	BB ZN
Jahr 1	Saatkartoffeln	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 2	Winterweizen Standard	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Mulch >30%
Jahr 3	Zuckerrüben	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 4	Winterweizen nach Rüben, Körnermais	Mulch <30%	Zwischenfutter winterhart	Mulch <30%
Jahr 5	Saatkartoffeln	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Pflug
Jahr 6	Sommereiwisserbsen	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 7	Winterweizen Standard	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 8	Kunstwiese 1. Jahr	Mulch >30%	Kunstwiese	keine
Jahr 9	Sommereiwisserbsen	Mulch >30%	Zwischenfutter winterhart	Mulch <30%
Jahr 10	Zuckerrüben	Mulch >30%	Stoppelbrache im Winter	keine

Tool	C-Faktor
CTool	0.177
ErosionCH	0.116
EMiL (keine Kunstwiese möglich)	-

Abkürzungen: BB=Bodenbearbeitung
HK=Hauptkultur
ZN=Zwischennutzung

Abbildung 4.35: Kartoffel-Fruchtfolge 2 mit C-Faktoren nach Tool (Kupferschmied 2018)

Auch bei dieser zweiten Kartoffel-Fruchtfolge liegt der C-Faktor von ErosionCH mit 0.116, wie bereits bei der ersten Kartoffel-Fruchtfolge, um die 34% niedriger als das CTool mit

einem C-Faktor von 0.177. Der grundsätzlich deutlich niedrigere C-Faktor dieser zweiten Kartoffel-Fruchtfolge gegenüber der ersten ist durch die teilweise verwendete konservierende Bodenbearbeitung, die Zwischenkultur nach der zweiten Kartoffelkultur und die Kunstwiese zu begründen. Der jährliche C-Anteil vom ersten Jahr Saatkartoffeln liegt mit 0.712 (Abb. 4.36) noch höher als bei der ersten Kartoffel-Fruchtfolge (0.674, Abb. 4.34), da der auf die Kartoffeln folgende Winterweizen später gesät wird als die Wintergerste der ersten Kartoffel-Fruchtfolge. Dies führt zu einem RRA von 20.4% in der Periode von der Ernte der Kartoffeln (12.8.) bis zur Bodenbearbeitung des Winterweizens (14.10.) und resultiert zusammen mit dem korrigierten RBA (Blattfruchtanteil >50%) dieser Periode von 2.25 in einem hohen C-Anteil von 0.459 alleine für diese Periode. Der jährliche C-Anteil der zweiten Saatkartoffel-Kultur im fünften Jahr dieser Fruchtfolge ist mit 0.428 deutlich niedriger, was mit der auf die Kartoffeln folgenden Zwischenkultur zu erklären ist. Im zweiten und vierten Jahr der Fruchtfolge werden die RBA-Werte von Winterweizen mit den Korrekturfaktoren für Getreide nach Wurzelfrüchten erhöht, wobei sich dies im vierten Jahr aufgrund des Mulchsaatverfahrens nur geringfügig auf den C-Faktor auswirkt. Die Korrekturfaktoren für Blattfrüchte aufgrund des hohen Blattfruchtanteils wirken sich, abgesehen von den Saatkartoffeln, vor allem für die Zuckerrüben im dritten Jahr auf den C-Faktor aus. Dank dem teilweise verwendeten Mulchsaatverfahren und der RBA-Reduktion für die Eiweisserbsenkultur nach der Kunstwiese ist der C-Faktor dieser zweiten Kartoffel-Fruchtfolge entsprechend geringer. Dennoch machen sich die angepassten RBA-Werte für Kartoffeln der verwendeten Datengrundlage im Vergleich mit ErosionCH deutlich bemerkbar. Während ErosionCH beim systematischen Vergleich für eine Fruchtfolge mit 40% Kartoffelanteil einen um 39% geringeren C-Faktor aufweist (vgl. Kapitel 4.3.1.6), liegen die C-Faktoren für die beiden praxisorientierten Kartoffel-Fruchtfolgen mit 20% Kartoffelanteil rund 34% niedriger als jene des CTools. Diese konsequenten Verhältnisse und die Tatsache, dass bei all diesen Fruchtfolgen hauptsächlich die C-Anteile der Kartoffelkulturen für die hohen C-Faktoren verantwortlich sind, spricht für die Plausibilität der mit dem CTool berechneten C-Faktoren von Kartoffel-Fruchtfolgen.

C-Anteile der Perioden:	Summe jährlicher C-Anteile:
C-Ant 1 : [0.0, 0.129, 0.043, 0.002, 0.078, 0.459]	CsumYr 1 : 0.712
C-Ant 2 : [0.001, 0.039, 0.032, 0.0, 0.007, 0.002, 0.0, 0.01, 0.002, 0.001, 0.002, 0.0]	CsumYr 2 : 0.097
C-Ant 3 : [0.0, 0.086, 0.074, 0.009, 0.026, 0.004]	CsumYr 3 : 0.2
C-Ant 4 : [0.0, 0.028, 0.003, 0.001, 0.006, 0.002, 0.0, 0.015, 0.003, 0.001, 0.002, 0.0]	CsumYr 4 : 0.061
C-Ant 5 : [0.0, 0.129, 0.043, 0.002, 0.078, 0.12, 0.0, 0.031, 0.019, 0.002, 0.003, 0.0]	CsumYr 5 : 0.428
C-Ant 6 : [0.0, 0.015, 0.021, 0.006, 0.005, 0.018]	CsumYr 6 : 0.065
C-Ant 7 : [0.001, 0.031, 0.026, 0.0, 0.005, 0.013]	CsumYr 7 : 0.077
C-Ant 8 : [0.001, 0.0, 0.001, 0.001, 0.008, 0.0]	CsumYr 8 : 0.012
C-Ant 9 : [0.0, 0.002, 0.003, 0.003, 0.004, 0.002, 0.0, 0.013, 0.008, 0.001, 0.003, 0.0]	CsumYr 9 : 0.038
C-Ant 10 : [0.0, 0.009, 0.009, 0.006, 0.021, 0.032]	CsumYr 10 : 0.077

Abbildung 4.36: Ausschnitt aus dem Output des CTools zur Berechnung der Kartoffel-Fruchtfolge 2 mit den C-Anteilen der Kulturperioden und den jährlichen Summen (Kupferschmied 2018)

Betreffend der Sensitivität für den C-Faktor geht aus den beiden Kartoffel-Fruchtfolgen hervor, dass Kartoffeln aufgrund der hohen RBA-Werte der neuen Datengrundlage beim

CTool die mit Abstand höchste Sensitivität aufweisen. Maissorten weisen bei Pflugverfahren und mit dem Korrekturfaktor für Blattfrüchte einen jährlichen C-Anteil von etwa 0.3 auf und sind damit sensitiver als Zuckerrüben, welche unter gleichen Bedingungen auf einen jährlichen C-Anteil von 0.2 kommen. Sommereiwisserbsen sind, obwohl Blattfrüchte, selbst mit Korrekturfaktor etwas weniger sensitiv als Winterweizen ohne Korrektur.

4.3.2.3 Fruchtfolge mit 60% Blattfruchtanteil und konventioneller Bodenbearbeitung

Diese Fruchtfolge weist einen Blattfruchtanteil von 60% und überwiegend konventionelle Bodenbearbeitung mittels Pflugverfahren auf. Die Fruchtfolge setzt sich aus 40% Mais, 30% Winterweizen, 20% Winterraps und 10% Wintergerste zusammen. Abgesehen von einem Jahr Silomais mit Mulchsaat wird für alle Hauptkulturen das Pflugverfahren eingesetzt. Sofern auf eine Hauptkultur keine Winterkultur folgt, wird eine Zwischenkultur mit Mulchsaatverfahren gesät (vgl. Abb. 4.37).

Fruchtfolge mit Blattfrüchten und konventioneller Bodenbearbeitung

Jahr	Hauptkultur	BB HK	Zwischennutzung	BB ZN
Jahr 1	Winterraps	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 2	Winterweizen Standard	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Mulch >30%
Jahr 3	Körnermais	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Mulch >30%
Jahr 4	Silomais	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 5	Winterweizen Standard	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 6	Winterweizen Standard	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 7	Winterraps	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 8	Wintergerste	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Mulch <30%
Jahr 9	Silomais	Mulch <30%	Zwischenfutter abfrierend	Mulch <30%
Jahr 10	Silomais	Pflug	Zwischenfutter abfrierend	Mulch <30%

Tool	C-Faktor
CTool	0.150
ErosionCH	0.149
EMiL	0.148

Abkürzungen: BB=Bodenbearbeitung
HK=Hauptkultur
ZN=Zwischennutzung

Abbildung 4.37: Fruchtfolge mit hohem Blattfruchtanteil bei konventioneller Bodenbearbeitung und C-Faktoren nach Tool (Kupferschmied 2018)

Die C-Faktoren aller Tools sind bei dieser Fruchtfolge nahezu identisch. Vor allem die C-Faktoren vom CTool und von ErosionCH stimmen mit 0.1496 bzw. 0.1494 fast überein. Der C-Faktor von EMiL ist mit 0.148 lediglich um 1.1% geringer als jener vom CTool. Hohe C-Anteile im Bereich von 0.300 bis 0.318 werden durch die drei Maiskulturen mit konventioneller Bodenbearbeitung verursacht (vgl. Abb. 4.38). Silomais mit Mulchsaat und die beiden Jahre Winterraps mit Pflugverfahren schlagen mit jährlichen C-Anteilen von knapp unter 0.1 zu Buche. Damit sind Maissorten generell deutlich sensitiver für den C-Faktor als Raps. Die RBA-Werte aller Blattfrüchte werden beim CTool und ErosionCH aufgrund des Blattfruchtanteils von mindestens 50% um den Faktor 1.5 für Kulturen mit Pflugverfahren und um 1.35 für den Silomais mit Mulchverfahren erhöht.

Bei dieser Fruchtfolge entsteht beim CTool ein zusätzliches Loopjahr am Schluss der Fruchtfolge, da die Zwischenkultur vom letzten Jahr Silomais noch einen zusätzlichen Jahreswechsel bewirkt. Allerdings käme es auch ohne die Zwischenkultur bei dieser Fruchtfolge am Ende zu einem Loopjahr, da das Erntedatum von Silomais (28.9.) einen Monat nach dem Bodenbearbeitungsdatum vom die Fruchtfolge eröffnenden Winterraps (28.8.) liegt. Bei der angepassten Berechnungsweise wird das Bodenbearbeitungsdatum der ersten Kultur der Fruchtfolge am Schluss zur Bildung der letzten Kulturperiode der letzten Kultur der Fruchtfolge verwendet, um für die C-Faktor-Berechnung ganze Jahre zu erhalten (vgl. Kapitel 4.2.4). Falls das Erntedatum der letzten Kultur, wie bei dieser Fruchtfolge der Fall, nach dem Bodenbearbeitungsdatum der ersten Kultur liegt, kommt es folglich zu einem zusätzlichen Loopjahr, was den jährlichen C-Anteil der letzten Kultur erhöht. Da bei dieser Fruchtfolge das Loopjahr nach dem letzten Jahr Silomais durch eine Zwischenkultur mit geringen RBA-Werten abgedeckt ist, sind die zusätzlich anfallenden C-Anteile gering (vgl. Abb. 4.38) und wirken sich nur minimal auf den jährlichen C-Anteil und kaum auf den C-Faktor der Fruchtfolge aus. So liegt der jährliche C-Anteil vom Silomais mit Loopjahr im letzten Jahr der Fruchtfolge mit 0.318 nur leicht höher als etwa der Silomais vor Winterweizen im vierten Jahr mit 0.3 und beeinflusst damit den C-Faktor der Fruchtfolge nicht relevant. Um zu demonstrieren, wie stark sich ein solches Loopjahr allerdings auswirken könnte, wurde die Fruchtfolge im CTool ein zweites Mal gerechnet, wobei für das letzte Jahr Silomais eine Stoppelbrache anstatt der Zwischenkultur angegeben wurde. Der jährliche C-Anteil vom letzten Jahr Silomais erhöht sich dabei aufgrund des hohen RBA-Werts (0.66) der Stoppelbrache von Silomais mit Korrekturfaktor für hohen Blattfruchtanteil auf 0.891, was den C-Faktor der Fruchtfolge von 0.150 auf 0.207 ansteigen lässt. Inwiefern in der Berechnungsweise der beiden anderen Tools ebenfalls ein Loopjahr entsteht, kann ohne einen detaillierten Output mit Kalenderdaten und C-Anteilen nicht beurteilt werden. Bei ErosionCH müsste dies aufgrund der Kalenderdaten der Kulturen (Mosimann & Rüttimann 2006: D5) der Fall sein, doch ist nicht bekannt wie die Berechnungsweise von ErosionCH damit umgeht.

C-Anteile der Perioden:		Summe jährlicher C-Anteile:
C-Ant 1 :	[0.001, 0.047, 0.015, 0.002, 0.008, 0.019]	CSumYr 1 : 0.092
C-Ant 2 :	[0.001, 0.031, 0.026, 0.0, 0.005, 0.002, 0.0, 0.01, 0.002, 0.001, 0.003, 0.0]	CSumYr 2 : 0.082
C-Ant 3 :	[0.0, 0.132, 0.086, 0.008, 0.071, 0.0, 0.0, 0.003, 0.006, 0.0, 0.001, 0.0]	CSumYr 3 : 0.308
C-Ant 4 :	[0.0, 0.121, 0.095, 0.011, 0.064, 0.01]	CSumYr 4 : 0.3
C-Ant 5 :	[0.001, 0.031, 0.026, 0.0, 0.005, 0.009]	CSumYr 5 : 0.073
C-Ant 6 :	[0.001, 0.031, 0.026, 0.0, 0.005, 0.006]	CSumYr 6 : 0.069
C-Ant 7 :	[0.001, 0.047, 0.015, 0.002, 0.008, 0.018]	CSumYr 7 : 0.091
C-Ant 8 :	[0.0, 0.012, 0.013, 0.002, 0.003, 0.001, 0.001, 0.025, 0.007, 0.001, 0.004, 0.0]	CSumYr 8 : 0.072
C-Ant 9 :	[0.0, 0.031, 0.025, 0.003, 0.02, 0.001, 0.0, 0.005, 0.002, 0.002, 0.001, 0.0]	CSumYr 9 : 0.091
C-Ant 10 :	[0.0, 0.121, 0.095, 0.011, 0.064, 0.004, 0.0, 0.005, 0.002, 0.002, 0.015, 0.0]	CSumYr 10 : 0.318

Abbildung 4.38: Ausschnitt aus dem Output des CTools zur Berechnung der Blattfrucht-Fruchtfolge mit konventioneller Bodenbearbeitung mit den C-Anteilen der Kulturperioden und den jährlichen Summen (Kupferschmied 2018)

Ohne Loopjahr wäre der C-Faktor dieser Fruchtfolge beim CTool etwas tiefer, allerdings nur geringfügig. Die etwas geringeren C-Faktoren für Zwischenkulturen beim CTool aus dem

systematischen Vergleich (vgl. Kapitel 4.3.1.4 und Abb. 4.27), deuten jedenfalls darauf hin, dass der C-Faktor vom CTool bei dieser Fruchtfolge minimal tiefer als jener von ErosionCH sein dürfte. Die fast identischen C-Faktoren aller Tools und der nur minimal erhöhte jährliche C-Anteil vom letzten Jahr mit dem Loopjahr, sprechen für einen plausiblen C-Faktor vom CTool. Allerdings zeigt das Beispiel eines Loopjahres mit Stoppelbrache auf, dass sich bei der angepassten Berechnungsweise des CTools massive Fehler bei der C-Faktor-Berechnung einschleichen können, sofern es bei den Kalenderdaten der Fruchtfolge zu ungewollten Überschneidungen kommt. Entsprechend wichtig ist bei der Anwendung des Tools eine genaue Überprüfung des Kulturkalenders und der C-Anteile im Output.

4.3.2.4 Fruchtfolge mit 80% Blattfruchtanteil und mehrheitlich konservierender Bodenbearbeitung

Diese Fruchtfolge weist mit 80% einen überaus hohen Blattfruchtanteil und mehrheitlich konservierende Bodenbearbeitungsverfahren auf. Die Fruchtfolge besteht aus 50% Mais, 30% Zuckerrüben und 20% Winterweizen. Die Zwischennutzung ist durch Brachen und Zwischenkulturen bestimmt (vgl. Abb. 4.39).

Fruchtfolge mit Blattfrüchten und konservierender Bodenbearbeitung

Jahr	Hauptkultur	BB HK	Zwischennutzung	BB ZN
Jahr 1	Silomais	Mulch >30%	Schwarzbrache im Winter	Pflug
Jahr 2	Zuckerrüben	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 3	Winterweizen nach Rüben, Körnermais	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Mulch >30%
Jahr 4	Körnermais	Mulch <30%	Stoppelbrache im Winter	keine
Jahr 5	Zuckerrüben	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 6	Winterweizen nach Rüben, Körnermais	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Mulch <30%
Jahr 7	Silomais	Direktsaat	Zwischenfutter winterhart	Mulch >30%
Jahr 8	Silomais	Mulch <30%	Zwischenfutter winterhart	Mulch <30%
Jahr 9	Silomais	Mulch >30%	Zwischenfutter winterhart	Mulch <30%
Jahr 10	Zuckerrüben	Direktsaat	keine Zwischennutzung	keine

Tool	C-Faktor
CTool	0.100
ErosionCH	0.113
EMiL	0.107

Abkürzungen: BB=Bodenbearbeitung
HK=Hauptkultur
ZN=Zwischennutzung

Abbildung 4.39: Fruchtfolge mit hohem Blattfruchtanteil bei mehrheitlich konservierender Bodenbearbeitung und C-Faktoren nach Tool (Kupferschmied 2018)

Die C-Faktoren von ErosionCH und EMiL liegen bei dieser Fruchtfolge mit 0.113 bzw. 0.107 leicht höher als das CTool mit 0.100. Beim CTool steuern die Zuckerrüben mit 0.2 die höchsten C-Anteile zum C-Faktor bei, da bei diesen der Korrekturfaktor für Blattfrüchte aufgrund des Pflugverfahrens 1.5 beträgt. Bei den anderen Blattfrüchten mit Mulchverfahren fällt diese Korrektur geringer aus (1.35 bei <30% bzw. 1.20 bei >30% Mulchbedeckung) und beim Direktsaatverfahren wird gar keine Korrektur angewandt. Die beiden Jahre Winterweizen vermögen den C-Faktor mit jährlichen C-Anteilen von ca. 0.1

nicht merklich zu hemmen, da für sie der Korrekturfaktor für Getreide nach Wurzelfrüchten aufgrund des Pflugverfahrens 1.25 beträgt. Die Schwarzbrache drückt mit einem C-Anteil von 0.057 den ansonsten sehr geringen jährlichen C-Anteil vom ersten Jahr auf 0.087 hoch (vgl. Abb. 4.40).

C-Anteile der Perioden:	Summe jährlicher C-Anteile:
C-Ant 1 : [0.0, 0.011, 0.012, 0.001, 0.006, 0.057]	CSumYr 1 : 0.087
C-Ant 2 : [0.0, 0.086, 0.074, 0.009, 0.026, 0.004]	CSumYr 2 : 0.2
C-Ant 3 : [0.001, 0.063, 0.008, 0.001, 0.006, 0.002, 0.0, 0.01, 0.002, 0.001, 0.003, 0.0]	CSumYr 3 : 0.099
C-Ant 4 : [0.0, 0.034, 0.022, 0.003, 0.023, 0.002]	CSumYr 4 : 0.083
C-Ant 5 : [0.0, 0.086, 0.074, 0.009, 0.026, 0.004]	CSumYr 5 : 0.2
C-Ant 6 : [0.001, 0.063, 0.008, 0.001, 0.006, 0.002, 0.0, 0.015, 0.003, 0.001, 0.003, 0.0]	CSumYr 6 : 0.105
C-Ant 7 : [0.0, 0.007, 0.008, 0.001, 0.005, 0.001, 0.0, 0.003, 0.002, 0.002, 0.001, 0.0]	CSumYr 7 : 0.03
C-Ant 8 : [0.0, 0.031, 0.025, 0.003, 0.02, 0.001, 0.0, 0.005, 0.002, 0.002, 0.001, 0.0]	CSumYr 8 : 0.091
C-Ant 9 : [0.0, 0.011, 0.012, 0.001, 0.006, 0.001, 0.0, 0.005, 0.002, 0.002, 0.0, 0.0]	CSumYr 9 : 0.041
C-Ant 10 : [0.0, 0.006, 0.007, 0.003, 0.018, 0.028]	CSumYr 10 : 0.062

Abbildung 4.40: Ausschnitt aus dem Output des CTools zur Berechnung der Blattfrucht-Fruchtfolge mit konservierender Bodenbearbeitung mit den C-Anteilen der Kulturperioden und den jährlichen Summen (Kupferschmied 2018)

Wie aus Kapitel 4.3.1.3 und Abbildung 4.26 hervorgeht, sind die C-Faktoren für Fruchtfolgen mit konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren beim CTool etwas geringer als bei den beiden anderen Tools. Auch die C-Faktoren für Fruchtfolgen mit Zwischenkulturen sind beim CTool leicht tiefer als bei ErosionCH (vgl. Kapitel 4.3.1.4 und Abb. 4.27). Der Unterschied bei Schwarzbrache ist zwischen CTool und ErosionCH hingegen deutlicher, wobei die hier untersuchte Fruchtfolge nur eine Schwarzbrache enthält und die Auswirkung dieses Unterschieds begrenzt ist. Dennoch erklären die Erkenntnisse aus dem systematischen Vergleich den um 13% höheren C-Faktor von ErosionCH gegenüber dem CTool in dieser Fruchtfolge, wonach der C-Faktor vom CTool plausibel scheint. Bei der vorherigen Fruchtfolge aus Kapitel 4.3.2.3 wurde der Unterschied bei den Zwischenkulturen zwischen CTool und ErosionCH möglicherweise durch das Loopjahr beim CTool ausgeglichen und führte dort zu den fast identischen C-Faktoren. Auch die gute Übereinstimmung mit dem C-Faktor von EMiL, welcher knapp 7% höher liegt als jener vom CTool, spricht für einen plausiblen C-Faktor des CTools. Die C-Faktoren für konservierende Bodenbearbeitungsverfahren liegen beim systematischen Vergleich für EMiL zwar noch etwas höher als jene von ErosionCH, allerdings kennt EMiL nur ein Mulchverfahren mit einem generell tiefen C-Faktor (vgl. Kapitel 4.3.1.3 und Abb. 4.26).

4.3.2.5 Fruchtfolge mit 70% Getreideanteil

Diese Fruchtfolge weist einen hohen Getreideanteil von 70% bei gemischter Bodenbearbeitung auf. Sie besteht zu 50% aus Weizen, 20% Wintergerste, 20% Silomais und 10% Zuckerrüben. Zwei der drei Blattfrüchte sind mit konservierender Bodenbearbeitung angebaut, während bei Getreide mehrheitlich das Pflugverfahren zum Einsatz kommt. Sofern keine Winterkultur folgt, wird ein Zwischenfutter gesät (vgl. Abb. 4.41).

Fruchtfolge mit Getreide

Jahr	Hauptkultur	BB HK	Zwischennutzung	BB ZN
Jahr 1	Winterweizen Standard	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Mulch >30%
Jahr 2	Silomais	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 3	Winterweizen Standard	Pflug	Stoppelbrache vor Winterkultur	keine
Jahr 4	Wintergerste	Pflug	Zwischenfutter abfrierend	Pflug
Jahr 5	Sommerweizen	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Mulch <30%
Jahr 6	Silomais	Direktsaat	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 7	Winterweizen Standard	Mulch >30%	Stoppelbrache vor Winterkultur	keine
Jahr 8	Wintergerste	Mulch <30%	Zwischenfutter abfrierend	Mulch <30%
Jahr 9	Zuckerrüben	Mulch <30%	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 10	Winterweizen nach Rüben, Körnermais	Pflug	Stoppelbrache vor Winterkultur	keine

Tool	C-Faktor
CTool	0.086
ErosionCH	0.091
EMiL	0.083

Abkürzungen: BB=Bodenbearbeitung
HK=Hauptkultur
ZN=Zwischennutzung

Abbildung 4.41: Fruchtfolge mit hohem Getreideanteil und C-Faktoren nach Tool (Kupferschmied 2018)

Die drei Tools weisen für diese Fruchtfolge ähnliche C-Faktoren auf, wobei sich das CTool mit einem C-Faktor von 0.086 zwischen dem um 3% tiefer liegenden EMiL (0.083) und dem um 6% höher liegenden ErosionCH (0.091) befindet. Der C-Faktor dieser Fruchtfolge ist trotz der Blattfrüchte gering, da zwei der drei Blattfrüchte mit konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren angebaut werden und dadurch zu einem tiefen C-Faktor beitragen. Die beiden höchsten jährlichen C-Anteile stammen demnach vom konventionell angebauten Silomais im zweiten Jahr und der ebenfalls konventionell angebauten Wintergerste im vierten Jahr, da bei dieser auch die Zwischenkultur mit dem Pflugverfahren angebaut wird (vgl. Abb. 4.42). Der Korrekturfaktor für Winterweizen nach einer Wurzelfrucht im letzten Jahr

C-Anteile der Perioden:	Summe jährlicher C-Anteile:
C-Ant 1 : [0.001, 0.031, 0.026, 0.0, 0.005, 0.002, 0.0, 0.01, 0.002, 0.001, 0.003, 0.0]	CsumYr 1 : 0.082
C-Ant 2 : [0.0, 0.08, 0.064, 0.007, 0.042, 0.007]	CsumYr 2 : 0.2
C-Ant 3 : [0.001, 0.031, 0.026, 0.0, 0.005, 0.009]	CsumYr 3 : 0.072
C-Ant 4 : [0.0, 0.012, 0.013, 0.002, 0.003, 0.001, 0.003, 0.111, 0.03, 0.002, 0.013, 0.0]	CsumYr 4 : 0.192
C-Ant 5 : [0.0, 0.01, 0.017, 0.002, 0.005, 0.0, 0.002, 0.013, 0.004, 0.001, 0.003, 0.0]	CsumYr 5 : 0.056
C-Ant 6 : [0.0, 0.007, 0.008, 0.001, 0.005, 0.002]	CsumYr 6 : 0.023
C-Ant 7 : [0.0, 0.007, 0.005, 0.0, 0.005, 0.006]	CsumYr 7 : 0.024
C-Ant 8 : [0.0, 0.006, 0.005, 0.002, 0.003, 0.001, 0.001, 0.025, 0.007, 0.001, 0.007, 0.0]	CsumYr 8 : 0.059
C-Ant 9 : [0.0, 0.016, 0.014, 0.006, 0.018, 0.001]	CsumYr 9 : 0.055
C-Ant 10 : [0.001, 0.063, 0.008, 0.001, 0.006, 0.012]	CsumYr 10 : 0.092

Abbildung 4.42: Ausschnitt aus dem Output des CTools zur Berechnung der Getreide-Fruchtfolge mit den C-Anteilen der Kulturperioden und den jährlichen Summen (Kupferschmied 2018)

beträgt aufgrund des Pflugverfahrens 1.25 und führt damit zu einem jährlichen C-Anteil von knapp unter 0.1. Aufgrund der generell niedrigen RBA-Werte dieser Fruchtfolge wirken sich allfällige Unterschiede beim RRA zwischen den Tools kaum aus. Auch der geringe Anteil an Zwischenkulturen führt damit bei allen Tools zu ähnlichen C-Faktoren. Die C-Faktoren aller Tools sind somit als robust und plausibel zu beurteilen. Die grundsätzlich geringen RBA-Werte von Getreide machen diese für den C-Faktor gegenüber den meisten

Blattfrüchten weniger sensitiv. Allerdings sind Wintergetreide aufgrund des höheren RRA nach der Saat im Herbst sensitiver als Sommergetreide.

4.3.2.6 Fruchtfolge mit einer fünfjährigen Kunstwiese

Diese Fruchtfolge zeichnet sich durch eine mehrjährige Kunstwiese über fünf Jahre und einen hohen Anteil konservierender Bodenbearbeitung aus. Neben den 50% Kunstwiese besteht die Fruchtfolge weiter aus 30% Winterweizen sowie je 10% Silomais und Zuckerrüben. Sofern keine Winterkultur oder Kunstwiese folgt, wird eine Zwischenfrucht gesät (vgl. Abb. 4.43). Während ErosionCH für das erste Jahr Kunstwiese eine Sommer-/Herbstaat verwendet, ist beim CTool nur eine Frühjahrssaat von Kunstwiese möglich. Da bei EMiL keine Kunstwiese auswählbar ist, kann entsprechend kein C-Faktor für das Tool angegeben werden.

Fruchtfolge mit Kunstwiese

Jahr	Hauptkultur	BB HK	Zwischennutzung	BB ZN
Jahr 1	Winterweizen Standard	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Direktsaat
Jahr 2	Silomais	Pflug	Zwischenfutter winterhart	Mulch <30%
Jahr 3	Zuckerrüben	Pflug	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 4	Winterweizen nach Rüben, Körnermais	Direktsaat	keine Zwischennutzung	keine
Jahr 5	Kunstwiese 1. Jahr	Direktsaat	Kunstwiese	keine
Jahr 6	Kunstwiese Folgejahre	Direktsaat	Kunstwiese	keine
Jahr 7	Kunstwiese Folgejahre	Direktsaat	Kunstwiese	keine
Jahr 8	Kunstwiese Folgejahre	Direktsaat	Kunstwiese	keine
Jahr 9	Kunstwiese Folgejahre	Direktsaat	Kunstwiese	keine
Jahr 10	Winterweizen Standard	Direktsaat	Zwischenfutter winterhart	Mulch <30%

Tool	C-Faktor
CTool	0.051
ErosionCH	0.051
EMiL (keine Kunstwiese möglich)	-

Abkürzungen: BB=Bodenbearbeitung
 HK=Hauptkultur
 ZN=Zwischennutzung

Abbildung 4.43: Fruchtfolge mit einer fünfjährigen Kunstwiese und C-Faktoren nach Tool (Kupferschmied 2018)

Die C-Faktoren der beiden Tools ErosionCH und CTool sind für diese Fruchtfolge mit 0.0510 bzw. 0.0508 nahezu identisch. Die mit Abstand grössten jährlichen C-Anteile der Fruchtfolge werden durch die beiden konventionell angebauten Blattfrüchte im zweiten (0.206) und dritten (0.133) Jahr verursacht (Abb. 4.44). Der Korrekturfaktor auf Getreide nach einer Wurzelfrucht im vierten Jahr kommt aufgrund des Direktsaatverfahrens beim Winterweizen nicht zum Einsatz. Während sich die Unterschiede zwischen den Berechnungsweisen von CTool und ErosionCH in Bezug auf Kunstwiese beim systematischen Vergleich in Kapitel 4.3.1.5 noch deutlich bemerkbar gemacht haben (vgl. Abb. 4.29), wirken sie sich bei dieser Fruchtfolge kaum mehr aus. Dies liegt einerseits daran, dass beim systematischen Vergleich mehrere einjährige Kunstwiesen in der Fruchtfolge sind. Das jeweils erste Jahr Kunstwiese scheint bei ErosionCH merkliche Unterschiede bezüglich Kalenderdaten und

damit RRA aufzuweisen. Andererseits wendet ErosionCH den Korrekturfaktor für den positiven Carry-over-Effekt von Kunstwiese auf zwei Folgejahre an, während das CTool diesen Korrekturfaktor lediglich auf die erste Folgekultur nach Kunstwiese ansetzt. Bei dieser Fruchtfolge mit mehrjähriger Kunstwiese folgt am Schluss nur noch eine Kultur, wodurch sich dieser Unterschied nicht auswirken kann. Die C-Faktoren der beiden Tools sind für diese Fruchtfolge aber in erster Linie deshalb nahezu identisch, weil beide Tools die Folgejahre von mehrjähriger Kunstwiese durchgängig mit der RBA-Konstante 0.004 berechnen (vgl. Abb. 4.44). Entsprechend sind die C-Faktoren der beiden Tools als plausibel zu beurteilen.

C-Anteile der Perioden:	Summe jährlicher C-Anteile:
C-Ant 1 : [0.001, 0.031, 0.026, 0.0, 0.005, 0.002, 0.0, 0.007, 0.002, 0.0, 0.003, 0.0]	CSumYr 1 : 0.078
C-Ant 2 : [0.0, 0.08, 0.064, 0.007, 0.042, 0.003, 0.0, 0.005, 0.002, 0.002, 0.0, 0.0]	CSumYr 2 : 0.206
C-Ant 3 : [0.0, 0.058, 0.05, 0.006, 0.018, 0.003]	CSumYr 3 : 0.133
C-Ant 4 : [0.0, 0.009, 0.001, 0.0, 0.005, 0.009]	CSumYr 4 : 0.024
C-Ant 5 : [0.001, 0.0, 0.001, 0.0, 0.008, 0.0]	CSumYr 5 : 0.011
C-Ant 6 : [0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.003, 0.0]	CSumYr 6 : 0.004
C-Ant 7 : [0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.003, 0.0]	CSumYr 7 : 0.004
C-Ant 8 : [0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.003, 0.0]	CSumYr 8 : 0.004
C-Ant 9 : [0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.003, 0.004]	CSumYr 9 : 0.007
C-Ant 10 : [0.0, 0.005, 0.004, 0.0, 0.005, 0.001, 0.0, 0.015, 0.003, 0.001, 0.001, 0.0]	CSumYr 10 : 0.036

Abbildung 4.44: Ausschnitt aus dem Output des CTools zur Berechnung der Kunstwiese-Fruchtfolge mit den C-Anteilen der Kulturperioden und den jährlichen Summen (Kupferschmied 2018)

Da ErosionCH für das erste Jahr Kunstwiese eine Sommer-/Herbstaat verwendet, das CTool aber nur eine Frühjahrssaat erlaubt, wurde diese Fruchtfolge zusätzlich mit dem in Kapitel 4.2.3.8 erwähnten Trick für eine Annäherung an eine Herbstaat gerechnet. Dabei folgt im vierten Jahr auf den Winterweizen eine winterharte Zwischenkultur, welche grösstenteils identische RBA-Werte wie das erste Jahr Kunstwiese aufweist. Die erste Kunstwiesen-Hauptkultur startet dann direkt als *Kunstwiese Folgejahre* mit der RBA-Konstante 0.004 einer vollständig entwickelten Kunstwiese. Da sich der Kulturkalender einer Kunstwiese mit Herbstaat und der einer Zwischenkultur unterscheiden können, kommt es bei diesem Trick womöglich zu Abweichungen beim RRA. Dennoch dürfte dieser Trick eine gute Annäherung an eine Sommer-/Herbstaat von Kunstwiese sein. Der C-Faktor dieser Fruchtfolge reduziert sich mit Verwendung dieses Tricks minimal von 0.0508 bei Frühjahrssaat auf 0.0505.

5 Beantwortung der Forschungsfragen und Schlussfolgerung

Dank der ausführlichen Literatur- und Datenanalyse zur Generierung des Systemwissens, kann die vorliegende Masterarbeit in Kapitel 2 detailliert den aktuellen Wissensstand zum C-Faktor und dessen Relevanz bei der Berechnung des Erosionsrisikos aufzeigen. Besonders die zahlreichen Auswirkungen der Ackerkulturen und Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodeneigenschaften, welche durch den RBA ausgedrückt werden, machen den C-Faktor zu einem der komplexesten Faktoren der USLE. Entsprechend aufwändig gestaltet sich die empirische Erhebung von RBA-Werten mittels Feldversuchen. Dies erklärt unter anderem warum in der Schweiz nie empirische RBA-Werte erhoben wurden und auch heute noch viele Daten auf die Arbeiten von Wischmeier & Smith (1978) und Schwertmann et al. (1987) zurückgehen. Wie stark sich Veränderungen in den Datensätzen auf den C-Faktor auswirken können, zeigt die Arbeit besonders eindrücklich anhand der erhöhten RBA-Werten von Kartoffeln in der verwendeten Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht). Dass sich solche Anpassungen in den Daten des C-Faktors auch auf den Bodenabtrag auswirken, ist der von Auerswald (1987) beschriebenen hohen Sensitivität des C-Faktors zuzuschreiben. Die hohe Sensitivität bedeutet aber auch, dass durch eine Reduktion des C-Faktors das Erosionsrisiko deutlich verringert werden kann. Damit stellen Veränderungen in der Bewirtschaftung eine effektive Massnahme gegen Bodenerosion dar. Dies macht den C-Faktor für Forschung und Praxis gleichermassen relevant und widerspiegelt das Bedürfnis, den C-Faktor schweizweit und unter Verwendung aktuellster Daten in die Kartierung des Erosionsrisikos zu integrieren.

Aufgrund des dynamischen Charakters des C-Faktors kann für diesen im Gegensatz zu den anderen Faktoren der USLE kein schweizweiter Datensatz erstellt werden. Um den C-Faktor bei der Berechnung des Erosionsrisikos trotzdem berücksichtigen zu können, bietet sich die Entwicklung einer WebGIS-Applikation an, welche die Berechnung individueller C-Faktoren für einzelne Flächen und Fruchtfolgen erlaubt und diesen C-Faktor jeweils für die entsprechende Fläche in die ERK2 integriert. Da die ERK2 bereits in einer WebGIS-Umgebung angeboten wird und da auf diesem Weg von Seiten der Anwender keine zusätzliche Software oder Kenntnisse notwendig sind, stellt dieser Ansatz eine gute Lösung dar. Jedoch fehlten in der Schweiz bislang die Grundlagen für solch eine WebGIS-Applikation. Die vorliegende Masterarbeit hat diese Grundlagen in Form einer inhaltlich

und technisch angepassten Berechnungsweise des C-Faktors und deren automatisierten, technischen Operationalisierung nun geschaffen und dabei die folgenden drei zentralen Fragen beantwortet: Wie ist der C-Faktor zu berechnen, wie kann die Berechnung technisch operationalisiert werden und inwiefern sind die auf diese Weise berechneten C-Faktoren plausibel?

5.1 Fazit zur Konzeptionierung einer angepassten Berechnungsweise des C-Faktors

Mit den in Kapitel 2 und 4.1 geschilderten Erkenntnissen lässt sich die erste Forschungsfrage beantworten, die da lautet:

Wie muss die Berechnungsweise des C-Faktor angepasst werden, damit sie verschiedene Bewirtschaftungsszenarien abbilden kann, die aktuellsten Datensätze verwendet, schweizweit einsetzbar und technisch operationalisierbar ist?

Als Modellansatz für die Berechnungsweise wird die ABAG nach Schwertmann et al. (1987) verwendet. Der Subfaktoren-Ansatz zur C-Faktor-Berechnung der RUSLE (Renard et al. 1997) könnte zwar ein differenzierteres Bild zwischen verschiedenen Bewirtschaftungsszenarien zeichnen und womöglich exaktere C-Faktoren liefern als die ABAG. Allerdings sind in der Schweiz nicht alle Daten zu den zahlreichen Parametern dieses Subfaktoren-Ansatzes vorhanden und die Anwendung ist anspruchsvoll und aufwändig. Für die Berechnung des C-Faktors mit dem Ansatz der ABAG sind in der Schweiz hingegen aktuellste Datensätze von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) und Schmidt et al. (2016) verfügbar. Diese liefern Daten für alle wichtigen Ackerkulturen der Schweiz und erlauben kulturspezifische Angaben zum Bodenbearbeitungsverfahren und zur Zwischennutzung. Darüber hinaus lassen sie eine Unterscheidung in Tal- oder Hügelgebiet zu und weisen schweizweite Gültigkeit auf. Dadurch ermöglichen die Daten eine gute Differenzierung zwischen verschiedenen Bewirtschaftungsszenarien, ohne dass die Anwendung dabei durch zu viele Angaben zur Bewirtschaftung komplex und aufwändig wird. Dass die C-Faktor-Berechnung nach dem Modellansatz der ABAG grundsätzlich technisch in Form eines Software-Tools operationalisierbar ist, zeigen die beiden existierenden Tools ErosionCH und EMiL, welche beide auf der ABAG basieren. Mit der Entwicklung eines Prototyps des C-Faktor-Tools auf Basis der grundlegenden Berechnungsweise des C-Faktors nach Schwertmann et al. (1987) konnte bewiesen werden, dass eine Operationalisierung mit den neuen Daten und den gewählten technischen Ressourcen möglich ist.

Durch die Entwicklung des Prototyps und eine Analyse der neuen Datensätze konnten die nötigen Anpassungen an der herkömmlichen Berechnungsweise der ABAG identifiziert werden, welche zur Entwicklung eines C-Faktor-Tools (mit vollem durch die Datengrundlage

möglichen Funktionsumfang) erforderlich sind. Die Berechnungsweise der ABAG muss einerseits inhaltlich überarbeitet werden, um zusätzliche Informationen zur Bewirtschaftung, welche die neue Datengrundlage bietet, in die Berechnung des C-Faktors einfließen zu lassen. Diese zusätzlichen Informationen zur Bewirtschaftung umfassen gegenüber der herkömmlichen ABAG nach Schwertmann et al. (1987) Angaben zur Region und kulturspezifischen Zwischennutzung, sowie das Anwenden von Korrekturfaktoren. Neben einer inhaltlichen Überarbeitung ist zudem eine technische Anpassung der Berechnungsweise nötig, um das tabellenbasierte Verfahren der ABAG in eine scriptbasierte, programmierbare Berechnungsweise zu überführen. Dabei bilden insbesondere rückwirkende Abhängigkeiten zwischen Kulturen eine Herausforderung. Denn während bei einer manuellen Berechnung nach dem tabellenbasierten Verfahren leicht ein Wert bei Kultur X aufgrund einer bestimmten Angabe bei Kultur Y angepasst werden kann, sind solche rückbezüglichen Änderungen in der scriptbasierten Berechnung aufgrund der aufbauenden Logik von einfachen Computerprogrammen nicht möglich. Das Vorgehen zur Berechnung des C-Faktors muss folglich so angepasst werden, dass eine linear aufbauende Berechnung ohne Rückbezüge entsteht.

Diese angepasste Berechnungsweise des C-Faktors (vgl. Abb. 4.6) ist so aufgebaut, dass zuerst die Kalenderdaten zu den Kulturperioden der Hauptkulturen ermittelt werden. Anhand dieser Daten können anschliessend mit den Terminen zur Bodenbearbeitung der Hauptkulturen die Kalenderdaten der Zwischenperioden ergänzt werden. Auf welche Kulturkalender dabei zugegriffen wird, hängt von der Angabe zur Region ab, welche in der verwendeten Datengrundlage die kulturspezifischen Kalenderdaten der Kulturperioden bestimmt. Die Anzahl der Zwischenperioden hängt von der gewählten Zwischennutzung ab, während die Kalenderdaten dieser Zwischenperioden durch die jeweilige Hauptkultur definiert sind. Zu den Kalenderdaten aller Perioden werden im nächsten Schritt der Berechnung die entsprechenden R-Anteile ermittelt. Auch hier entscheidet die Wahl der Region auf welchen Datensatz zugegriffen wird. Die Berechnung der relativen R-Anteile erfolgt analog zum Vorgehen der ABAG. Die RBA-Werte zu den Kulturperioden der Hauptkulturen sind durch die Hauptkultur und ihr Bodenbearbeitungsverfahren bestimmt. Die RBA-Werte der Zwischenperioden hängen hingegen von der Zwischennutzung und im Falle einer Zwischenkultur von dessen Bodenbearbeitungsverfahren ab. Die Zusammensetzung der Fruchtfolge ist ausschlaggebend ob Korrekturfaktoren auf die RBA-Werte angewendet werden. Abhängig von der Bodenbearbeitung der betroffenen Kulturen sind für die einzelnen Korrekturfälle unterschiedlich grosse Faktoren anzuwenden. Mit den korrigierten RBA-Werten und den RRA-Werten werden dann die C-Anteile aller Kulturperioden berechnet, aufsummiert und durch die Anzahl Jahre der Fruchtfolge geteilt, um den C-Faktor der Fruchtfolge zu erhalten.

Mit dieser angepassten Berechnungsweise können unter Verwendung der aktuellen Datensätzen von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) und Schmidt et al. (2016) schweizweit C-Faktoren für Fruchtfolgen berechnet werden. Da für die Berechnung aus zahlreichen

Ackerfrüchten ausgewählt werden kann und Angaben zur Region und zur kulturspezifischen Bodenbearbeitung und Zwischennutzung möglich sind, können mit dieser Berechnungsweise die vielseitigen Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsszenarien auf das Erosionsrisiko abgebildet und differenziert werden. Dank des linearen Aufbaus der Berechnung ohne rückwirkende Abhängigkeiten, kann diese technisch in Form eines Software-Tools operationalisiert werden.

5.2 Fazit zur Operationalisierung der angepassten Berechnungsweise

Die in den Kapiteln 4.1 und 4.2 beschriebenen Erkenntnisse tragen zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage bei, die da lautet:

Welche Ressourcen eignen sich zur Entwicklung eines C-Faktor-Tools und wie ist dieses zu programmieren, um in eine WebGIS-Umgebung integriert werden zu können?

Zur technischen Operationalisierung der angepassten Berechnungsweise des C-Faktors in Form eines Software-Tools wird die Programmiersprache Python und die räumlich-relationale Datenbank PostGIS verwendet. Python ist gut für die technische Umsetzung der Berechnungsweise geeignet und arbeitet dank dem SQL-Adapter Psycopg2 reibungslos mit PostGIS zusammen. Die Fähigkeit Daten aus der Datenbank in iterierbare Listen zu schreiben und über Indices gezielt aufzurufen, ermöglicht eine scriptbasierte Berechnungsweise, welche dem tabellenbasierten Vorgehen relativ ähnlich ist. Das Definieren von Funktionen erlaubt es den ausführenden Code der Berechnung kompakt und übersichtlich zu halten. Mehrere verwandte Funktionen wie bspw. jene zum Kulturkalender können in einer Klasse zusammengefasst werden. Als objektorientierte Programmiersprache erlaubt es Python einer Klasse ein globales Argument bzw. Objekt zu geben. Dadurch kann im C-Faktor-Tool bspw. die angegebene Auswahl zur Region von jeder Funktion der Klasse Kulturkalender verwendet werden. Dank der Integration der Region auf diese Weise ist es zukünftig auch möglich weitere Regionen hinzuzufügen, ohne die technische Struktur des Tools zu ändern. Sollten in Zukunft etwa Daten für unterschiedliche Regionen wie West- oder Ostschweiz verfügbar sein, liessen sich diese im Tool verwenden.

Die technische Umsetzung der C-Faktor-Berechnung stellt sich aufgrund der zusätzlichen Angaben zur Bewirtschaftung, welche die verwendete neue Datengrundlage bietet, als sehr komplex heraus. Trotzdem können mit den gewählten Ressourcen und den limitierten Programmierkenntnissen des Autors fast alle praxisrelevanten Fälle der C-Faktor-Berechnung technisch realisiert werden. Eine Ausnahme bildet hier der siebte Zwischennutzungs-Fall, welcher eine Herbstzwischenkultur vor einer Winterhauptkultur vorsieht. Da für diesen Fall die notwendigerweise zuvor festgelegten Kalenderdaten der Hauptkultur angepasst werden

müssten und derartige rückbezügliche Veränderungen mit dem gewählten technischen Ansatz nicht möglich sind, kann dieser Fall im C-Faktor-Tool nicht umgesetzt werden. In der Praxis tritt der Fall allerdings eher selten auf, wodurch der Praxistauglichkeit des Tools folglich wenig abgeht. Die Implementierung von Kunstwiese ist beim C-Faktor-Tool zwar gelungen, jedoch ist nur eine Frühjahrssaat und keine Herbstsaat möglich. Spezielle Fälle wie etwa der Umbruch einer ertragsarmen Winterkultur im Frühjahr auf eine Sommerkultur sind mit dem C-Faktor-Tool nicht möglich. Da das Tool primär für die Berechnung von Szenarien und nicht zur Rekonstruktion vergangener Bewirtschaftung vorgesehen ist, muss es solche Spezialfälle aber auch nicht beherrschen. Die meisten praxisrelevanten Bewirtschaftungsszenarien können mit dem C-Faktor-Tool berechnet werden.

Angesichts der geplanten WebGIS-Applikation ist die Wahl der technischen Ressourcen auch an deren Anforderungen an ein C-Faktor-Tool orientiert. Sowohl Python wie auch PostGIS sind weit verbreitete Standards in der GIS-Entwicklung generell und in der WebGIS-Entwicklung im Speziellen. Mit GeoDjango existiert für Python ein vielseitiges und ebenfalls verbreitetes Web-Framework zur Entwicklung von WebGIS-Anwendungen. Um Web-Tauglichkeit zu gewährleisten, orientiert sich die Programmierung des C-Faktor-Tools teilweise an den Anforderungen von GeoDjango. Allerdings ist das Tool bewusst so programmiert, dass die zukünftige WebGIS-Entwicklung nicht auf GeoDjango beschränkt wird. Da Python und PostGIS etablierte Standards sind, besteht für die Web-Entwicklung eine breite Auswahl an möglichen Frameworks. Damit das C-Faktor-Tool zukünftig möglichst einfach in eine beliebige WebGIS-Umgebung implementiert oder als eigenständiges Programm weiterentwickelt werden kann, liegt das Tool als einzelnes Python-Script vor. Dies hat diverse Vor- und Nachteile, wobei die Vorteile generell der Weiterentwicklung des Programms zu Gute kommen und die Nachteile die Anwendung des C-Faktor-Tools betreffen. Da das gesamte Programm in einem einzigen Script liegt, ist sein logischer Aufbau direkt ersichtlich und der Code gut dokumentiert. Dadurch wird es Drittpersonen leicht gemacht den Code zu verstehen und weiterzuverwenden. Zudem ist so größtmögliche Flexibilität bei der Weiterentwicklung gewährleistet, da der Code aus dem Script in jede gewünschte Umgebung überführt werden kann. Läge das Programm bereits in einer bestimmten Umgebung vor, wäre eine Portierung in eine andere Umgebung aufwändig und es wären Kenntnisse der verwendeten Umgebung nötig, um die Programmlogik zu verstehen. Als Python-Script verfügt das Tool aktuell hingegen über keine graphische Benutzeroberfläche. Eingaben zur C-Faktor-Berechnung werden direkt im Script getätigt und dieses zur Berechnung in einer Shell oder IDE ausgeführt. Die Datenbank muss dazu auf dem System installiert und richtig aufgesetzt sein. Da dies nicht benutzerfreundlich ist, wird im Anschluss an diese Arbeit ein selbständig lauffähiges Programm mit Benutzeroberfläche entwickelt. Für die Arbeit steht hingegen nicht die Verwendung des C-Faktor-Tools als eigenständiges Programm, sondern dessen Implementierung in eine geplante WebGIS-Umgebung im Vordergrund. Dieser kommt das vorliegende Format des Tools als Python-Script entgegen.

Das Script-Format führt aber auch zu einer Einschränkung in der Funktionalität des C-Faktor-Tools. Bei der Berechnung des C-Faktors gilt es gewisse Bedingungen bei den Benutzereingaben einzuhalten, um fehlerhafte Resultate zu verhindern oder bewirtschaftungsbedingte Vorgaben zu berücksichtigen. So kann es aufgrund der fixen Kalenderdaten der verwendeten Datengrundlage zu Überschneidungen von Kulturen kommen, welche bei der Berechnung Loopjahre hervorrufen und den C-Faktor verfälschen. Durch frei wählbare Kalenderdaten für Bodenbearbeitung, Saat und Ernte könnte diese Problem verhindert werden. Da die dazwischenliegenden Daten dadurch allerdings automatisch interpoliert werden müssten und dies technisch sehr kompliziert wäre (vgl. Kapitel 3.1.1), wurden die fixen Kalenderdaten der Datengrundlage verwendet. Ein Beispiel für eine solche Loopjahr-Kulturabfolge ist Wintergerste nach Rüben oder Körnermais. Zwar sollten derartige Kombinationen in der Praxis grundsätzlich nicht vorkommen, ihre Eingabe ist im Tool aber möglich. Bewirtschaftungsvorgaben, wie die Angabe von Pflug als Bodenbearbeitung einer Kultur, welche auf eine gepflügte Schwarzbrache folgt, sind aufgrund des Script-Formats ebenfalls nicht im C-Faktor-Tool enthalten. Derartige Bedingungen werden grundsätzlich nicht im Programmcode selbst verankert, sondern bei der graphischen Benutzeroberfläche berücksichtigt. Über diese können Auswahlmöglichkeiten für bestimmte Bedingungen eingeschränkt werden. Beispielsweise kann keine Wintergerste ausgewählt werden, wenn die Vorkultur Körnermais ist oder die Bodenbearbeitung der Folgekultur wird bei der Auswahl von Schwarzbrache automatisch auf Pflug gesetzt. Entsprechend können diese Bedingungen bei der Entwicklung der WebGIS-Applikation berücksichtigt werden. Eine Beschreibung aller Bedingungen zur Vorbeugung technischer Fehlberechnungen und zur Einhaltung von Bewirtschaftungsvorgaben wird in der Dokumentation zum C-Faktor-Tool vorhanden sein.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Python und PostGIS als technische Ressourcen zur Operationalisierung der angepassten Berechnungsweise geeignet sind. Da beide verbreitete Standards bei der WebGIS-Entwicklung sind und das C-Faktor-Tool in Form eines gut dokumentierten Python-Scripts vorliegt, ist für die Entwicklung der geplanten WebGIS-Applikation grösstmögliche Flexibilität und Zugänglichkeit gewährleistet. Die direkte Verwendung des C-Faktor-Tools ist bislang mangels einer graphischen Benutzeroberfläche hingegen nur bedingt möglich. Ein allein lauffähiges C-Faktor-Tool mit Benutzeroberfläche und eine detaillierte Dokumentation zur Verwendung sind aber im Anschluss an die Arbeit geplant. Durch die ausführliche Beschreibung der angepassten Berechnungsweise und ihrer technischen Operationalisierung in dieser Arbeit und dank dem detaillierten Output des C-Faktor-Tools mit sämtlichen Zwischenresultaten (vgl. Abb. 4.22) bietet das C-Faktor-Tool eine hohe Transparenz bei der C-Faktor-Berechnung.

5.3 Fazit zur Plausibilität von berechneten C-Faktoren

Mit den Resultaten aus Kapitel 4.3 lässt sich die dritte Forschungsfrage beantworten, die da lautet:

Wie sind C-Faktoren, welche mit dem neuen C-Faktor-Tool auf Basis der angepassten Berechnungsweise errechnet werden, hinsichtlich ihrer Plausibilität im Vergleich mit C-Faktor-Werten anderer C-Faktor-Tools zu beurteilen und wie lassen sich allfällige Unterschiede erklären?

Der systematische Vergleich erlaubt eine Beurteilung der Plausibilität vom C-Faktor aufgrund der drei Variablen Region, Bodenbearbeitung und Zwischennutzung. Aus dem Vergleich geht ebenfalls deren Sensitivität für den C-Faktor hervor.

Die Auswirkung der Region ist nicht direkt mit den beiden anderen Tools vergleichbar. Die Veränderungen beim C-Faktor zwischen Tal- und Hügelgebiet bewegen sich beim CTool meist im Bereich von wenigen Prozent, wobei kulturspezifische Tendenzen erkennbar sind. Die Region beeinflusst die Kalenderdaten der Kulturperioden und die R-Faktordaten. Zwischen Tal- und Hügelgebiet liegen dabei oft nur wenige Tage und geringe Unterschiede beim R-Anteil. Vor diesem Hintergrund sind die C-Faktoren aufgrund der kulturspezifischen Tendenzen und den meist geringen Abweichungen zwischen den C-Faktoren beider Regionen als plausibel zu beurteilen. Die Sensitivität der Region auf den C-Faktor ist gering.

Die C-Faktoren aller Tools verändern sich abhängig von der Bodenbearbeitung in ähnlichen Verhältnissen und weisen dabei sehr ähnliche Werte auf. Die gute Übereinstimmung zwischen CTool und ErosionCH spricht für plausible C-Faktoren. Die Sensitivität zwischen konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung ist hoch, während sie zwischen den konservierenden Verfahren eher gering ist.

Beim Vergleich der Zwischennutzungen macht sich die neue Datengrundlage vom CTool gegenüber ErosionCH bemerkbar. Die C-Faktoren von Stoppelbrache sind bei beiden etwa gleich, da die Abweichungen bei Kulturkalender und R-Faktordaten durch die teils unterschiedlichen RBA-Werte der beiden Tools ausgeglichen werden. Auch die Unterschiede von abfrierenden und winterharten Zwischenkulturen fallen gering aus, weil tiefe RBA-Werte die Auswirkungen abweichender RRA-Werte dämpfen. Der hohe RBA-Wert der Schwarzbrache macht die Abweichungen beim RRA, welche mit den unterschiedlichen Datengrundlagen zu erklären sind, erkennbar. Da sich die C-Faktoren abgesehen für Schwarzbrache nur geringfügig unterscheiden und die Abweichungen durch die neueren Datensätze des CTools begründet sind, sind die C-Faktoren plausibel. Die Sensitivität ist für Schwarzbrache hoch und für die restlichen Zwischennutzungen gering bis mittel.

Der praxisorientierte Vergleich von C-Faktoren anhand realer Fruchtfolgen beweist durch generell sehr gute Übereinstimmung der C-Faktoren aller Tools sowohl die Plausibilität als auch die Praxistauglichkeit des CTools (vgl. Abb. 4.32).

Die deutlich höheren C-Faktoren von Kartoffel-Fruchtfolgen zeigen, dass sich die Anpassung derer RBA-Werte in der verwendeten Datengrundlage von Prasuhn (2017, unveröffentlicht) gegenüber den anderen Tools merklich auswirkt. Der ebenfalls hohe C-Faktor für die erste Kartoffel-Fruchtfolge von EMiL lässt vermuten, dass ErosionCH den C-Faktor von Kartoffeln deutlich unterschätzt. Ein Vergleich dieser Fruchtfolge mit der Blattfrucht-Fruchtfolge bei konventioneller Bestellung stützt diese Annahme. Während das CTool und EMiL teils deutlich höhere C-Faktoren für die Kartoffel-Fruchtfolge aufweisen, erhöht sich der C-Faktor bei ErosionCH nur um knapp 7%. Ob das CTool die C-Faktoren für Kartoffel-Fruchtfolgen möglicherweise überschätzt, lässt sich mit den vorliegenden Daten nicht beurteilen und müsste in kommenden Arbeiten untersucht werden. Die C-Faktoren des CTools liegen bei der Kartoffel-Fruchtfolge mit 40% Kartoffelanteil aus dem systematischen Vergleich 39% höher und bei den beiden Kartoffel-Fruchtfolgen mit 20% Kartoffelanteil des praxisorientierten Vergleichs um jeweils etwa 34% über den Werten von ErosionCH. Die höheren C-Faktoren können dabei anhand der jährlichen C-Anteile eindeutig den Kartoffeln zugeschrieben werden. Damit ist die Berechnung der C-Faktoren auch für die stark abweichenden Kartoffel-Fruchtfolgen plausibel.

Entsprechend sind Kartoffeln beim CTool mit Abstand die sensitivsten Ackerfrüchte, gefolgt von Mais und Rüben. Raps und Getreide bewirken grundsätzlich geringere C-Faktoren, wobei Winterkulturen eine höhere Sensitivität zeigen als Sommerkulturen.

Aufgrund der über alle Vergleiche hinweg überwiegend guten bis sehr guten Übereinstimmung der C-Faktoren der drei Tools und weil allfällige Abweichungen nachvollziehbar sind, können die mit dem CTool berechneten C-Faktoren grundsätzlich als plausibel beurteilt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurde die Berechnung des USLE C-Faktors inhaltlich überarbeitet, um die aktuellsten für die Schweiz verfügbaren Datengrundlagen zu verwenden. Darüber hinaus wurde die Berechnungsweise so angepasst, dass sie für eine technische Operationalisierung in Form eines Software-Tools verwendet werden kann. Durch diese angepasste Berechnungsweise und der darauf aufbauenden Entwicklung eines C-Faktor-Tools konnten mit Blick auf die geplante WebGIS-Applikation die inhaltlichen und technischen Grundlagen zur individuellen Integration des C-Faktors in die Erosionsrisikokarte der Schweiz geschaffen werden. Dank der ausführlichen Beschreibung von Berechnungsweise und Programmierung in dieser Arbeit, weisen die beiden Produkte eine hohe Transparenz auf und können in Zukunft vielseitig weiterentwickelt werden. Damit liefert die Arbeit einen Beitrag zur Erosionsforschung der Schweiz und zum Erosionsmanagement in der Praxis.

Literaturverzeichnis

- Alder, S., Prasuhn, V., Liniger, H., Herweg, K., Hurni, H., Candinas, A., Gujer, H.U. (2015). A high-resolution map of direct and indirect connectivity of erosion risk areas to surface waters in Switzerland – A risk assessment tool for planning and policy-making. *Land use policy*, 48, 236-249.
- Arekhi, S., Shabani, A., Rostamizad, G. (2011). Application of the modified universal soil loss equation (MUSLE) in prediction of sediment yield – Case study: Kengir Watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 5, 1-9.
- Auerswald, K., Schmidt, F. (1986). Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern – Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen. GLA Fachberichte, Bayerisches Geologisches Landesamt, München, 74 S.
- Auerswald, K. (1987). Sensitivität erosionsbestimmender Faktoren. *Wasser und Boden*, 39, 34-38.
- Auerswald, K., Kainz, M. (1998). Erosionsgefährdung (C-Faktor) durch Sonderkulturen. *Bodenschutz*, 3 (3), 98-102.
- Auerswald, K. (2002). Schätzung des C-Faktors aus Fruchtartenstatistiken für Ackerflächen in Gebieten mit subkontinentalem bis subatlantischem Klima nördlich der Alpen. *Landnutzung und Landentwicklung*, 43, 1-5.
- Bircher, P., Schwilch, G., Liniger, H.P., Prasuhn, V. (2017). Aktualisierung und Optimierung der Erosionsrisikokarte (ERK2) – Die neue ERK2 (2018). Schlussbericht für den Zeitraum 1.Oktober 2014 bis 30. September 2017. Entwurf vom 31.10.2017. Unveröffentlicht.
- BLW (2014). Agrarumweltmonitoring – Gemeinsam für eine nachhaltige Landwirtschaft. Informationsflyer. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern, 4 S.
- Chow, T.L., Rees, H.W. (1994). Effects of potato hilling on water runoff and soil erosion under simulated rainfall. *Canadian Journal of Soil Science*, 74, 453-460.
- DIN 19708 (2005). Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. Normenausschuss Wasserwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin, 25 S.

- Durigon, V.L., Carvalho, D.F., Antunes, M.A.H., Oliveira, P.T.S., Fernandes, M.M. (2014). NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International journal of remote sensing*, 35 (2), 441-453.
- Frey, M., Konz, N., Stamm, C., Prasuhn, V. (2011). Machbarkeitsstudie Kartierung beitragender Flächen. Studie im Auftrag des BAFU. EAWAG und ART Zürich-Reckenholz, Zürich, 93 S.
- Friedli, S. (2006). Digitale Bodenerosionsgefährdungskarte der Schweiz im Hektarraster – Unter besonderer Berücksichtigung des Ackerlandes. Diplomarbeit. Geographisches Institut Universität Bern, Bern, 105 S.
- Gabriels, D., Ghekiere, G., Schiettecatte, W., Rottiers, I. (2003). Assessment of USLE cover-management C-factors for 40 crop rotation systems on arable farms in the Kemmelbeek watershed, Belgium. *Soil and Tillage Research*, 74 (1), 47-53.
- Gisler, S., Liniger, H.P., Prasuhn, V. (2010). Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Erosionsrisikokarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz im 2x2-Meter-Raster (ERK2). CDE Universität Bern und ART Zürich-Reckenholz, Zürich, 113 S.
- Gisler, S., Liniger, H.P., Prasuhn, V. (2011). Erosionsrisikokarte im 2x2-Meter-Raster (ERK2). *Agrarforschung Schweiz* 2 (4), 142-147.
- Guo, Q., Liu, B., Xie, Y., Liu, Y., Yin, S. (2015). Estimation of USLE crop and management factor values for crop rotation systems in China. *Journal of Integrative Agriculture* 2015, 14 (9), 1877–1888.
- Hänni, N. (2017). Studie zur Nutzung der Schweizerischen Erosionsrisikokarte in der Praxis. Bachelorarbeit. Geographisches Institut Universität Bern, Bern, 76 S.
- Herweg, K. (1999). Von der Bodenerosionsforschung zum angewandten Bodenschutz. In: Schneider-Sliwa, R., Gerold, G., Schaub, D. (Hrsg.). *Angewandte Landschaftsökologie*. Springer, Berlin, Heidelberg, 261-276.
- Hiller, D.A. (2007). Bodenerosion durch Wasser – Ursachen, Bedeutung und Umgang in der landwirtschaftlichen Praxis von NRW. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Münster, 37 S.
- Jain, M.K., Kothiyari, U.C. (2000). Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS. *Hydrological Sciences Journal*, 45 (5), 771-786.
- Koster-Marbot, B., Charollais, M., Arnold, B. (2017). Hilfsmittel Massnahmenplan Erosion. Agridea, Lindau, 9 S.

-
- Ledermann, T., Herweg, K., Liniger, H.P., Schneider, F., Hurni, H., Prasuhn, V. (2008). Erosion damage mapping. – Assessing current soil erosion damage in Switzerland. *Advances in GeoEcology*, 41, 263 – 283.
- LWK NRW (2018). Nährstoffbericht 2017 über Wirtschaftsdünger und andere organische Düngemittel. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Münster, 123 S.
- Mosimann T., Rüttimann M. (2006). Dokumentation – Berechnungsgrundlagen zum Fruchtfolgefaktor zentrales Mittelland 2005 im Modell Erosion CH (Version V2.02). Terragon, Bubendorf, 30 S.
- Neufang, K., Auerswald, K., Flacke, W. (1989). Räumlich differenzierende Berechnung grossmassstäblicher Erosionsprognosekarten – Anwendung der dABAG in der Flurbereinigung und Landwirtschaftsberatung. *Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung*, 30, 233-241.
- Ogermann, P., Hebel, B., Prasuhn, V., Weissshaidinger, R. (2006). Erfassung von Bodenerosion in der Schweiz – Vergleichende Anwendung verschiedener Methoden und Beurteilung ihrer Eignung für den Vollzug der Bodenschutzgesetzgebung. *Geographica Helvetica*, 61 (3), 209–217.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., Montanarella, L. (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land use policy*, 48, 38-50.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., Blair, R. (1995). Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science*, 267 (5201), 1117-1123.
- Prasuhn, V., Liniger, H.P., Hurni, H., Friedli, S. (2007). Bodenerosions-Gefährdungskarte der Schweiz. *Agrarforschung Schweiz*, 14 (3), 120-127.
- Prasuhn, V., Liniger, H.P., Gisler, S. (2011). Die hoch aufgelöste Erosionsrisikokarte ERK2 als Hilfsmittel für den Vollzug. *Bulletin BGS*, 32, 75-80.
- Prasuhn, V., Alder, S., Liniger, H.P., Herweg, K. (2014). Hoch aufgelöste Erosionsrisiko- und Gewässeranschlusskarten als Hilfsmittel für den Vollzug. 4. Umweltökologisches Symposium 2014, 75-80.
- Prasuhn, V., Lemann, T., Schwilch, G., Bachmann, F., Bandi, M., Jaunin, V., Kellermann, L., Burgos, S. (2017). Der Einfluss von Lochstern und Querdammhäufel auf Erosion und Staunässe im Kartoffelanbau. *Bulletin BGS*, 38, 27–36.
- Prasuhn, V. (2017). Methodenbeschrieb Agrarumweltindikatoren – AUI Erosionsrisiko. Entwurf vom Februar 2017. Unveröffentlicht.

- 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). USDA Agriculture Handbook No. 703, U.S. Department of Agriculture (Hrsg.), Washington D.C., 404 S.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P. (2010). Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 569 S.
- Schmidt, J., von Werner, M., Michael, A., Schmidt, W. (1996). Erosion 2D/3D – Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft und Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden, Freiberg.
- Schmidt, S., Alewell, C., Panagos, P., Meusburger, K. (2016). Regionalization of monthly rainfall erosivity patterns in Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 4359–4373.
- Schönbrodt, S., Saumer, P., Behrens, T., Seeber, C., Scholten, T. (2010). Assessing the USLE Crop and Management Factor C for Soil Erosion Modeling in a Large Mountainous Watershed in Central China. *Journal of Earth Science*, 21 (6), 835–845.
- Schwertmann U., Vogl W., Kainz M. (1987). Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer Verlag, Stuttgart, 64 S.
- Siebrecht, N., Kainz, M., Hülsbergen, K.J. (2009). Anpassung bestehender Methoden zur Abschätzung der Bodenerosion an die Bedingungen des Ökologischen Landbaus. Projektbericht. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme, München, 68 S.
- SR 814.12 (1998). Systematische Sammlung des Bundesrechts Nr. 814.12: Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo), Stand 12. April 2016, 10 S.
- SR 910.13 (2013). Systematische Sammlung des Bundesrechts Nr. 910.13: Verordnung vom 23. Oktober 2013 über Direktzahlungen an die Landwirtschaft (Direktzahlungsverordnung, DZV), Stand 1. Januar 2018, 146 S.
- Tanyaş, H., Kolat, Ç., Süzen, M.L. (2015). A new approach to estimate cover-management factor of RUSLE and validation of RUSLE model in the watershed of Kartalkaya Dam. *Journal of hydrology*, 528, 584-598.
- Westra, E. (2013). Python Geospatial Development. Learn to build sophisticated mapping applications from scratch using Python tools for geospatial development. Second Edition. Packt Publishing, Birmingham, 508 S.

- Williams, J.R., Berndt, H.D. (1977). Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 20 (6), 1100–1104.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning. USDA Agriculture Handbook No. 537, U.S. Department of Agriculture (Hrsg.), Washington D.C., 58 S.
- Yang, X. (2014). Deriving RUSLE cover factor from time-series fractional vegetation cover for hillslope erosion modelling in New South Wales. Soil Research, 52 (3), 253-261.
- Zhang, Y., Degroote, J., Wolter, C., Sugumaran, R. (2009). Integration of modified universal soil loss equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk. Land Degradation and Development, 20, 84-91.
- Zhang, W., Zhang, Z., Liu, F., Qiao, Z., Hu, S. (2011). Estimation of the USLE cover and management factor C using satellite remote sensing: A review. Geoinformatics, 2011 19th International Conference on Geoinformatics, IEEE, 1-5.

Internetquellen

- Esri. ArcGIS Website – What is Python? URL: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/analyze/python/what-is-python-.htm> [20.10.2018].
- GIS Lounge. The Use of Python in GIS. URL: https://www.gislounge.com/use-python-gis/#_ftn1 [20.10.2018].
- LaFranceAgricole. Pommes de terre – des outils pour lutter contre le ruissellement. URL: <http://www.lafranceagricole.fr/tracteur-et-materiel/pommes-de-terre-des-outils-pour-lutter-contre-le-ruissellement-1,0,22952290.html> [20.10.2018]
- NPTEL. Soil Erosion. National Programme on Technology Enhanced Learning. URL: <https://nptel.ac.in/courses/104103020/module7/lec3/2.html> [20.10.2018]
- QGIS. PyQGIS Cookbook – Introduction. Documentation. URL: https://docs.qgis.org/testing/en/docs/pyqgis_developer_cookbook/intro.html [20.10.2018].

Anhang

Hinweise zum Anhang:

- Alle Daten in A1, A2 und A4 stammen von Prasuhn (2017, unveröffentlicht), ausser A1.7 und A4.2 sind eigene Tabellen.
- Alle Daten in A3 stammen von Schmidt et al. (2016).
- Alle Daten in A5 wurden eigens erhoben.
- Die folgenden Tabellen liegen beim C-Faktor-Tool in der Datenbank:
 - A1.1, A1.2, A1.3, A1.4, A1.5, A1.6
 - A2.1 (ohne Zuordnung der Zwischenkulturen), A2.2, A2.3, A2.4
 - A3.1, A3.2 (beide wurden zur besseren Darstellung für den Anhang bearbeitet)
 - A4.2

A1: Tabellen zum Kulturkalender

Hinweise zu den Tabellen in A1:

- Die Kalenderdaten sind aus technischen Gründen als Tag im Jahr angegeben. Eine Hilfstabelle zur Umwandlung in Kalenderdaten findet sich in Anhang A1.7.

A1.1: Kulturkalender der Hauptkulturen im Talgebiet

		KK_HK_Tal							
KK_HK_Tal	Knr	KK_HK_Tal	Kname	BB	S	10	50	75	E
	7		Winterweizen Standard	288	289	342	88	102	211
	77		Winterweizen nach Zuckerrüben, Futterrüben, Körnermais	298	299	80	106	122	211
	8		Sommerweizen	75	76	108	125	142	214
	9		Buchweizen	125	126	141	167	182	259
	10		Wintergerste	270	271	292	327	69	188
	11		Sommergerste	79	80	110	129	141	198
	12		Winterhafer	268	269	286	346	78	214
	13		Sommerhafer	79	80	112	135	148	223
	14		Winterroggen (Populationsorten)	269	270	288	328	68	208
	15		Dinkel (Winterkorn)	291	292	342	88	102	209
	16		Winteremmer / -einkorn	288	289	342	88	102	211
	17		Wintertriticale	278	279	301	333	80	211
	18		Sommertriticale	79	80	110	127	139	223
	19		Winterraps für Speiseöl	241	242	258	277	309	199
	20		Sommerraps für Speiseöl	74	75	96	116	126	228
	21		Sonnenblumen für Speiseöl	101	102	153	167	180	269
	22		Speisekartoffeln	104	105	131	151	162	255
	23		Industriekartoffeln	100	101	127	151	162	270
	24		Futterkartoffeln	104	105	131	151	162	255
	25		Frühkartoffeln	97	98	122	141	155	225
	26		Zuckerrüben	81	82	131	164	180	294
	27		Futterrüben	91	92	134	165	180	288
	28		Körnermais	118	119	155	176	187	291
	29		Silomais	130	131	160	182	191	272
	30		CCM	121	122	153	177	191	286
	31		Lieschkolbenschrot	126	127	156	179	191	284
	32		Feuchtkörnermais	115	116	146	172	191	288
	33		Sommereisweiserbsen	74	75	103	118	148	202
	34		Sommerackerbohnen	73	74	109	129	141	232
	35		Soja	115	116	153	177	187	275
	36		Tabak Burley	130	131	146	162	182	233
	37		Tabak Virginia	130	131	146	162	182	233
	38		Süsslupinen	79	80	116	128	139	259
	39		Winterraps als NWR	241	242	258	277	309	199
	40		Sommerraps als NWR	74	75	96	116	126	228
	41		Sonnenblumen als NWR	101	102	153	167	180	269
	42		Sommerlein (Ölgewinn.)	80	81	122	153	183	244
	43		Sommerlein (Fasergew.)	80	81	122	153	183	244
	44		Ölhanf	115	116	131	153	167	249
	45		Faserhanf	115	116	131	153	167	249
	46		Kenaf	145	146	197	218	238	289
	149		Kunstwiese 1. Jahr	85	96	106	116	126	299
	150		Kunstwiese Folgejahre	85	96	106	116	126	299
	186		Sommereisweiserbsen / -einkorn	75	76	108	125	142	214
	187		Urhanf	129	130	156	179	191	249
	207		Winterreisweiserbsen	289	290	342	88	102	195
	208		Winterackerbohnen	289	290	342	88	102	243
	210		Saatkartoffeln	100	101	122	141	155	225
	251		Saatmais	121	122	153	177	191	289
	252		Reis	135	136	167	197	228	289
	256		Winterlein (Fasergew.)	258	259	274	294	70	229
	257		Winterlein (Ölgewinn.)	258	259	274	294	70	229
	268		Hirse	121	122	153	177	191	249
	272		Futterweizen	293	294	342	88	102	211
	273		Winterroggen	269	270	288	328	68	208

A1.2: Kulturkalender der Hauptkulturen im Hugelgebiet

KK_HK_Hug							
KK_HK_Hug_Knr	KK_HK_Hug_Kname	KK_HK_Hug_BB	KK_HK_Hug_S	KK_HK_Hug_10	KK_HK_Hug_50	KK_HK_Hug_75	KK_HK_Hug_E
7	Winterweizen Standard	286	287	341	90	104	213
77	Winterweizen nach Zuckerruben, Futterruben, Körnermais	300	301	80	106	122	213
8	Sommerweizen	83	84	112	127	146	227
9	Buchweizen	128	129	141	167	182	262
10	Wintergerste	267	268	291	327	72	194
11	Sommergerste	110	111	140	160	172	228
12	Winterhafer	266	267	285	346	78	217
13	Sommerhafer	73	74	108	135	148	212
14	Winterroggen (Populationssorten)	267	268	287	328	68	211
15	Dinkel (Winterkorn)	280	281	336	90	103	210
16	Winteremmer / -einkorn	286	287	341	90	104	213
17	Wintertriticale	278	279	301	333	83	217
18	Sommertriticale	83	84	112	127	146	227
19	Winterraps für Speiseöl	241	242	258	277	309	203
20	Sommerraps für Speiseöl	77	78	99	118	128	233
21	Sonnenblumen für Speiseöl	104	105	153	167	180	272
22	Speisekartoffeln	108	109	134	151	162	245
23	Industriekartoffeln	100	101	127	151	162	260
24	Futterkartoffeln	100	101	127	151	162	260
25	Frühkartoffeln	74	75	122	141	155	231
26	Zuckerrüben	78	79	131	164	180	289
27	Futterrüben	91	92	134	165	180	288
28	Körnermais	118	119	155	176	187	287
29	Silomais	132	133	162	182	191	272
30	CCM	121	122	153	177	191	286
31	Lieschkolbenschrot	126	127	156	179	191	284
32	Feuchtkörnermais	115	116	146	172	191	288
33	Sommereiwisserbsen	74	75	103	118	148	202
34	Sommerackerbohnen	73	74	109	129	141	232
35	Soja	115	116	153	177	187	275
36	Tabak Burley	130	131	146	162	182	233
37	Tabak Virginia	130	131	146	162	182	233
38	Süsslupinen	79	80	116	128	139	259
39	Winterraps als NWR	241	242	258	277	309	203
40	Sommerraps als NWR	77	78	99	118	128	233
41	Sonnenblumen als NWR	104	105	153	167	180	272
42	Sommerlein (ölgewinn.)	80	81	122	153	183	244
43	Sommerlein (Fasergew.)	80	81	122	153	183	244
44	olhanf	115	116	131	153	167	249
45	Faserhanf	115	116	131	153	167	249
46	Kenaf	145	146	197	218	238	289
149	Kunstwiese 1. Jahr	92	101	116	126	136	301
150	Kunstwiese Folgejahre	92	101	116	126	136	301
186	Sommeremmer / -einkorn	75	76	108	125	142	214
187	Urhanf	129	130	156	179	191	249
207	Winterewisserbsen	286	287	339	88	102	197
208	Winterackerbohnen	286	287	339	88	102	197
210	Saatkartoffeln	101	102	122	141	155	223
251	Saatmais	121	122	153	177	191	289
252	Reis	135	136	167	197	228	289
256	Winterlein (Fasergew.)	256	257	274	294	70	233
257	Winterlein (ölgewinn.)	256	257	274	294	70	233
268	Hirse	121	122	153	177	191	249
272	Futterweizen	291	292	336	88	102	214
273	Winterroggen	267	268	287	328	68	211

A1.3: Kulturkalender der Zwischenkulturen im Talgebiet

		KK_ZK_Tal					
KK_ZK_Tal_Knr	KK_ZK_Tal_Kname	KK_ZK_Tal_BB	KK_ZK_Tal_S	KK_ZK_Tal_10	KK_ZK_Tal_50	KK_ZK_Tal_75	
7	Winterweizen Standard	216	217	227	237	247	
77	Winterweizen nach Zuckerrüben, Futterrüben, Körnermais	216	217	227	237	247	
8	Sommerweizen	219	220	230	240	250	
9	Buchweizen	264	265	280	300	315	
10	Wintergerste	193	194	204	214	224	
11	Sommergerste	203	204	214	224	234	
12	Winterhafer	219	220	230	240	250	
13	Sommerhafer	228	229	239	254	264	
14	Winterroggen (Populationssorten)	214	215	225	235	245	
15	Dinkel (Winterkorn)	214	215	225	235	245	
16	Winteremmer / -einkorn	216	217	227	237	247	
17	Wintertriticale	216	217	227	237	247	
18	Sommertriticale	228	229	239	254	264	
19	Winterraps für Speiseöl	204	205	215	225	235	
20	Sommerraps für Speiseöl	233	234	244	259	269	
21	Sonnenblumen für Speiseöl	274	275	295	326	75	
22	Speisekartoffeln	260	261	276	296	311	
23	Industriekartoffeln	275	276	296	327	75	
24	Futterkartoffeln	260	261	276	296	311	
25	Frühkartoffeln	230	231	241	256	266	
26	Zuckerrüben	299	300	332	75	85	
27	Futterrüben	293	294	325	75	85	
28	Körnermais	296	297	329	75	85	
29	Silomais	277	278	298	329	75	
30	CCM	291	292	324	75	85	
31	Lieschkolbenschrot	289	290	322	75	85	
32	Feuchtkörnermais	293	294	325	75	85	
33	Sommereisweiserbsen	207	208	218	228	238	
34	Sommerackerbohnen	237	238	248	263	270	
35	Soja	280	281	301	332	75	
36	Tabak Burley	238	239	249	264	274	
37	Tabak Virginia	238	239	249	264	274	
38	Süßlupinen	264	265	280	300	315	
39	Winterraps als NWR	204	205	215	225	235	
40	Sommerraps als NWR	233	234	244	259	269	
41	Sonnenblumen als NWR	274	275	295	326	75	
42	Sommerlein (Ölgewinn.)	249	250	265	279	289	
43	Sommerlein (Fasergew.)	249	250	265	279	289	
44	Ölhanf	254	255	270	284	299	
45	Faserhanf	254	255	270	284	299	
46	Kenaf	294	295	326	75	85	
186	Sommeremmer / -einkorn	219	220	230	240	250	
187	Urhanf	254	255	270	284	299	
207	Wintereisweiserbsen	200	201	211	221	231	
208	Winterackerbohnen	248	249	264	278	288	
210	Saatkartoffeln	230	231	241	256	266	
251	Saatmais	294	295	327	75	85	
252	Reis	294	295	327	75	85	
256	Winterlein (Fasergew.)	234	235	245	260	270	
257	Winterlein (Ölgewinn.)	234	235	245	260	270	
268	Hirse	254	255	270	284	299	
272	Futterweizen	216	217	227	237	247	
273	Winterroggen	214	215	225	235	245	

A1.4: Kulturkalender der Zwischenkulturen im Hügelgebiet

		KK_ZK_Hug				
KK_ZK_Hug_Knr	KK_ZK_Hug_Kname	KK_ZK_Hug_BB	KK_ZK_Hug_S	KK_ZK_Hug_10	KK_ZK_Hug_50	KK_ZK_Hug_75
7	Winterweizen Standard	218	219	229	239	249
77	Winterweizen nach Zuckerrüben, Futterrüben, Körnermais	218	219	229	239	249
8	Sommerweizen	232	233	243	258	268
9	Buchweizen	267	268	283	314	75
10	Wintergerste	199	200	210	220	251
11	Sommergerste	233	234	244	259	269
12	Winterhafer	222	223	233	248	258
13	Sommerhafer	217	218	228	238	248
14	Winterroggen (Populationsorten)	216	217	227	237	268
15	Dinkel (Winterkorn)	215	216	226	236	267
16	Winteremmer / -einkorn	218	219	229	239	249
17	Wintertriticale	222	223	233	248	258
18	Sommertriticale	232	233	243	258	268
19	Winterraps für Speiseöl	208	209	219	229	260
20	Sommerraps für Speiseöl	238	239	249	264	274
21	Sonnenblumen für Speiseöl	277	278	298	329	75
22	Speisekartoffeln	250	251	266	280	295
23	Industriekartoffeln	265	266	281	312	75
24	Futterkartoffeln	265	266	281	312	75
25	Frühkartoffeln	236	237	247	262	272
26	Zuckerrüben	294	295	327	75	85
27	Futterrüben	293	294	326	75	85
28	Körnermais	292	293	325	75	85
29	Silomais	277	278	298	329	85
30	CCM	291	292	324	75	85
31	Lieschkolbenschrot	289	290	322	75	85
32	Feuchtkörnermais	293	294	326	75	85
33	Sommereiwisserbsen	207	208	218	228	259
34	Sommerackerbohnen	237	238	248	263	273
35	Soja	280	281	301	332	85
36	Tabak Burley	238	239	249	264	274
37	Tabak Virginia	238	239	249	264	274
38	Süsslupinen	264	265	280	300	75
39	Winterraps als NWR	208	209	219	229	260
40	Sommerraps als NWR	238	239	254	268	278
41	Sonnenblumen als NWR	277	278	298	329	85
42	Sommerlein (Ölgewinn.)	249	250	265	279	289
43	Sommerlein (Fasergew.)	249	250	265	279	289
44	Ölhanf	254	255	270	284	299
45	Faserhanf	254	255	270	284	299
46	Kenaf	294	295	327	75	85
186	Sommeremmer / -einkorn	219	220	230	240	250
187	Urhanf	254	255	270	290	305
207	Wintereiwisserbsen	202	203	213	223	254
208	Winterackerbohnen	202	203	213	223	254
210	Saatkartoffeln	228	229	239	254	264
251	Saatmais	294	295	327	75	85
252	Reis	294	295	327	75	85
256	Winterlein (Fasergew.)	238	239	254	268	278
257	Winterlein (Olgewinn.)	238	239	254	268	278
268	Hirse	254	255	270	290	305
272	Futterweizen	219	220	230	245	255
273	Winterroggen	216	217	227	237	247

A1.5: Kulturkalender der Herbstzwischenkulturen im Talgebiet

		KK_ZK_Tal_HF												
KK_ZK_Tal_HF_Knr	KK_ZK_Tal_HF_Kname	KK_ZK_Tal_HF_BB	KK_ZK_Tal_HF_S	KK_ZK_Tal_HF_10	KK_ZK_Tal_HF_50	KK_ZK_Tal_HF_75	KK_ZK_Tal_HF_E	KK_ZK_Tal_HF_Knr	KK_ZK_Tal_HF_BB	KK_ZK_Tal_HF_S	KK_ZK_Tal_HF_10	KK_ZK_Tal_HF_50	KK_ZK_Tal_HF_75	KK_ZK_Tal_HF_E
7	Winterweizen Standard	216	217	227	237	247	320	7	216	217	227	237	247	320
77	Winterweizen nach Zuckerrüben, Futterrüben, Körnermais	216	217	227	237	247	320	77	216	217	227	237	247	320
8	Sommerweizen	219	220	230	240	250	320	8	219	220	230	240	250	320
9	Buchweizen	264	265	280	300	315	320	9	264	265	280	300	315	320
10	Wintergerste	193	194	204	214	224	320	10	193	194	204	214	224	320
11	Sommergerste	203	204	214	224	234	320	11	203	204	214	224	234	320
12	Winterhafer	219	220	230	240	250	320	12	219	220	230	240	250	320
13	Sommerhafer	228	229	239	254	264	320	13	228	229	239	254	264	320
14	Winterroggen (Populationsorten)	214	215	225	235	245	320	14	214	215	225	235	245	320
15	Dinkel (Winterkorn)	214	215	225	235	245	320	15	214	215	225	235	245	320
16	Winteremmer / -einkorn	216	217	227	237	247	320	16	216	217	227	237	247	320
17	Wintertriticale	216	217	227	237	247	320	17	216	217	227	237	247	320
18	Sommertriticale	228	229	239	254	264	320	18	228	229	239	254	264	320
19	Winterraps für Speiseöl	204	205	215	225	235	320	19	204	205	215	225	235	320
20	Sommerraps für Speiseöl	233	234	244	259	269	320	20	233	234	244	259	269	320
21	Sonnenblumen für Speiseöl	274	275	295	318	319	320	21	274	275	295	318	319	320
22	Speisekartoffeln	260	261	276	296	311	320	22	260	261	276	296	311	320
23	Industriekartoffeln	275	276	296	318	319	320	23	275	276	296	318	319	320
24	Futterkartoffeln	260	261	276	296	311	320	24	260	261	276	296	311	320
25	Frühkartoffeln	230	231	241	256	266	320	25	230	231	241	256	266	320
26	Zuckerrüben	299	300	317	318	319	320	26	299	300	317	318	319	320
27	Futterrüben	293	294	317	318	319	320	27	293	294	317	318	319	320
28	Körnermais	296	297	317	318	319	320	28	296	297	317	318	319	320
29	Silomais	277	278	298	318	319	320	29	277	278	298	318	319	320
30	CCM	291	292	317	318	319	320	30	291	292	317	318	319	320
31	Lieschkolbenschnot	289	290	317	318	319	320	31	289	290	317	318	319	320
32	Feuchtkörnermais	293	294	317	318	319	320	32	293	294	317	318	319	320
33	Sommerweisserbsen	207	208	218	228	238	320	33	207	208	218	228	238	320
34	Sommerweiserbohnen	237	238	248	263	270	320	34	237	238	248	263	270	320
35	Soja	280	281	301	318	319	320	35	280	281	301	318	319	320
36	Tabak Burley	238	239	249	264	274	320	36	238	239	249	264	274	320
37	Tabak Virginia	238	239	249	264	274	320	37	238	239	249	264	274	320
38	Susslupinen	264	265	280	300	315	320	38	264	265	280	300	315	320
39	Winterraps als NWR	204	205	215	225	235	320	39	204	205	215	225	235	320
40	Sommerraps als NWR	233	234	244	259	269	320	40	233	234	244	259	269	320
41	Sonnenblumen als NWR	274	275	295	318	319	320	41	274	275	295	318	319	320
42	Sommerlein (Ölgewinn.)	249	250	265	279	289	320	42	249	250	265	279	289	320
43	Sommerlein (Fasergew.)	249	250	265	279	289	320	43	249	250	265	279	289	320
44	Ölhant	254	255	270	284	299	320	44	254	255	270	284	299	320
45	Faserhant	254	255	270	284	299	320	45	254	255	270	284	299	320
46	Kenaf	294	295	317	318	319	320	46	294	295	317	318	319	320
186	Sommeremmer / -einkorn	219	220	230	240	250	320	186	219	220	230	240	250	320
187	Urhanf	254	255	270	284	299	320	187	254	255	270	284	299	320
208	Winterweisserbsen	200	201	211	221	231	320	208	200	201	211	221	231	320
209	Winterweiserbohnen	248	249	264	278	288	320	209	248	249	264	278	288	320
210	Saatkartoffeln	230	231	241	256	266	320	210	230	231	241	256	266	320
251	Saatmais	294	295	317	318	319	320	251	294	295	317	318	319	320
252	Reis	294	295	317	318	319	320	252	294	295	317	318	319	320
256	Winterlein (Fasergew.)	234	235	245	260	270	320	256	234	235	245	260	270	320
257	Winterlein (Ölgewinn.)	234	235	245	260	270	320	257	234	235	245	260	270	320
268	Hirse	254	255	270	284	299	320	268	254	255	270	284	299	320
272	Futterweizen	216	217	227	237	247	320	272	216	217	227	237	247	320
273	Winterroggen	214	215	225	235	245	320	273	214	215	225	235	245	320

A1.6: Kulturkalender der Herbstzwischenkulturen im Hugelgebiet

KK_ZK_Hug_HF_Knr	KK_ZK_Hug_HF_Kname	KK_ZK_Hug_HF_BB	KK_ZK_Hug_HF_S	KK_ZK_Hug_HF_10	KK_ZK_Hug_HF_50	KK_ZK_Hug_HF_75	KK_ZK_Hug_HF_E
7	Winterweizen Standard	218	219	229	239	249	320
77	Winterweizen nach Zuckerruben, Futterruben, Kornmais	218	219	229	239	249	320
8	Sommerweizen	232	233	243	258	268	320
9	Ruchweizen	267	268	283	314	319	320
10	Wintergerste	199	200	210	220	251	320
11	Sommergerste	233	234	244	259	269	320
12	Winterhafer	222	223	233	248	258	320
13	Sommerhafer	217	218	228	238	248	320
14	Winterroggen (Populationssorten)	216	217	227	237	268	320
15	Dinkel (Winterkorn)	215	216	226	236	267	320
16	Winteremmer / -einkorn	218	219	229	239	249	320
17	Wintertriticale	222	223	233	248	258	320
18	Sommertriticale	232	233	243	258	268	320
19	Wintertraps für Speiseöl	208	209	219	229	260	320
20	Sommertraps für Speiseöl	238	239	249	264	274	320
21	Sonnenblumen für Speiseöl	277	278	298	318	319	320
22	Speisekartoffeln	250	251	266	280	295	320
23	Industriekartoffeln	265	266	281	312	319	320
24	Futterkartoffeln	265	266	281	312	319	320
25	Frühkartoffeln	236	237	247	262	272	320
26	Zuckerrüben	294	295	317	318	319	320
27	Futterrüben	293	294	317	318	319	320
28	Kornmais	292	293	317	318	319	320
29	Silomais	277	278	298	318	319	320
30	CCM	291	292	292	318	319	320
31	Lieschkolbenschnot	289	290	317	318	319	320
32	Feuchtkornmais	293	294	317	318	319	320
33	Sommerleiwasserbsen	207	208	218	228	259	320
34	Sommerackerbohnen	237	238	248	263	273	320
35	Soja	280	281	301	318	319	320
36	Tabak Burley	238	239	249	264	274	320
37	Tabak Virginia	238	239	249	264	274	320
38	Susslupinen	264	265	280	300	319	320
39	Wintertraps als NWR	208	209	219	229	260	320
40	Sommertraps als NWR	238	239	254	268	278	320
41	Sonnenblumen als NWR	277	278	298	318	319	320
42	Sommerlein (Olgelewin.)	249	250	265	279	289	320
43	Sommerlein (Fasergew.)	249	250	265	279	289	320
44	ohant	254	255	270	284	299	320
45	Faserhant	254	255	270	284	299	320
46	Kenaf	294	295	317	318	319	320
186	Sommeremmer / -einkorn	219	220	230	240	250	320
187	Urhanf	254	255	270	284	299	320
207	Winterleiwasserbsen	202	203	213	223	254	320
208	Winterackerbohnen	202	203	213	223	254	320
210	Saatkartoffeln	228	229	239	254	264	320
251	Saatmais	294	295	317	318	319	320
252	Reis	294	295	317	318	319	320
256	Winterlein (Fasergew.)	238	239	254	268	278	320
257	Winterlein (Olgelewin.)	238	239	254	268	278	320
268	Hirse	254	255	270	284	299	320
272	Futterweizen	219	220	230	240	250	320
273	Winterroggen	216	217	227	237	247	320

A1.7: Hilfstabelle – Datum zu Tag im Jahr

Quelle: eigene Tabelle

Hilfstabelle - Tag im Jahr

Januar		Februar		März		April		Mai		Juni	
1	1	1	32	1	61	1	92	1	122	1	153
2	2	2	33	2	62	2	93	2	123	2	154
3	3	3	34	3	63	3	94	3	124	3	155
4	4	4	35	4	64	4	95	4	125	4	156
5	5	5	36	5	65	5	96	5	126	5	157
6	6	6	37	6	66	6	97	6	127	6	158
7	7	7	38	7	67	7	98	7	128	7	159
8	8	8	39	8	68	8	99	8	129	8	160
9	9	9	40	9	69	9	100	9	130	9	161
10	10	10	41	10	70	10	101	10	131	10	162
11	11	11	42	11	71	11	102	11	132	11	163
12	12	12	43	12	72	12	103	12	133	12	164
13	13	13	44	13	73	13	104	13	134	13	165
14	14	14	45	14	74	14	105	14	135	14	166
15	15	15	46	15	75	15	106	15	136	15	167
16	16	16	47	16	76	16	107	16	137	16	168
17	17	17	48	17	77	17	108	17	138	17	169
18	18	18	49	18	78	18	109	18	139	18	170
19	19	19	50	19	79	19	110	19	140	19	171
20	20	20	51	20	80	20	111	20	141	20	172
21	21	21	52	21	81	21	112	21	142	21	173
22	22	22	53	22	82	22	113	22	143	22	174
23	23	23	54	23	83	23	114	23	144	23	175
24	24	24	55	24	84	24	115	24	145	24	176
25	25	25	56	25	85	25	116	25	146	25	177
26	26	26	57	26	86	26	117	26	147	26	178
27	27	27	58	27	87	27	118	27	148	27	179
28	28	28	59	28	88	28	119	28	149	28	180
29	29	29	60	29	89	29	120	29	150	29	181
30	30			30	90	30	121	30	151	30	182
31	31			31	91			31	152		

Hilfstabelle - Tag im Jahr

Juli		August		September		Oktober		November		Dezember	
1	183	1	214	1	245	1	275	1	306	1	336
2	184	2	215	2	246	2	276	2	307	2	337
3	185	3	216	3	247	3	277	3	308	3	338
4	186	4	217	4	248	4	278	4	309	4	339
5	187	5	218	5	249	5	279	5	310	5	340
6	188	6	219	6	250	6	280	6	311	6	341
7	189	7	220	7	251	7	281	7	312	7	342
8	190	8	221	8	252	8	282	8	313	8	343
9	191	9	222	9	253	9	283	9	314	9	344
10	192	10	223	10	254	10	284	10	315	10	345
11	193	11	224	11	255	11	285	11	316	11	346
12	194	12	225	12	256	12	286	12	317	12	347
13	195	13	226	13	257	13	287	13	318	13	348
14	196	14	227	14	258	14	288	14	319	14	349
15	197	15	228	15	259	15	289	15	320	15	350
16	198	16	229	16	260	16	290	16	321	16	351
17	199	17	230	17	261	17	291	17	322	17	352
18	200	18	231	18	262	18	292	18	323	18	353
19	201	19	232	19	263	19	293	19	324	19	354
20	202	20	233	20	264	20	294	20	325	20	355
21	203	21	234	21	265	21	295	21	326	21	356
22	204	22	235	22	266	22	296	22	327	22	357
23	205	23	236	23	267	23	297	23	328	23	358
24	206	24	237	24	268	24	298	24	329	24	359
25	207	25	238	25	269	25	299	25	330	25	360
26	208	26	239	26	270	26	300	26	331	26	361
27	209	27	240	27	271	27	301	27	332	27	362
28	210	28	241	28	272	28	302	28	333	28	363
29	211	29	242	29	273	29	303	29	334	29	364
30	212	30	243	30	274	30	304	30	335	30	365
31	213	31	244			31	305			31	366

A2: Tabellen zum Relativen Bodenabtrag (RBA)

A2.1: RBA der Kulturen bei Pflugverfahren und Zuordnung der Zwischenkulturen

Hinweis zu A2.1:

- Bei A2.1 sind zwei Tabellen abgebildet, eine zum RBA bei Pflugverfahren und eine zur Zuordnung der Zwischenkulturen.

RBA_Pflug_Knr	RBA_Pflug_Kname	RBA_Pflug_P1	RBA_Pflug_P2	RBA_Pflug_P3	RBA_Pflug_P4	RBA_Pflug_P5	RBA_Pflug_P6
7	Winterweizen Standard	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
77	Winterweizen nach Zuckerrüben, Futterrüben, Körnermais	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
8	Sommerweizen	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
9	Buchweizen	0.32	0.44	0.35	0.03	0.02	0.03
10	Wintergerste	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
11	Sommergerste	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
12	Winterhafer	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
13	Sommerhafer	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
14	Winterroggen (Populationsorten)	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
15	Dinkel (Winterkorn)	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
16	Winteremmer / einkorn	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
17	Wintertriticale	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
18	Sommertriticale	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
19	Wintertraps für Speiseöl	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
20	Sommertraps für Speiseöl	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
21	Sonnenblumen für Speiseöl	0.32	0.87	0.35	0.08	0.09	0.03
22	Speisekartoffeln	0.32	2	0.5	0.05	0.1	1.5
23	Industriekartoffeln	0.32	2	0.5	0.05	0.1	1.5
24	Futterkartoffeln	0.32	2	0.5	0.05	0.1	1.5
25	Frühkartoffeln	0.32	2	0.5	0.05	0.1	1.5
26	Zuckerrüben	0.32	0.85	0.45	0.05	0.03	0.44
27	Futterrüben	0.32	0.85	0.45	0.05	0.03	0.44
28	Körnermais	0.32	0.94	0.45	0.12	0.085	0.01
29	Silomais	0.32	0.94	0.45	0.12	0.085	0.44
30	CCM	0.32	0.94	0.45	0.12	0.085	0.01
31	Lieschkolbenschrot	0.32	0.94	0.45	0.12	0.085	0.01
32	Feuchtkörnermais	0.32	0.94	0.45	0.12	0.085	0.01
33	Sommerweisserbsen	0.32	0.5	0.4	0.05	0.01	0.03
34	Sommerackerbohnen	0.32	0.85	0.45	0.05	0.02	0.03
35	Soja	0.32	0.85	0.45	0.05	0.07	0.3
36	Tabak Burley	0.32	0.94	0.45	0.12	0.1	0.44
37	Tabak Virginia	0.32	0.94	0.45	0.12	0.1	0.44
38	Susulupinen	0.32	0.85	0.45	0.06	0.07	0.06
39	Wintertraps als NWR	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
40	Sommertraps als NWR	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
41	Sonnenblumen als NWR	0.32	0.87	0.35	0.08	0.09	0.03
42	Sommerlein (Ölgewinn)	0.32	0.5	0.4	0.1	0.08	0.06
43	Sommerlein (Fasergewinn)	0.32	0.5	0.4	0.1	0.08	0.06
44	Ohnhafer	0.32	0.5	0.4	0.04	0.01	0.35
45	Fasernhanf	0.32	0.5	0.4	0.1	0.08	0.25
46	Kenaf	0.32	0.5	0.4	0.1	0.08	0.25
149	Kunstwiese 1. Jahr	0.32	0.7	0.4	0.05	0.02	0.004
150	Kunstwiese Folgejahre	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
186	Sommeremmer/einkorn	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
187	Uhrhanf	0.32	0.5	0.4	0.04	0.01	0.35
207	Winterweisserbsen	0.32	0.5	0.4	0.05	0.01	0.03
208	Winterackerbohnen	0.32	0.85	0.45	0.05	0.02	0.03
210	Saatkartoffeln	0.32	2	0.5	0.05	0.1	1.5
251	Saaimais	0.32	0.94	0.45	0.12	0.085	0.44
252	Reis	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
256	Winterlein (Fasergewinn)	0.32	0.5	0.4	0.1	0.08	0.25
257	Winterlein (Ölgewinn)	0.32	0.5	0.4	0.1	0.08	0.25
268	Hirse	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
272	Futterweizen	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
273	Winterroggen (Hybridsorten)	0.32	0.46	0.38	0.03	0.01	0.03
500	überwinterndes Zwischenfutter	0.32	0.7	0.4	0.05	0.02	0.02
501	abfrierendes Zwischenfutter	0.32	0.7	0.4	0.04	0.04	0.02
600	Herbstzwischenfutter	0.32	0.7	0.4	0.05	0.02	0.02

Zwischenkultur	Zuordnung abfr. / überw.
Grünmais	Zwischenfutter, abfrierend
Gründüngung (Nichtleguminosen)	Zwischenfutter, abfrierend
Zwischenfutter Klee gras, nicht überwinternd	Zwischenfutter, abfrierend
Zwischenfutter anderes, nicht überwinternd	Zwischenfutter, abfrierend
Gründüngung (Leguminosen)	Zwischenfutter, überwinternd
Zwischenfutter Klee gras, überwinternd	Zwischenfutter, überwinternd
Zwischenfutter anderes, überwinternd	Zwischenfutter, überwinternd
Frühjahrschnitt vor Wiesenumbau	Zwischenfutter, überwinternd

A2.2: RBA der Kulturen bei Mulchsaat mit 10-30% Bodenbedeckung

	RBA_Mulch_u30_P1	RBA_Mulch_u30_P2	RBA_Mulch_u30_P3	RBA_Mulch_u30_P4	RBA_Mulch_u30_P5	RBA_Mulch_u30_P6
7) Winterweizen Standard	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
77) Winterweizen nach Zuckerrüben, Futterrüben, Körnermais	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
8) Sommerweizen	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
9) Buchweizen	0.16	0.23	0.13	0.03	0.01	0.028
10) Wintergerste	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
11) Sommergerste	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
12) Winterhafer	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
13) Sommerhafer	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
14) Winterroggen (Populationsorten)	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
15) Pinke (Winterkorn)	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
16) Winterweizen / einkorn	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
17) Wintertriticale	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
18) Sommertriticale	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
19) Wintertraps für Speiseöl	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
20) Sommertraps für Speiseöl	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
21) Sonnenblumen für Speiseöl	0.19	0.25	0.13	0.06	0.06	0.02
22) Speisekartoffeln	0.16	0.6	0.3	0.05	0.075	0.6
23) Industriekartoffeln	0.16	0.6	0.3	0.05	0.075	0.6
24) Futterkartoffeln	0.16	0.6	0.3	0.05	0.075	0.6
25) Fuhrkartoffeln	0.16	0.6	0.3	0.05	0.075	0.6
26) Zuckerrüben	0.17	0.24	0.13	0.05	0.03	0.2
27) Futterrüben	0.17	0.24	0.13	0.05	0.03	0.2
28) Körnermais	0.19	0.27	0.13	0.04	0.03	0.01
29) Silomais	0.19	0.27	0.13	0.04	0.03	0.14
30) CCM	0.19	0.27	0.13	0.04	0.03	0.01
31) Lieschkolbenschrot	0.19	0.27	0.13	0.04	0.03	0.01
32) Feuchtkörnermais	0.19	0.27	0.13	0.04	0.03	0.01
33) Sommerweisseerbsen	0.16	0.23	0.13	0.04	0.01	0.02
34) Sommerackerbohnen	0.16	0.25	0.13	0.05	0.02	0.02
35) Soja	0.16	0.25	0.13	0.05	0.07	0.2
36) Triticale	0.16	0.27	0.13	0.04	0.03	0.15
37) Triticale Virginia	0.16	0.27	0.13	0.04	0.03	0.15
38) Süsslupinen	0.16	0.23	0.13	0.05	0.06	0.05
39) Wintertraps als NWR	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
40) Sommertraps als NWR	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
41) Sonnenblumen als NWR	0.16	0.25	0.13	0.06	0.06	0.02
42) Sommerlein (Olgewin)	0.16	0.23	0.2	0.08	0.06	0.05
43) Sommerlein (Fasergew.)	0.16	0.23	0.2	0.08	0.06	0.2
44) Ölhanf	0.16	0.23	0.13	0.03	0.01	0.25
45) Faserhanf	0.16	0.23	0.13	0.03	0.01	0.25
46) Kenaf	0.16	0.23	0.13	0.03	0.01	0.25
149) Kunstweise 1. Jahr	0.16	0.16	0.09	0.03	0.02	0.004
150) Kunstweise Folgejahre	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
186) Sommerernte/einkorn	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
187) Ölhanf	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
207) Winterweisseerbsen	0.16	0.23	0.13	0.04	0.01	0.02
208) Winterackerbohnen	0.16	0.25	0.13	0.05	0.02	0.02
210) Saatkartoffeln	0.16	0.6	0.3	0.05	0.075	0.6
251) Saatmais	0.19	0.27	0.13	0.04	0.03	0.14
252) Reis	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
256) Winterlein (Fasergewinn)	0.16	0.23	0.2	0.08	0.06	0.2
257) Winterlein (Olgewin)	0.16	0.23	0.2	0.08	0.06	0.05
268) Hirse	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
272) Futterweizen	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
273) Winterroggen (Hybridsorten)	0.16	0.23	0.13	0.029	0.01	0.028
500) überwinterndes Zwischenfutter	0.16	0.16	0.09	0.03	0.01	0.01
501) abtrocknendes Zwischenfutter	0.16	0.16	0.09	0.02	0.02	0.01
600) Herbstzwischenfutter	0.16	0.16	0.09	0.02	0.02	0.01

A2.3: RBA der Kulturen bei Mulchsaat mit über 30% Bodenbedeckung

	RBA_Mulch_o30_P1	RBA_Mulch_o30_P2	RBA_Mulch_o30_P3	RBA_Mulch_o30_P4	RBA_Mulch_o30_P5	RBA_Mulch_o30_P6
RBA_Mulch_o30_K1r	RBA_Mulch_o30_Kname	RBA_Mulch_o30_P1	RBA_Mulch_o30_P2	RBA_Mulch_o30_P3	RBA_Mulch_o30_P4	RBA_Mulch_o30_P5
7	Winterweizen Standard	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
77	Winterweizen nach Zuckerrüben, Futterrüben, Körnermais	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
8	Sommerweizen	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
9	Buchweizen	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
10	Wintergerste	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
11	Sommergerste	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
12	Winterhafer	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
13	Sommerhafer	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
14	Winterroggen (Populationsorten)	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
15	Pinke (Winterkorn)	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
16	Winteremmer / einkorn	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
17	Wintertriticale	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
18	Sommertriticale	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
19	Wintertraps für Speiseöl	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
20	Sommertraps für Speiseöl	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
21	Sonnenblumen für Speiseöl	0.11	0.12	0.07	0.04	0.04
22	Speisekartoffeln	0.11	0.4	0.2	0.04	0.06
23	Industriekartoffeln	0.11	0.4	0.2	0.04	0.06
24	Futterkartoffeln	0.11	0.4	0.2	0.04	0.06
25	Füchtkartoffeln	0.11	0.4	0.2	0.04	0.06
26	Zuckerrüben	0.11	0.11	0.07	0.04	0.03
27	Futterrüben	0.11	0.11	0.07	0.04	0.03
28	Körnermais	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
29	Silomais	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
30	CCM	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
31	Leischkolbenschrot	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
32	Feuchtkörnermais	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
33	Sommerweisseerbsen	0.11	0.11	0.07	0.04	0.01
34	Sommerackerbohnen	0.11	0.11	0.07	0.04	0.02
35	Soja	0.11	0.11	0.07	0.04	0.01
36	Barak Barley	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
37	Barak Virginia	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
38	Süsslupinen	0.08	0.11	0.08	0.04	0.05
39	Wintertraps als NWR	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
40	Sommertraps als NWR	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
41	Sonnenblumen als NWR	0.11	0.12	0.07	0.04	0.04
42	Sommerlein (Olgewin)	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
43	Sommerlein (Fasergew.)	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
44	Olhanf	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
45	Faserhanf	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
46	Kenaf	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
149	Kunstweise 1. Jahr	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
150	Kunstweise Folgejahre	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
186	Sommeremmer/einkorn	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
187	Urhant	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
207	Winterweisseerbsen	0.11	0.11	0.07	0.04	0.01
208	Winterackerbohnen	0.11	0.11	0.07	0.04	0.02
210	Saatkartoffeln	0.11	0.4	0.2	0.04	0.06
251	Saatmais	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
252	Reis	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
256	Winterlein (Fasergewinn)	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
257	Winterlein (Olgewin)	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
268	Hirse	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
272	Futterweizen	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
273	Winterroggen (Hybridsorten)	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01
500	überwinterndes Zwischenfutter	0.11	0.11	0.07	0.03	0.01
501	abfrühendes Zwischenfutter	0.11	0.11	0.07	0.03	0.02
600	Herbstzwischenfutter	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01

A2.4: RBA der Kulturen bei Direktsaat

RBA_Direktsaat		RBA_Direktsaat					
RBA_Direktsaat_Knr	RBA_Direktsaat_Kname	RBA_Direktsaat_P1	RBA_Direktsaat_P2	RBA_Direktsaat_P3	RBA_Direktsaat_P4	RBA_Direktsaat_P5	RBA_Direktsaat_P6
7	Winterweizen Standard	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
77	Winterweizen nach Zuckerrüben, Futterrüben, Körnermais	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
8	Sommerweizen	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
9	Buchweizen	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
10	Wintergerste	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
11	Sommergerste	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
12	Winterhafer	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
13	Sommerhafer	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
14	Winterroggen (Populationsorten)	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
15	Dinkel (Winterkorn)	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
16	Winteremmer / -einkorn	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
17	Wintertriticale	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
18	Sommertriticale	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
19	Wintermais für Speiseöl	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
20	Sommermais für Speiseöl	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
21	Sonnenblumen für Speiseöl	0.08	0.1	0.06	0.025	0.03	0.02
22	Speisekartoffeln	0.11	0.4	0.2	0.04	0.06	0.44
23	Industriekartoffeln	0.11	0.4	0.2	0.04	0.06	0.44
24	Futterkartoffeln	0.11	0.4	0.2	0.04	0.06	0.44
25	Frühkartoffeln	0.11	0.4	0.2	0.04	0.06	0.44
26	Zuckerrüben	0.08	0.09	0.06	0.03	0.03	0.15
27	Futterrüben	0.08	0.09	0.06	0.03	0.03	0.15
28	Körnermais	0.08	0.08	0.06	0.02	0.01	0.01
29	Stommais	0.08	0.08	0.06	0.02	0.01	0.01
30	CCM	0.08	0.08	0.06	0.02	0.01	0.01
31	Lieschkolbenschrot	0.08	0.08	0.06	0.02	0.01	0.01
32	Feuchtkörnermais	0.08	0.08	0.06	0.02	0.01	0.01
33	Sommerweissensben	0.08	0.08	0.06	0.02	0.01	0.01
34	Sommerackerbohnen	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
35	Soja	0.08	0.08	0.06	0.03	0.01	0.02
36	Tabak Burley	0.11	0.11	0.07	0.03	0.03	0.1
37	Tabak Virginia	0.11	0.11	0.07	0.02	0.01	0.1
38	Susslupinen	0.08	0.08	0.06	0.03	0.02	0.02
39	Wintermais als NWR	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
40	Sommermais als NWR	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
41	Sonnenblumen als NWR	0.08	0.1	0.06	0.025	0.03	0.02
42	Sommerlein (Ölgewinn)	0.08	0.08	0.06	0.03	0.02	0.02
43	Sommerlein (Fasergew.)	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.1
44	Oltharf	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.1
45	Faserhanf	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.1
46	Kenaf	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.1
149	Kunstwiese 1. Jahr	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.004
150	Kunstwiese Folgejahre	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
186	Sommeremmer/-einkorn	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
187	Utharf	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.1
207	Winterweissensben	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
208	Winterackerbohnen	0.08	0.08	0.06	0.03	0.01	0.02
210	Saatkartoffeln	0.11	0.4	0.2	0.04	0.06	0.44
251	Saatmais	0.08	0.08	0.06	0.02	0.01	0.1
252	Reis	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
256	Winterlein (Fasergewinn)	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.1
257	Winterlein (Ölgewinn)	0.08	0.08	0.06	0.03	0.02	0.02
268	Hirse	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
272	Futterweizen	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
273	Winterroggen (Hybridsorten)	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.02
500	überwinterndes Zwischenfutter	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.01
501	abtierendes Zwischenfutter	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.01
600	Herbstzwischenfutter	0.08	0.08	0.06	0.01	0.01	0.01

A3: Tabellen zu den Summenprozenten der R-Faktor-Anteile

A3.1: Summenprozente der R-Anteile im Talgebiet

		R_Tal			
R_Tag_Tal	R_Proz_Tal	R_Tag_Tal	R_Proz_Tal	R_Tag_Tal	R_Proz_Tal
1	0.0022282982	51	0.033254124	101	0.063009218
2	0.0022282982	52	0.033598263	102	0.063971086
3	0.0022282982	53	0.033598263	103	0.065786417
4	0.0022282982	54	0.033598263	104	0.065786417
5	0.0095008096	55	0.033598263	105	0.065786417
6	0.0115570384	56	0.034725317	106	0.06638866
7	0.012146376	57	0.034725317	107	0.06742968
8	0.012146376	58	0.034725317	108	0.06742968
9	0.0125249285	59	0.034725317	109	0.06742968
10	0.0132218094	60	0.034957611	110	0.06742968
11	0.0132218094	61	0.035585664	111	0.078238216
12	0.0132218094	62	0.036523442	112	0.078238216
13	0.0134541031	63	0.03917331	113	0.080225617
14	0.0134541031	64	0.042386705	114	0.0826148
15	0.0134541031	65	0.042739447	115	0.0826148
16	0.0142026048	66	0.042739447	116	0.083242854
17	0.0142026048	67	0.042739447	117	0.099271114
18	0.0142026048	68	0.043307276	118	0.100647669
19	0.0151661932	69	0.04353957	119	0.100647669
20	0.0167492313	70	0.04353957	120	0.102695294
21	0.0186807098	71	0.04353957	121	0.105482818
22	0.0186807098	72	0.044425727	122	0.106171095
23	0.0186807098	73	0.045914127	123	0.109165102
24	0.0197105449	74	0.045914127	124	0.109165102
25	0.0202009426	75	0.046198042	125	0.111505246
26	0.0207472628	76	0.046198042	126	0.111961229
27	0.0210139703	77	0.046826095	127	0.111961229
28	0.0210139703	78	0.047591803	128	0.111961229
29	0.0210139703	79	0.048503771	129	0.114229964
30	0.0210139703	80	0.048503771	130	0.116294796
31	0.0210139703	81	0.048503771	131	0.116294796
32	0.0221410246	82	0.048503771	132	0.118299404
33	0.0221410246	83	0.048503771	133	0.122612323
34	0.0232852858	84	0.050000774	134	0.152578201
35	0.0244811679	85	0.050000774	135	0.152578201
36	0.0251522384	86	0.051123527	136	0.152578201
37	0.0261588441	87	0.054229379	137	0.153477264
38	0.0261588441	88	0.054229379	138	0.155555001
39	0.0268015232	89	0.054229379	139	0.16001762
40	0.0268015232	90	0.054229379	140	0.162108263
41	0.0281608711	91	0.054229379	141	0.163708508
42	0.0281608711	92	0.054229379	142	0.16599703
43	0.0281608711	93	0.058445078	143	0.16599703
44	0.0285136133	94	0.058445078	144	0.166706816
45	0.0285136133	95	0.059129054	145	0.166706816
46	0.0307849288	96	0.061976802	146	0.173710039
47	0.0317915345	97	0.062514518	147	0.175859185
48	0.0321184663	98	0.062514518	148	0.179941531
49	0.0321184663	99	0.063009218	149	0.181662224
50	0.032866968	100	0.063009218	150	0.182264467

A3.1: Summenprozentage der R-Anteile im Talgebiet

R_Tal

R_Tag_Tal	R_Proz_Tal
151	0.1864973734
152	0.1864973734
153	0.1864973734
154	0.187990075
155	0.1943523395
156	0.1943523395
157	0.1954647679
158	0.200459081
159	0.200459081
160	0.2017840151
161	0.2026314567
162	0.2026314567
163	0.2179499313
164	0.2263168038
165	0.2346965815
166	0.2346965815
167	0.2358580497
168	0.2662713086
169	0.2689753786
170	0.2689753786
171	0.30061033
172	0.3060219113
173	0.3101644811
174	0.3136032872
175	0.3191611275
176	0.3223099967
177	0.3340709373
178	0.3385533441
179	0.3416135976
180	0.3416135976
181	0.3416135976
182	0.3430159629
183	0.3430159629
184	0.3447882773
185	0.3508898567
186	0.3508898567
187	0.3686560179
188	0.3728889241
189	0.3736804431
190	0.4019918749
191	0.4019918749
192	0.4032307743
193	0.4173834789
194	0.4252126347
195	0.4271466943
196	0.4436163129
197	0.4448380053
198	0.4646345849
199	0.48925771
200	0.48925771

R_Tag_Tal	R_Proz_Tal
201	0.48925771
202	0.50930379
203	0.511962262
204	0.583973288
205	0.59030372
206	0.591637257
207	0.591637257
208	0.591637257
209	0.604323071
210	0.606241644
211	0.607033163
212	0.619090923
213	0.658228099
214	0.659380963
215	0.666375583
216	0.666375583
217	0.668449018
218	0.672512436
219	0.675024649
220	0.685015856
221	0.703478898
222	0.705354454
223	0.707522528
224	0.708666789
225	0.712873885
226	0.741256726
227	0.761973876
228	0.761973876
229	0.762911654
230	0.766318628
231	0.766318628
232	0.769607734
233	0.777699295
234	0.784046073
235	0.784046073
236	0.792490377
237	0.792490377
238	0.7955231
239	0.801829441
240	0.808849871
241	0.811235613
242	0.812470211
243	0.821439326
244	0.825852905
245	0.828459756
246	0.828674842
247	0.833386962
248	0.835357156
249	0.835357156
250	0.83735316

R_Tag_Tal	R_Proz_Tal
251	0.839555648
252	0.842429206
253	0.849935732
254	0.854650433
255	0.856190453
256	0.859098425
257	0.859674858
258	0.88128935
259	0.88128935
260	0.885688303
261	0.887103574
262	0.887103574
263	0.889108182
264	0.892294906
265	0.892294906
266	0.895899759
267	0.896781615
268	0.898919577
269	0.899711096
270	0.90019289
271	0.901276927
272	0.901276927
273	0.903032034
274	0.903771932
275	0.904967814
276	0.904967814
277	0.90738711
278	0.90738711
279	0.90738711
280	0.908720647
281	0.910094621
282	0.914043613
283	0.914043613
284	0.914772326
285	0.915864967
286	0.916802745
287	0.916802745
288	0.916802745
289	0.91837718
290	0.92716132
291	0.92716132
292	0.928081891
293	0.928851902
294	0.929892921
295	0.933979569
296	0.93514964
297	0.93631541
298	0.93631541
299	0.939053894
300	0.939053894

R_Tal

R_Tag_Tal	R_Proz_Tal
301	0.9390538938
302	0.9401809481
303	0.9424522637
304	0.9424522637
305	0.9435190937
306	0.944499889
307	0.9455693001
308	0.9472555798
309	0.9492859982
310	0.950339923
311	0.950339923
312	0.950339923
313	0.9509851831
314	0.9519487715
315	0.9533253264
316	0.9541942766
317	0.9541942766
318	0.9549255714
319	0.9589692013
320	0.9595499354
321	0.9595499354
322	0.9609325127
323	0.9609325127
324	0.9609325127
325	0.9616035832
326	0.9619563254
327	0.962722034
328	0.9638318814
329	0.9638318814
330	0.9638318814
331	0.9638318814
332	0.9650707807
333	0.9650707807
334	0.965406316
335	0.9668344916
336	0.9668344916
337	0.9700866025
338	0.9700866025
339	0.9711448291
340	0.9711448291
341	0.9711448291
342	0.9858309487
343	0.9867386146
344	0.9873150469
345	0.9873150469
346	0.9938106652
347	0.9938106652
348	0.9938106652
349	0.9938106652
350	0.9938106652

R_Tag_Tal	R_Proz_Tal
351	0.993810665
352	0.993810665
353	0.994800064
354	0.995759351
355	0.995759351
356	0.995759351
357	0.995759351
358	0.995759351
359	0.996189524
360	0.996189524
361	0.996189524
362	0.997852574
363	0.997852574
364	0.998626887
365	0.999297957
366	1

A3.2: Summenprozent der R-Anteile im Hügelgebiet

R_Hug

R_Tag_Hug	R_Proz_Hug	R_Tag_Hug	R_Proz_Hug	R_Tag_Hug	R_Proz_Hug
1	0	51	0.014896265	101	0.048928086
2	0	52	0.015196827	102	0.049269634
3	0	53	0.015196827	103	0.049269634
4	0	54	0.015511051	104	0.049269634
5	0.0021995677	55	0.015511051	105	0.049269634
6	0.0021995677	56	0.016057528	106	0.049269634
7	0.0029578038	57	0.016057528	107	0.055166798
8	0.0029578038	58	0.016986538	108	0.055166798
9	0.0029578038	59	0.020046806	109	0.055781584
10	0.0029578038	60	0.020046806	110	0.081281542
11	0.0029578038	61	0.021089893	111	0.082832169
12	0.0036354346	62	0.021629538	112	0.082832169
13	0.0036354346	63	0.021629538	113	0.082832169
14	0.0036354346	64	0.022628224	114	0.08502149
15	0.0036354346	65	0.022628224	115	0.085342545
16	0.0036354346	66	0.022628224	116	0.088756657
17	0.0040043062	67	0.023120053	117	0.089234824
18	0.0040043062	68	0.023120053	118	0.092338127
19	0.0040043062	69	0.023120053	119	0.092338127
20	0.0040043062	70	0.024499906	120	0.092338127
21	0.0040043062	71	0.024499906	121	0.092850449
22	0.0053110681	72	0.024499906	122	0.092850449
23	0.0053110681	73	0.024752651	123	0.093711149
24	0.0058951148	74	0.025428916	124	0.098417677
25	0.0058951148	75	0.025428916	125	0.103144699
26	0.0058951148	76	0.026330602	126	0.103756069
27	0.006940251	77	0.026330602	127	0.103756069
28	0.006940251	78	0.026330602	128	0.105381837
29	0.0072783833	79	0.026877078	129	0.108732421
30	0.0072783833	80	0.026877078	130	0.108732421
31	0.0072783833	81	0.0276763	131	0.111222304
32	0.0078248598	82	0.028543832	132	0.111222304
33	0.0083713362	83	0.032656067	133	0.111222304
34	0.0083713362	84	0.032656067	134	0.111222304
35	0.0090476008	85	0.037007386	135	0.111222304
36	0.0090476008	86	0.03793298	136	0.112178638
37	0.0102020323	87	0.03793298	137	0.112878811
38	0.0102020323	88	0.039025933	138	0.11594591
39	0.0102020323	89	0.039025933	139	0.118746602
40	0.0102020323	90	0.039025933	140	0.121151098
41	0.0102020323	91	0.039025933	141	0.123649179
42	0.0102020323	92	0.042195497	142	0.132995975
43	0.0102020323	93	0.043213309	143	0.132995975
44	0.0102020323	94	0.043213309	144	0.132995975
45	0.0138921146	95	0.04478921	145	0.132995975
46	0.0138921146	96	0.045961402	146	0.13381569
47	0.0142404934	97	0.045961402	147	0.142120083
48	0.0142404934	98	0.045961402	148	0.142120083
49	0.0142404934	99	0.046501048	149	0.142120083
50	0.0142404934	100	0.047293439	150	0.144592889

R_Hug

R_Tag_Hug	R_Proz_Hug
151	0.1452534421
152	0.1527743244
153	0.1548441039
154	0.1565586738
155	0.164164943
156	0.1866831885
157	0.1874141007
158	0.194492337
159	0.1978237941
160	0.2022024367
161	0.2057477027
162	0.2060414338
163	0.2060414338
164	0.2071733232
165	0.2159968687
166	0.2183603794
167	0.2200291818
168	0.2279189357
169	0.2336569385
170	0.2378695889
171	0.2392016252
172	0.2392016252
173	0.2483107047
174	0.249571016
175	0.2499535495
176	0.25535342
177	0.257897951
178	0.257897951
179	0.2646961181
180	0.2660213235
181	0.2660213235
182	0.2660213235
183	0.2792412721
184	0.2831984447
185	0.2849164301
186	0.2849164301
187	0.2888087086
188	0.2893893399
189	0.3043047317
190	0.3050014891
191	0.3465336998
192	0.3481048196
193	0.3500857968
194	0.3595637478
195	0.3616984215
196	0.4078551892
197	0.4078551892
198	0.4078551892
199	0.4138595993
200	0.4182088688

R_Tag_Hug	R_Proz_Hug
201	0.418208869
202	0.425326725
203	0.42943896
204	0.438008394
205	0.446154992
206	0.446154992
207	0.44878491
208	0.44878491
209	0.457685645
210	0.474571767
211	0.474571767
212	0.474571767
213	0.477206467
214	0.481038633
215	0.492582948
216	0.495598815
217	0.510135089
218	0.512539585
219	0.541782907
220	0.553361377
221	0.571873267
222	0.573621991
223	0.681421303
224	0.682309328
225	0.684336072
226	0.684336072
227	0.701860889
228	0.709183674
229	0.710785533
230	0.711543769
231	0.718928032
232	0.720649433
233	0.726228274
234	0.735896126
235	0.737842948
236	0.742757821
237	0.750939256
238	0.751431085
239	0.755934734
240	0.75836109
241	0.761184324
242	0.770815971
243	0.772708146
244	0.772708146
245	0.772708146
246	0.776267074
247	0.777325872
248	0.778330023
249	0.783111692
250	0.783111692

R_Tag_Hug	R_Proz_Hug
251	0.78688921
252	0.790745285
253	0.792343728
254	0.792343728
255	0.799347507
256	0.800805916
257	0.806390222
258	0.815960391
259	0.81837855
260	0.81837855
261	0.81837855
262	0.81837855
263	0.821507127
264	0.822845995
265	0.822845995
266	0.826799069
267	0.82926641
268	0.836650673
269	0.842028685
270	0.842028685
271	0.842537591
272	0.843309489
273	0.849430025
274	0.849430025
275	0.850195092
276	0.907375656
277	0.909286958
278	0.909959807
279	0.918925436
280	0.922974144
281	0.92330886
282	0.92330886
283	0.92330886
284	0.923821182
285	0.929272285
286	0.929272285
287	0.929907564
288	0.929907564
289	0.929907564
290	0.930822912
291	0.931427451
292	0.931857801
293	0.932540897
294	0.932540897
295	0.933442583
296	0.933442583
297	0.933442583
298	0.934638
299	0.934638
300	0.935375744

A3.2: Summenprozentage der R-Anteile im Hügelgebiet

R_Hug

R_Tag_Hug	R_Proz_Hug
301	0.9353757435
302	0.9358060938
303	0.9361408106
304	0.9361408106
305	0.9374626005
306	0.9386511868
307	0.9404477282
308	0.9412694921
309	0.9412694921
310	0.9518028258
311	0.9522160986
312	0.9522160986
313	0.9535433533
314	0.9535433533
315	0.9535433533
316	0.9553125709
317	0.9553125709
318	0.9560024974
319	0.9560024974
320	0.9560024974
321	0.9576692506
322	0.9610095879
323	0.9618805348
324	0.9618805348
325	0.9618805348
326	0.9670447373
327	0.9698932458
328	0.9737459048
329	0.9737459048
330	0.9740601288
331	0.9749686459
332	0.9776976127
333	0.9816206306
334	0.983596143
335	0.983596143
336	0.983596143
337	0.983596143
338	0.9852014176
339	0.986834016
340	0.986834016
341	0.986834016
342	0.9876605616
343	0.9890096754
344	0.990329416
345	0.9909578639
346	0.9922284217
347	0.9927612362
348	0.9927612362
349	0.9927612362
350	0.9927612362

R_Tag_Hug	R_Proz_Hug
351	0.994708059
352	0.994994959
353	0.994994959
354	0.995951293
355	0.995951293
356	0.995951293
357	0.995951293
358	0.995951293
359	0.997419948
360	0.997419948
361	0.997419948
362	0.997665862
363	0.997665862
364	0.999207609
365	0.999207609
366	1

A4: Tabellen zu den Korrekturfaktoren

A4.1: Korrekturfaktoren

Korrekturfaktoren auf Relative Bodenabträge (RBA)

RBA-Reduktionsfaktoren nach Kunstweise

Wird auf alle Kulturen (Reihenfrüchte und Getreide) im 1. Jahr nach Kunstweise angewendet.

Verfahren	Kulturperiode 1	Kulturperiode 2	Kulturperiode 3	Kulturperiode 4	Kulturperiode 5	Kulturperiode 6
bei Pflug	Bodenbearbeitung bis Saatbett	Saatbett bis 10% Bodenbedeckung	10%-50% Bodenbedeckung	50%-75% Bodenbedeckung	75% bis Ernte	Ernte bis Bodenbearbeitung
bei Mulchsaat 10-30%	0.650	0.750	0.750	0.800	0.800	0.850
bei Mulchsaat >30%	0.750	0.859	0.859	0.916	0.916	0.950
bei Direktsaat, Streifenfrässaat	0.850	0.924	0.924	0.986	0.986	1.000
	0.900	0.950	0.950	1.000	1.000	1.000

RBA-Erhöpfungsfaktoren für Blattfrüchte, wenn Blattfruchtanteil in Fruchtfolge 50% oder grösser

Verfahren	ohne Kunstweiseinfluss	1. Jahr nach Kunstweise*
Pflug	1.50	1.39
Mulchsaat 10-30% Bedeckung	1.35	1.21
Mulchsaat >30% Bedeckung	1.20	1.16
Direktsaat, Streifenfrässaat	1.00	1.00

* Wenn bei einem Blattfruchtanteil von 50% und mehr eine Blattfrucht auf Kunstweise folgt, wird anstatt der oberen Reduktionsfaktoren nach Kunstweise dieser Faktor im 1. Jahr nach Kunstweise auf alle sechs Kulturperioden der Hauptkultur angewendet.

Blattfrüchte

Ackerbohnen
Eiweisserbsen
Reps
Kartoffeln
Mais
Rüben
Soja
Sonnenblumen
Tabak
Gemüse

RBA-Erhöpfungsfaktoren für Getreide und Raps nach Wurzelfrucht

Verfahren	ohne Kunstweiseinfluss
Pflug	1.250
Mulchsaat 10-30% Bedeckung	1.110
Mulchsaat >30% Bedeckung	1.010
Direktsaat, Streifenfrässaat	1.000

Wurzelfrüchte

Saatkartoffeln
Kartoffeln
Zuckerrüben
Futterrüben
Topinambur

A4.2: Zuordnung der Kulturen zur Bestimmung der Korrekturfaktoren

Quelle: eigene Tabelle

Legende: G = Getreide, B = Blattfrüchte, BR = Raps (ist Blattfrucht), WB = Wurzel-
früchte (gehören zu Blattfrüchten), K = Kunstwiese, N = keine Zuordnung

KORR

KORR_Knr	KORR_Kname	KORR_Zuordnung
7	Winterweizen Standard	G
77	Winterweizen nach Zuckerrüben, Futterrüben, Körnermais	G
8	Sommerweizen	G
9	Buchweizen	G
10	Wintergerste	G
11	Sommergerste	G
12	Winterhafer	G
13	Sommerhafer	G
14	Winterroggen (Populationsorten)	G
15	Dinkel (Winterkorn)	G
16	Winteremmer / -einkorn	G
17	Wintertriticale	G
18	Sommertriticale	G
19	Winterraps für Speiseöl	BR
20	Sommerraps für Speiseöl	BR
21	Sonnenblumen für Speiseöl	B
22	Speisekartoffeln	WB
23	Industriekartoffeln	WB
24	Futterkartoffeln	WB
25	Frühkartoffeln	WB
26	Zuckerrüben	WB
27	Futterrüben	WB
28	Körnermais	B
29	Silomais	B
30	CCM	B
31	Lieschkolbenschrot	B
32	Feuchtkörnermais	B
33	Sommereiwisserbsen	B
34	Sommerackerbohnen	B
35	Soja	B
36	Tabak Burley	B
37	Tabak Virginia	B
38	Süßlupinen	B
39	Winterraps als NWR	BR
40	Sommerraps als NWR	BR
41	Sonnenblumen als NWR	B
42	Sommerlein (Ölgewinn.)	N
43	Sommerlein (Fasergew.)	N
44	Ölhanf	N
45	Faserhanf	N
46	Kenaf	N
149	Kunstwiese 1. Jahr	K
150	Kunstwiese Folgejahre	K
186	Sommeremmer / -einkorn	G
187	Urhanf	N
207	Wintereiwisserbsen	B
208	Winterackerbohnen	B
210	Saatkartoffeln	WB
251	Saatmais	B
252	Reis	N
256	Winterlein (Fasergew.)	N
257	Winterlein (Ölgewinn.)	N
268	Hirse	G
272	Futterweizen	G
273	Winterroggen	G

A5: Tabelle zum systematischen Vergleich des C-Faktors

Systematischer Vergleich von C-Faktoren nach Tool und Variable

Referenz-Fruchtfolge	Fruchtfolge (FF):	G G G M M G G R R		
	Tool:	CTool	ErosionCH	EMiL
	Region:	Talgebiet	keine Angabe	bis 100m
	Bodenbearbeitung Hauptkultur:	Pflug	Pflug	Frühjahrsfurche
	Zwischennutzung:	Stoppelbrache im Winter	Stoppelbrache im Winter	Standard
C-Faktor:	0.104	0.102	0.116	

Variable	Variationen	C-Faktoren		
		CTool	ErosionCH	EMiL
Region	Talgebiet	0.104	-	-
	Hügelgebiet	0.099	-	-
	bis 100m	-	-	0.116
	100-200m	-	-	0.133
	ab 200m	-	-	0.148
Bodenbearbeitung	Pflug (CTool, Erosion CH) bzw. Frühjahrsfurche (EMiL)	0.104	0.102	0.116
	Mulchsaat < 30% Bodenbedeckung	0.045	0.050	0.033
	Mulchsaat > 30% Bodenbedeckung	0.029	0.032	
	Direktsaat	0.026	0.027	0.035
Zwischennutzung	Schwarzbrache	0.179	0.205	-
	Ungünstig (mit Herbstfurche)	-	-	0.177
	Stoppelbrache	0.103	0.102	-
	Standard (mit Frühjahrsfurche)	-	-	0.116
	Zwischenkultur abfrierend (nach G) (mit Mulch < 30% als BB ZK)	0.111	0.115	-
	Zwischenkultur winterhart (nach G) (mit Mulch < 30% als BB ZK)	0.109	0.111	-
	Herbstzwischenkultur vor Schwarzbrache (nach G) (mit Mulch < 30% als BB ZK)	0.128	0.135	-
Günstig (mit Frühjahrsfurche)	-	-	0.097	
Korrekturfaktoren	Blattfruchtanteil > 50% FF: G G G M M M G G R R	0.167	0.152	0.192
	Wurzelfrucht vor Getreide FF: G R G R G R G R G G	0.104	0.091	0.092
	Blattfruchtanteil und Wurzelfrucht FF: R Rp R G R Rp R G R Rp	0.160	0.133	-
	Kunstwiese FF: Kw G G Kw M Kw Kw G Kw R	0.054	0.040	-
Kartoffeln (stark erhöhte RBA-Werte in neuer Datengrundlage)	Kartoffel-Anteil 40% FF: G G G G G G K K K K	0.231	0.141	0.148

Legende:

FF = Fruchtfolge

G = Getreide (Sommerweizen)

M = Mais (Körnermais)

R = Rüben (Zuckerrüben)

Rp = Raps (Sommereraps)

Kw = Kunstwiese

K = Kartoffeln (Speisekartoffeln)

BB ZK = Bodenbearbeitung Zwischenkultur

Quellen:

CTool: Kupferschmied (2018)

ErosionCH: Mosimann & Rüttimann (2006)

EMiL: Landwirtschaftskammer NRW; Jacobs, Hiller & Schneider (2012)

Erklärung

Gemäss Art. 28 Abs. 2 RSL 05

Name/Vorname: Kupferschmied, Patrick
Matrikelnummer: 09-110-479
Studiengang: Master of Science in Geography, 120 ECTS

Bachelor

Master

Dissertation

Titel der Arbeit: Konzeptionierung und Operationalisierung einer aktuellen und schweizweit verwendbaren Berechnungsweise des USLE C-Faktors

Leiter/-in der Arbeit: PD Dr. Andreas Heinimann

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäss aus Quellen entnommen wurden, habe ich als solche gekennzeichnet. Mir ist bekannt, dass andernfalls der Senat gemäss Artikel 36 Absatz 1 Buchstabe o des Gesetzes vom 5. September 1996 über die Universität zum Entzug des auf Grund dieser Arbeit verliehenen Titels berechtigt ist.

Bern, 23. Oktober 2018

Ort/Datum

.....
Unterschrift