



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

**„Validierung des Erosionsmodells PESERA
mittels Ergebnissen aus Regensimulationen
in drei EU-Mitgliedstaaten“**

Verfasserin

Julia Kindlinger

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat)

Wien, Juni 2009

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 453

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Theoret. / Angewandte Geographie

Betreuerin / Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade

Ein großes Dankeschön möchte ich an meine Familie, speziell an meine Eltern aussprechen, die mir das Studium finanziert haben und die mich vor allem während der Diplomarbeitsphase mental unterstützt haben.

Von universitärer Stelle will ich mich besonders bei Herrn Dr. Thomas Glade für die nicht einfache Themenfindung, die geborgte Fachliteratur sowie die zahlreichen Denkanstöße und vor allem die viele Geduld ganz herzlich bedanken.

Besonders bedanken möchte ich mich auch bei Herrn DI Peter Strauss vom Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, für Vorschläge über mögliche Diplomarbeits Themen, für die zur Verfügung Stellung der notwendigen Daten und für die ständige Hilfsbereitschaft bezüglich Fragen und Anregungen.

Außerdem will ich mich noch bei Herrn Mag. Jakob Cevik für das Korrekturlesen der gesamten Diplomarbeit sowie für nützliche Tipps und Hinweise sehr herzlich bedanken.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	8
2. Bodenerosion	14
2.1 Definitionen	14
2.2 Ausmaß	15
2.3 Einflussfaktoren der Bodenerosion	16
2.3.1 Klima	16
2.3.2 Boden	17
2.3.3 Topografie	19
2.3.4 Landnutzung	19
2.4 Prozesse	21
2.4.1 Ablösung	21
2.4.2 Transport	24
2.4.3 Deposition	26
3. Modellierung von Bodenerosion	28
3.1 Überblick und Definitionen	28
3.2 Geschichte	29
3.3 Modelltypen und ihre Anwendungen	31
3.4 Wahl des Modells	33
3.5 PESERA	34
4. Modellaufbau	35
4.1 Modellkonzept	35
4.2 Parameter	39
4.2.1 Faktor Klima	40
4.2.2 Faktor Vegetation	41
4.2.3 Faktor Boden	43
4.2.4 Faktor Topographie	44
4.3 Bisherige Validierungen	44
4.4 USLE und MUSLE	46
4.4.1 USLE	46
4.4.2 MUSLE	48
5. Methodik und Daten	50
5.1 Methode der Datengewinnung	50
5.2 Resultierende Daten	52
5.2.1 Klima	52
5.2.2 Vegetation	54
5.2.3 Boden	54
5.2.4 Topographie	54
5.2.5 Gemessene Bodenabträge	55
5.3 Berechnung des Modells	56
5.3.1 Berechnung im ArcGIS	56
5.3.2 Berechnung im Microsoft Excel	57
5.3.3 Berechnung im SPSS	58
6. Untersuchungsgebiete	60
6.1 Lage	60
6.1.1 Lageübersicht aller Standorte	60
6.1.2 Lage der österreichischen Standorte	61
6.1.3 Lage der ungarischen Standorte	62

6.1.4 Lage der italienischen Standorte	63
6.2 Geologie	64
6.3 Pedologie	66
6.3.1 Anthrosol	66
6.3.2 Cambisol	67
6.3.3 Luvisol	68
6.3.4 Regosol	69
6.3.5 Fluvisol	70
6.4 Klima	71
6.4.1 Klima der österreichischen Standorte	71
6.4.2 Klima der ungarischen Standorte	72
6.4.3 Klima der italienischen Standorte	73
7. Kalibrierung	74
7.1 Ursprüngliche Parameter	76
7.2 Parameter k	77
7.3 Parameter m	78
7.4 Parameter n	79
7.5 Parameter k,m,n	80
7.6 Ergebnis der Kalibrierung	81
7.7 Berechnungsfehler der Kalibrierung	82
8. Ergebnisse	89
8.1 Vergleich der gemessenen Werte mit den PESERA Werten	89
8.2 Ergebnisse der Erodibilität der einzelnen Berechnungen	91
8.3 Vergleich der PESERA Erodibilitäten mit den USLE Erodibilitäten	92
8.4 Vergleich der USLE-Werte mit den PESERA-Werten	94
8.5 Vergleich der USLE-Werte mit den gemessenen Werten	95
8.6 Vergleich der MUSLE-Werte mit den gemessenen Werten	96
9. Diskussion der Ergebnisse und mögliche Perspektiven	98
9.1 Diskussion der Kalibrierungsergebnisse	98
9.1.1 Diskussion der Kalibrierung	98
9.1.2 Diskussion des Berechnungsfehlers der Kalibrierung	99
9.2 Diskussion der Validierungsergebnisse	100
9.2.1 Diskussion des Vergleichs der gemessenen Werte mit den PESERA Werten	101
9.2.2 Diskussion der Ergebnisse der Erodibilität der einzelnen Berechnungen	101
9.2.3 Diskussion des Vergleichs der PESERA Erodibilitäten mit den USLE Erodibilitäten	102
9.2.4 Diskussion des Vergleichs der USLE-Werte mit den PESERA-Werten	102
9.2.5 Diskussion des Vergleichs der USLE-Werte mit den gemessenen Werten	103
9.2.6 Diskussion des Vergleichs der MUSLE-Werte mit den gemessenen Werten	103
9.3 Mögliche Perspektiven	104
10. Zusammenfassung	106
11. Summary	109
Literaturverzeichnis	111
Urulogie	114

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Verstädterung ausgewählter Städte Europas von den 50er bis zu den 90er Jahren	9
Abb. 1.2: Änderung des Wassererosionsrisikos in landwirtschaftlich genutzten Gebieten im Zeitraum 1990-2050 als Anteil an der Gesamtfläche	10
Abb. 2.1: Erosivität im Laufe eines Jahres anhand verschiedener Standorte in den USA	17
Abb. 2.2: Erodibilitätsbestimmung für Standardtestbedingungen	18
Abb. 2.3: Erosion und Deposition für Hangprofile	19
Abb. 2.4: Der Effekt von Bodenbedeckung auf Erosion bei Regentropfeneinschlag	21
Abb. 2.5: Kritische Wassergeschwindigkeiten für Erosion, Transport und Deposition von Sediment als Funktion der Partikelgröße	22
Abb. 2.6: Der „Splash-Effekt“ von Regentropfen	23
Abb. 2.7: Kritische Schergeschwindigkeit in turbulentem Abfluss für Bodenpartikelablösung als Funktion von Partikelgröße	24
Abb. 2.8: Rillenerosion	25
Abb. 2.9: Gullybildung an einem Hang	26
Abb. 2.10: Der selektive Prozess der Ablagerung der verschiedenen Partikelgrößen	27
Abb. 3.1: Flussdiagramm für das Modell der Wassererosionsprozesse	32
Abb. 4.1: Kalkulation des tatsächlichen Oberflächenabflusses	36
Abb. 4.2: Potenzgesetz des täglichen Sedimenttransportes	37
Abb. 4.3: Potenzgesetz für den täglichen Sedimentbetrag	37
Abb. 4.4: Grundformel der Phase 2	38
Abb. 4.5: Datensätze für das Modell PESERA	39
Abb. 4.6: Flussdiagramm der Parameter	40
Abb. 4.7: Flussdiagramm des Vegetationswachstumsmodells	42
Abb. 4.8: Körnungsdreieck der USDA	43
Abb. 4.9: Erosionsgefährdungskarte MEDALUS	46
Abb. 4.10: Berechnungen von PESERA	46
Abb. 5.1: Der Regensimulator von Strauss et al.	50
Abb. 5.2: Der Standort Nagyhorvati (Ungarn)	51
Abb. 5.3: Die 5 Schritte zum Ausführen von PESERA mit PESERA_GRID	56
Abb. 5.4: Hauptarbeitsblatt zur Berechnung von PESERA im Microsoft Excel	57
Abb. 5.5: SPSS Datenansicht mit der Rechenoption „Nichtlineare Regression“	59
Abb. 6.1: Übersicht der Standorte von Mitteleuropa	60
Abb. 6.2: Lage der beiden österreichischen Testflächen Rottenhaus und Ritzlhof	61
Abb. 6.3: Lage der beiden ungarischen Testflächen Somogybabod und Nagyhorvati	62
Abb. 6.4: Lage der italienischen Testfläche in Turin	63
Abb. 6.5: Geologie des Alpenraums	64
Abb. 6.6: Zeittafel des Känozoikums	65
Abb. 6.7: Anthrosol	66
Abb. 6.8: Cambisol	68
Abb. 6.9: Luvisol	68
Abb. 6.10: Regosol	69
Abb. 6.11: Fluvisol	70
Abb. 6.12: Klimadiagramm Linz	71

Abb. 6.13: Klimadiagramm Budapest	72
Abb. 6.14: Klimadiagramm Turin	73
Abb. 7.1: Scatterplot gemessene und simulierte Werte ohne Kalibrierung	76
Abb. 7.2: Scatterplot gemessene und simulierte Werte mit k-Kalibrierung	78
Abb. 7.3: Scatterplot gemessene und simulierte Werte mit m-Kalibrierung	79
Abb. 7.4: Scatterplot gemessene und simulierte Werte mit n-Kalibrierung	80
Abb. 7.5: Scatterplot gemessene und simulierte Werte mit Kalibrierung von k,m,n	81
Abb. 7.6: Berechnungsfehler Standort HU3	85
Abb. 7.7: Berechnungsfehler Standort HU4	85
Abb. 7.8: Berechnungsfehler Standort IT5	85
Abb. 7.9: Berechnungsfehler Standort IT6	85
Abb. 7.10: Berechnungsfehler Standort RI4	86
Abb. 7.11: Berechnungsfehler Standort RI5	86
Abb. 7.12: Berechnungsfehler Standort RO	86
Abb. 7.13: Abtragsraten der drei Beregnungen eines fiktiven Hangs mit verschiedenen k-Werten	87
Abb. 7.14: Berechnungsfehler der drei Beregnungen eines fiktiven Hangs mit verschiedenen k-Werten	88
Abb. 8.1: Vergleich gemessen-errechnet HU3	89
Abb. 8.2: Vergleich gemessen-errechnet HU4	89
Abb. 8.3: Vergleich gemessen-errechnet IT5	90
Abb. 8.4: Vergleich gemessen-errechnet IT6	90
Abb. 8.5: Vergleich gemessen-errechnet RI4	90
Abb. 8.6: Vergleich gemessen-errechnet RI5	90
Abb. 8.7: Vergleich gemessen-errechnet RO	91
Abb. 8.8: Veränderung des k-Wertes pro Beregnung und Standort	92
Abb. 8.9: Vergleich PESERA Erodibilität und USLE Erodibilität	94
Abb. 8.10: Vergleich PESERA und USLE Raten	95
Abb. 8.11: Vergleich USLE Raten und gemessene Werte	96
Abb. 8.12: Vergleich MUSLE Raten und gemessene Werte	97
Abb. 9.1: Geschätzte jährliche Erosionsraten für den südlichen und östlichen Mittelmeerraum	104

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Ausmaß der durch menschliche Aktivität verursachten Bodenerosion in Mio. Hektar	15
Tab. 3.1: Die Entwicklung der Erosionsgleichungen	29
Tab. 4.1: Klassifikation der Texturklassen zu Bodentypen und ihre Erodibilitätswerte	44
Tab. 5.1: Oberflächenabfluss aller 88 Regensimulationen	53
Tab. 5.2: Korngrößenverteilung der 7 Standorte	54
Tab. 5.3: Hangneigung der 7 Standorte	54
Tab. 5.4: Gemessene Abtragsmengen in $g \cdot m^{-2}$	55
Tab. 6.1: WRB Bodenklassifikation der Standorte	66
Tab. 7.1: Eingangsdaten	74
Tab. 7.2: Errechnete k-Werte	77
Tab. 7.3: Errechnete m-Werte	78
Tab. 7.4: Errechnete n-Werte	79
Tab. 7.5: Errechnete k, m, n Werte	80
Tab.7.6: Errechnete optimale k, m und n Werte	81
Tab. 7.7: Berechnete k-Werte	83
Tab. 7.8: Annahmen für einen fiktiven Hang	87
Tab. 8.1: k-Werte pro Beregnung und Standort	91
Tab. 8.2: Vergleich PESERA k-Werte und USLE k-Werte	93

1. Einleitung

Der Prozess der Bodenerosion stellt einen immerwährenden und natürlichen Vorgang dar. Die Diplomarbeit konzentriert sich auf die beschleunigte Erosion, die sich dadurch auszeichnet, dass sie die natürliche Abtragsrate aufgrund menschlicher Aktivitäten überschreitet.

Unter menschlichen Aktivitäten versteht man vor allem die Rodung der Vegetation, einerseits indirekt in Form von Beweidung andererseits durch das Legen kontrollierter Brände. Auch Veränderungen bezüglich der Intensität der Bewirtschaftung im Ackerbau führen zu einer Änderung der Pflanzendecke.

Jones et al. (2003) gehen davon aus, dass solche Veränderungen die natürlichen Kräfte der Erosion verstärken und dadurch die Bodenneubildungsrate überstiegen wird. Jeder Bodenverlust, der mehr als eine Tonne pro Hektar und Jahr beträgt, wird in der Zeitspanne von 50 bis 100 Jahren als irreversibel eingestuft.

Jene Kräfte reißen zuerst den fruchtbaren Oberboden mit sich und verursachen dadurch eine Verringerung der Produktivität. Das kann ohne Gegensteuerung zu großen Verlusten an natürlicher Anbaufläche führen, was bei der heutigen Bevölkerungszunahme zunehmend kritisch betrachtet werden muss (Jones et al. 2003).

Abbildung 1.1 stellt die Umwandlung natürlicher und landwirtschaftlicher Flächen in städtisches Gebiet ab den 50er Jahren in Europa dar. Außerdem wird veranschaulicht in welchem Ausmaß Stadterweiterung stattfand und wie hoch die Zunahme versiegelter Flächen war. In den letzten 50 Jahren verdoppelten sich die künstlichen Flächen vor allem in Setubal (Portugal), Bratislava (Slowakei) und Palermo (Italien). Das Ruhrgebiet weist insgesamt etwa 78 Prozent künstliche Flächen auf, die Zunahme ist dort aber eher gering. Gleichbleibende Verluste an Agrarflächen durch Anstiege künstlicher Flächen gab es in vielen Städten, allem voran in Heraklion (Griechenland) mit 41 Prozent sowie in Nicosia (Zypern) und in Mailand (Italien) (Europäische Umweltagentur 2002).

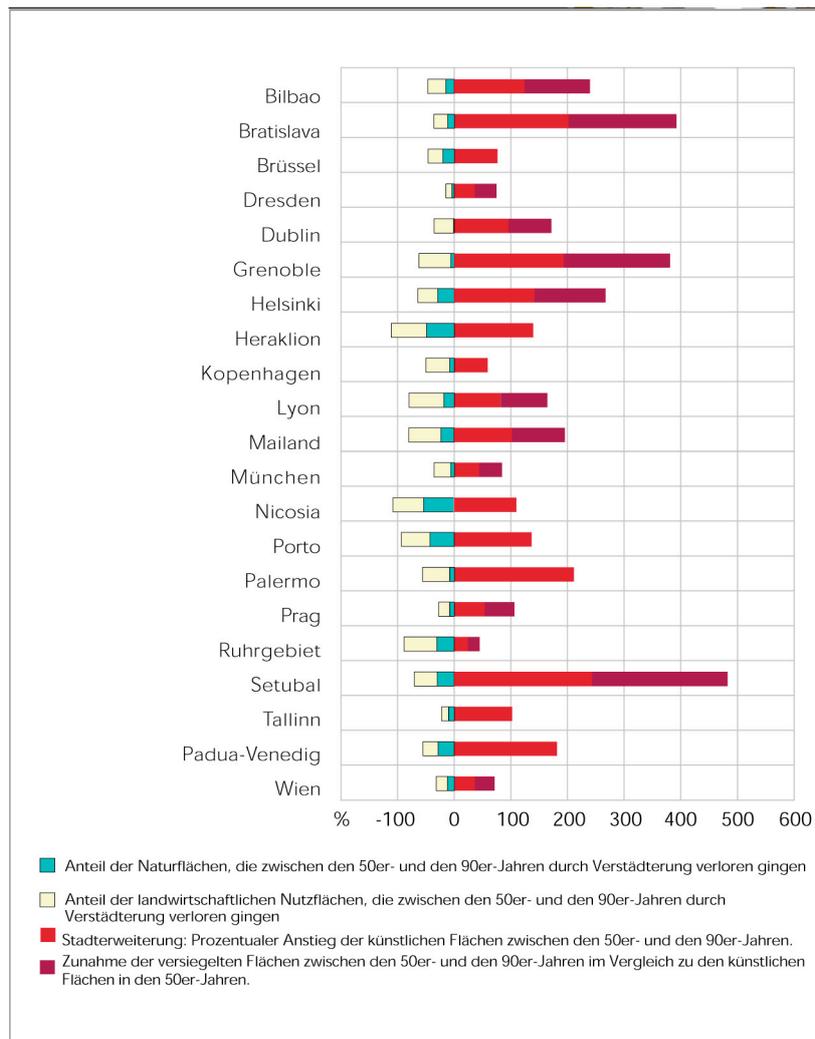


Abb. 1.1: Verstädterung ausgewählter Städte Europas von den 50er bis zu den 90er Jahren
Quelle: Europäische Umweltagentur 2002

„Dem Boden kommt in der Umwelt Europas eine grundlegende Aufgabe zu [...] Eine Änderung der im Boden stattfindenden Prozesse zieht Veränderungen in der Funktionsweise der Ökosysteme nach sich, und viele Umweltprobleme, die in anderen Medien zutage treten, haben in Wirklichkeit ihren Ursprung im Boden.“ (Europäische Umweltagentur 2002: S.6)

Abbildung 1.2 macht auf die Veränderungen bezüglich des Wassererosionsrisikos auf landwirtschaftlich genutzte Flächen aufmerksam. Zu bemerken ist vor allem, dass das sehr hohe Risiko besonders die südeuropäischen Länder wie Italien, Griechenland und Spanien betrifft. Aber auch in Österreich und Deutschland vergrößerte sich der Anteil der extrem gefährdeten Fläche enorm.

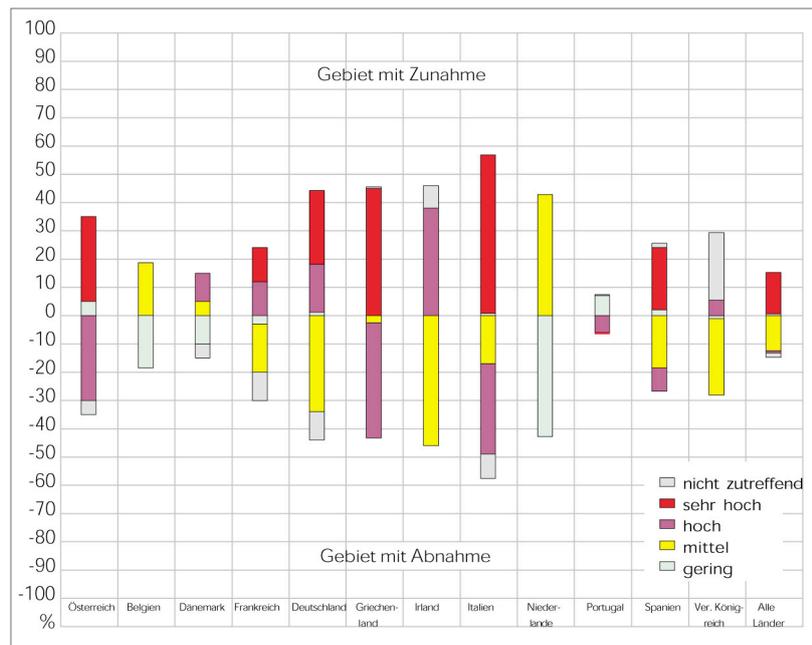


Abb. 1.2: Änderung des Wassererosionsrisikos in landwirtschaftlich genutzten Gebieten im Zeitraum 1990-2050 als Anteil an der Gesamtfläche
Quelle: Europäische Umweltagentur 2002

Aufgrund dieser Trends ist es gerade heute umso wichtiger Methoden zu entwickeln welche einerseits Bodenerosion in Raum und Zeit zuverlässig prognostizieren können und andererseits Lösungsvorschläge zur Reduzierung der Abtragsraten beinhalten, um so wenig wie möglich an Anbaufläche zu verlieren.

Erosionsmodelle sind in der heutigen Zeit nicht mehr wegzudenken. Vor allem zur Prognose von Bodendegradation in großen Gebieten sind sie gut geeignet, da in solchem Umfang Messungen nicht mehr durchführbar sind. Außerdem ist es Modellen möglich, potentielle Klima- und Landnutzungsänderungen zu implementieren und als Ergebnis mögliche Szenarien darzustellen.

Nach eingehenden Überlegungen wurde ein Modell ausgesucht, das zwar noch etwas unbekannt, jedoch sehr vielversprechend wirkt und vor allem für Europa in Zukunft enorm an Bedeutung gewinnen wird, denn die derzeit im Entwurfsstadium befindliche EU-Bodenrahmenrichtlinie schlägt die Ausweisung von erosionsgefährdeten Flächen mittels Anwendung von Erosionsmodellen vor.

Das angesprochene Modell ist prozessbasiert, nennt sich PESERA (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment) und wurde 2004 im Rahmen einer europäischen Forschungskoooperation von Kirkby et al. entwickelt.

Zukünftig möchte man das Modell auf ganz Europa anwenden können, doch an was es bisher fehlt sind ausreichende Validierungen, sprich Überprüfungen, in den entsprechenden

EU-Ländern, ob das Modell auch richtige Prognosen abgibt. Validierungen sind nur kleinräumig, meistens auf Plotskala, möglich.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden folgende Hypothesen aufgestellt und im Diskussionsteil verifiziert bzw. falsifiziert:

1. Die Erosionsmenge der Plots kann mit dem Modell PESERA vorhergesagt werden.

Um dieses Ziel zu erreichen werden die tatsächlich gemessenen Abtragswerte mit den Vorhersagen von PESERA verglichen. Messwerte wurden vom Bundesamt für Wasserwirtschaft in Petzenkirchen, Niederösterreich, welches am Projekt DESPRAL teilgenommen hat, zur Verfügung gestellt. Im Laufe dieses Projekts wurden Regensimulationen auf Plotgröße in mehreren EU-Ländern durchgeführt und der Bodenabtrag sowie der Oberflächenabfluss gemessen. Diese Ergebnisse dienen als Grundlage für die Analysen. Als Resumée werden Aussagen über die relative und absolute Genauigkeit getroffen, mit der PESERA prognostiziert hat.

2. Anhand einer Kalibrierung von PESERA können die Prognosen optimiert werden.

Damit PESERA reale Abträge prognostizieren kann wird eine Kalibrierung, sprich Anpassung, des Modells durchgeführt. Hierbei wird anhand eingehender Analysen mit dem Programm SPSS überprüft welcher Parameter der Modellgleichung sich dazu am Besten eignet, worauf es bei der Anpassung ankommt und was andere Wissenschaftler kalibriert haben.

3. Bei jeder gemittelten Kalibrierung entsteht ein Berechnungsfehler.

Da eine Kalibrierung pro Standort und nicht pro Plot durchgeführt wird, entsteht ein gewisser Berechnungsfehler. Geprüft werden soll wie groß der Fehler wird je nachdem ob man pro Standort, pro Berechnung oder pro Plot kalibriert.

4. Die Erodibilität, sprich Anfälligkeit des Bodens gegenüber Erosion, beeinflusst sowohl Abtrags- als auch Abflussraten.

Um jenes Ziel erreichen zu können wird der Erodibilitätsparameter k für jede einzelne Berechnung analysiert und mit den Modellergebnissen verglichen. Es wird besonders auf die Richtung und das Ausgangsniveau des k -Wertes eingegangen.

5. Der Erodibilitätsparameter der Modelle USLE und PESERA tendiert in die gleiche Richtung.

Verglichen werden sollen die errechneten und kalibrierten k -Werte der beiden Modelle, gemittelt pro Standort, um zu prüfen ob der Faktor der Erodibilität relativ gesehen bei beiden Ansätzen die gleiche Richtung einschlägt.

6. Das Modell USLE liefert ähnliche Abtragsraten wie PESERA.

Um jene Hypothese verifizieren bzw. falsifizieren zu können wird mit den Eingangsdaten das Modell USLE kalkuliert und hinsichtlich der Gesamtabträge gegenübergestellt.

7. Der Modellansatz USLE prognostiziert die tatsächlichen gemessenen Bodenabträge genauer als PESERA.

Um jene Theorie zu überprüfen wird das Modell USLE kalkuliert und den tatsächlichen gemessenen Werten gegenübergestellt. Die USLE verfügt über keinerlei Kalibrierungsmöglichkeiten.

8. Das Erosionsmodell MUSLE, welches eine verbesserte Version der USLE darstellt, optimiert die von dem ursprünglichen Ansatz berechneten Abtragsmengen.

Da die USLE jedoch nicht pro Berechnung unterscheidet, wird als letzter Schritt der Analysen das Modell MUSLE verwendet. MUSLE ist eine modifizierte Version der

USLE und kann für jede einzelne Berechnung einen Wert kalkulieren. Diese Ergebnisse werden dann wiederum den Prognosen von PESERA gegenübergestellt. Anhand dieses Vergleichs können Aufschlüsse über die Grenzen bezüglich der globalen Anwendbarkeit der USLE/MUSLE-Modelle aufgezeigt und die Vorteile von PESERA hervorgehoben werden.

2. Bodenerosion

Die Bodenerosion stellt einen landschaftsformenden Prozess dar, der seit Millionen von Jahren stattfindet. Sie ist außerdem ein globales Problem, welches innerhalb weniger Jahre oder Monate die Fruchtbarkeit von Böden zerstören kann. Heute übersteigt die Abtragsrate die Bodenbildungsrate in weiten Teilen der Erde, was zu einer Marginalisierung der Bodenressourcen und des Produktionspotentials führt. Grund dafür ist der Mensch. Die zunehmende Population steigert die Nachfrage an Lebensmitteln, Unterkünften und auch der Lebensstandard erhöht sich. Daraus resultiert eine immer schnellere und weiter um sich greifende Ausbeutung des Bodens (Toy et al. 2002).

Man muss grundsätzlich zwischen natürlicher und beschleunigter Bodenerosion unterscheiden. Die natürliche Erosion findet unter ungestörten Umweltbedingungen statt. Ihre Abtragsraten werden als geologische Raten bezeichnet und übersteigen den Bodenbildungsbeitrag nicht.

Die beschleunigte Bodenerosion wird auch als anthropogene Erosion bezeichnet und findet unter gestörten Umweltbedingungen statt. Ein degradiertes Bodenprofil wo sich der B- oder C-Horizont an der Oberfläche befindet sowie Rillen und Gullies sind Beweise für beschleunigte Bodenerosion. Da diese Art der Bodenabtragung anthropogenen Ursprungs ist, kann sie auch vermieden werden. Durch angemessene Planung und effektive Durchführung von Praktiken zur Erosionskontrolle können solch anthropogene Raten stark reduziert werden.

2.1 Definitionen

„Durch Eingriffe des Menschen ermöglichte und durch auf die Geländeoberfläche aufprallende Regentropfen, durch fließendes Wasser oder durch den Wind ausgelöste Prozesse der Ablösung, des Transportes und der Ablagerung von Bodenpartikeln.“ (Bork 1988 zitiert nach Bork et al. 1998: S. 309)

Morgan (1980 zitiert nach Bork et al. 1998: S. 310) meint, dass *„Eingriffe des Menschen Bodenerosion nicht direkt auslösen können, sondern nur ermöglichen, verstärken, vermindern oder verhindern. In Abhängigkeit von den dominierenden Prozessen sind vor allem flächenhafte und linienhafte Bodenerosion zu unterscheiden.“*

Die Bodenerosion durch Wasser definiert Frielinghaus (1997 zitiert nach Bork et al. 1998: S. 310) als „*direkt durch Niederschlag oder durch Abfluss auf der Bodenoberfläche ausgelöste Bodenerosion. Bei Starkregen, bei langanhaltenden, mäßig starken bis extrem starken Niederschlägen oder bei Schneeschmelzen fließt der Anteil des Niederschlages, der die Bodenoberfläche erreicht hat und nicht in den Boden infiltrieren kann, bzw. das Schmelzwasser, das nicht infiltrieren kann, oberflächlich ab.*“

Der Prozess Bodenerosion kann durch verschiedene Faktoren wie Wasser und Wind ausgelöst werden. In den nachfolgenden Kapiteln wird ausschließlich auf die durch Wasser verursachte Bodenerosion eingegangen.

2.2 Ausmaß

Laut El-Swaify (1994) sind lediglich 22 Prozent der Erdoberfläche potentiell ertragreich. Das macht insgesamt eine Fläche von 3.278 Millionen Hektar aus. Dieser Anteil ist bezogen auf die Nahrungszufuhr für 97 Prozent der Weltbevölkerung verantwortlich. Im Hinblick auf die rasant wachsende Weltbevölkerung ist die fortschreitende Degradierung der Böden folglich ein ernstzunehmendes globales Problem. Besonders landwirtschaftlich oftmals sehr intensiv genutzte Gebiete weisen hohe Erosionsraten von 20 bis über 100 Tonnen pro Hektar auf.

Pimental et al. (1995) schätzen, dass Europa jährlich 17 Tonnen pro Hektar Bodenverlust in Kauf nehmen muss. Diese Approximationen sind allerdings mit Vorsicht zu betrachten, da einerseits enorme Extrapolationen stattfinden und andererseits intensive landwirtschaftliche Techniken nicht berücksichtigt werden.

Tab. 2.1: Ausmaß der durch menschliche Aktivität verursachten Bodenerosion in Mio. Hektar
Quelle: Oldeman 1994

	Leicht	Moderat	Stark	Extrem	Gesamt
Wasserosion	343	527	217	7	1094
Winderosion	269	254	24	2	549
Gesamt	612	781	241	9	1643

Tabelle 2.1 vergleicht das Ausmaß der Degradation verursacht durch Wasser und Wind. Die vier Abstufungen bedeuten laut Oldeman (1994) folgendes:

- Leicht: Etwas reduzierte Produktivität, die mit einfachen Methoden wiederherstellbar ist
- Moderat: Großer Produktivitätsverlust, der anhand struktureller Maßnahmen wie etwa Terrassierung rückgängig gemacht werden kann
- Stark: Das Ackerland kann nicht wieder auf das selbe Fruchtbarkeitslevel gebracht werden; Wiederherstellung erfordert teure Maßnahmen
- Extrem: Das Land ist nicht mehr rekonstruierbar

Insgesamt gehen jährlich schätzungsweise sechs Millionen Hektar Boden aufgrund von Degradation durch Erosion und aufgrund anderer Ursachen verloren (Pimental et al. 1993).

2.3 Einflussfaktoren der Bodenerosion

Verschiedene Umweltbedingungen bestimmen die Art beziehungsweise die Beträge der Erosion in einem bestimmten Gebiet. Diese Bedingungen bestehen aus vier Faktoren: Klima, Boden, Topographie und Landnutzung. Sie wirken sowohl unabhängig als auch interaktiv. In den folgenden Kapiteln werden diese Faktoren nun genauer betrachtet.

2.3.1 Klima

Das Klima beeinflusst die Bodenerosion in Form von Niederschlag. Erosion erfolgt durch das Einschlagen der Regentropfen auf den Boden. Die Erosivität des Niederschlags kann man anhand von verschiedenen Variablen beschreiben. Einige davon wären Niederschlagsmenge, kinetische Energie, Eigendynamik der Tropfen und Niederschlagsintensität.

Allgemeine Beobachtungen haben ergeben, dass die zwei wichtigsten Variablen Niederschlagsmenge und -intensität darstellen. Multipliziert ergeben die beiden eine Schätzung der totalen Erosivität eines Niederschlagsereignisses. Obwohl diese beiden Faktoren den größten Teil der Erosivität erfassen sollte eine zusätzliche Betrachtung der Regentropfengröße nicht unerwähnt bleiben. Je nach Größe wird eine bestimmte kinetische Energie erzeugt, welche, wenn sie in die Gleichung miteingebracht wird, ein noch präziseres Ergebnis liefern kann (Toy et al. 2002).

Die Art des Niederschlags, bestimmt durch die Temperatur, ist ebenfalls ausschlaggebend für die Erosivität. Schneefall ist nicht erosiv, währenddessen schwere Regenfälle extreme Abträge auslösen können (Toy et al. 2002).

Abbildung 2.1 demonstriert die Varianz der Erosivität in einem Kalenderjahr anhand mehrerer Standorte in den USA. Man erkennt je nach Lokalität unterschiedliche Erosivitätsspitzen zu verschiedenen Jahreszeiten. CA zum Beispiel, der kalifornische Standort, besitzt höchste Erosivität im Winter und im frühen Frühling, währenddessen der Standort in Wisconsin WI im Spätfrühling und im Sommer die größte Erosivität aufweist. Die Erosivität hängt eng mit der Vegetation zusammen. Wenn die größte Erosivität mit dem Zeitraum zusammenfällt, in dem der Boden am meisten den Regentropfen und dem Oberflächenabfluss ausgesetzt ist, ist auch die Erosion am größten (Toy et al. 2002).

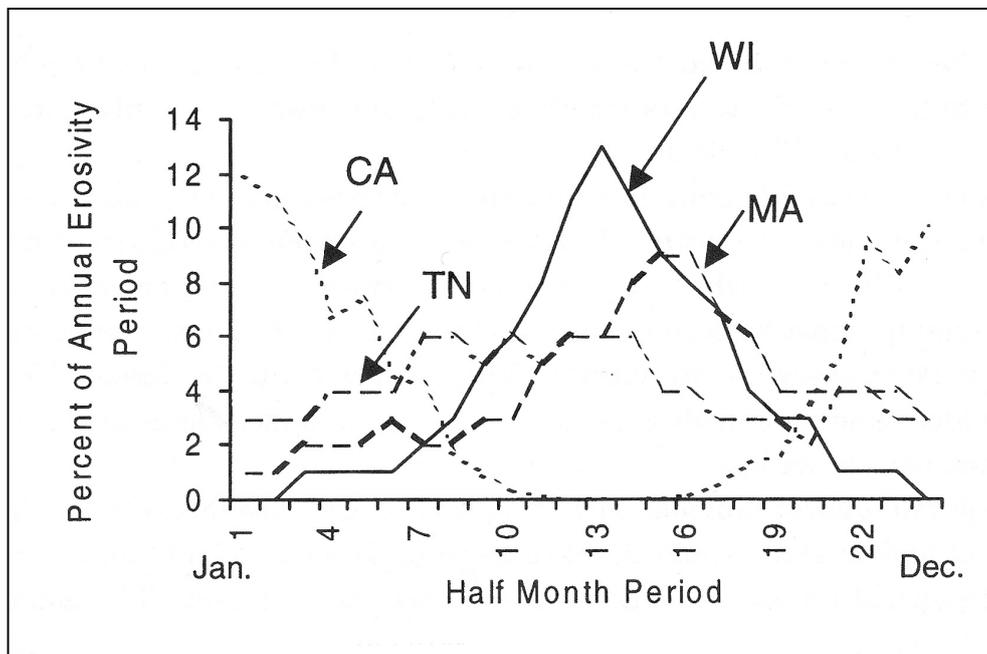


Abb. 2.1: Erosivität im Laufe eines Jahres anhand verschiedener Standorte in den USA
Quelle: Toy et al. 2002

2.3.2 Boden

Boden definiert man im Allgemeinen als loses Material, welches die Erdoberfläche umgibt, im Gegensatz zu Festgestein (Govers and Poesen 1986).

Der Einflussfaktor Boden besitzt viele Funktionen: Die Zufuhr von Nährstoffen an wachsende Pflanzen sowie ihre Unterstützung oder die Bereitstellung von Baumaterial. Er kann jedoch auch Sediment produzieren und dadurch Reservoirs auffüllen oder Chemikalien wie zum

Beispiel Dünger transportieren und dadurch die Wasserqualität in Flüssen und Seen mindern (Toy et al. 2002).

Der Faktor Boden ist aufgrund seiner unterschiedlichen Erodibilität wichtig für den Bodenabtrag. Erodibilität ist die Anfälligkeit des Bodens gegenüber erosiven Kräften wie zum Beispiel Wasser oder Wind. Ob ein Substrat anfällig ist hängt vor allem von Bodeneigenschaften wie Körnungsverhältnis, organischer Substanz oder Durchlässigkeit ab (Toy et al. 2002).

Abbildung 2.2 zeigt eine Messung für Bodenerodibilität, bei der alle anderen Effekte außer jenen der Bodeneigenschaften entfernt wurden. Auf der Testfläche befand sich keine Vegetation, das heißt, dass der Boden brach vorlag, und die Hangneigung konstant verlief. Der gesammelte Abtrag verkörpert die y-Achse und stellt eine Funktion der Erosivität dar. Der Winkel der Linie zeichnet eine empirische Messung der Erodibilität.

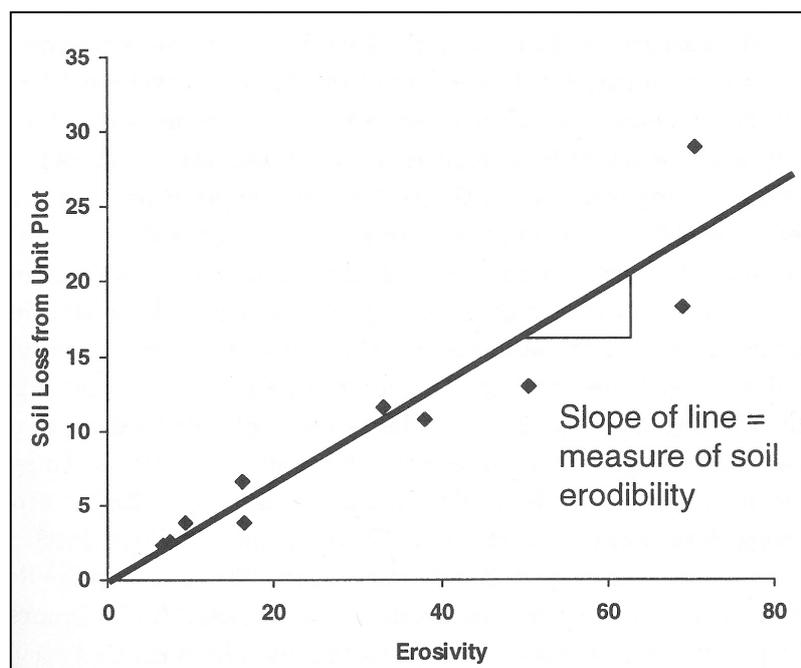


Abb. 2.2: Erodibilitätsbestimmung für Standardtestbedingungen
Quelle: Toy et al. 2002

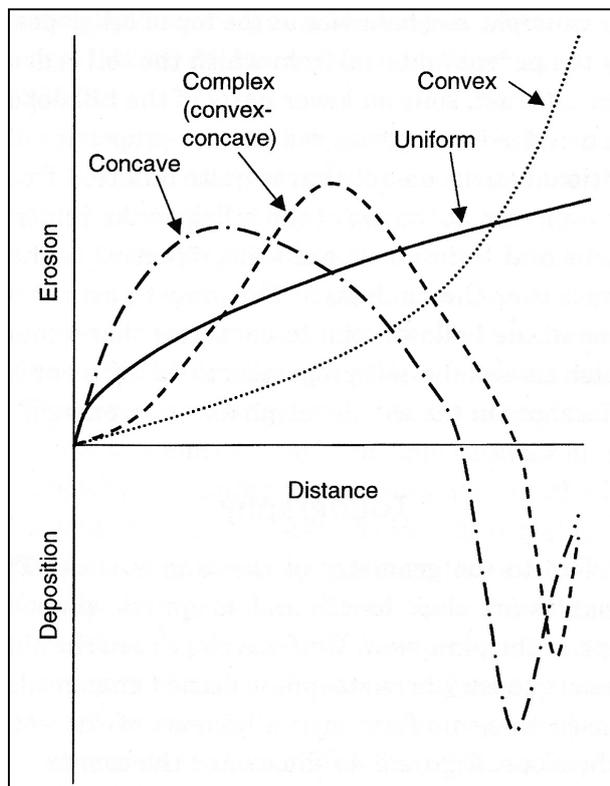
Böden mit hohem Tonanteil besitzen geringe Erodibilität da sie widerstandsfähig gegen Ablösung sind. Auch Böden mit hohen Anteilen an Sand sind wenig anfällig gegenüber Bodenerosion einerseits weil viel Regenenergie für die Ablösung notwendig wäre, andererseits da Sand eine hohe Infiltrationskapazität besitzt. Hingegen Böden mit mittlerer Korngröße wie etwa sehr schluffhaltige Substrate weisen die größten Erodibilitäten auf. Sie

produzieren erhöhten Abfluss, die Bodenpartikel können leicht abgelöst werden und das erodierte Sediment kann ohne Schwierigkeiten transportiert werden (Toy et al. 2002).

2.3.3 Topografie

Der Einflussfaktor Topografie beschreibt die Geometrie der Landschaft. Bezogen auf die Bodenerosion spielen vor allem Hangneigung und Hanglänge eine entscheidende Rolle. Je steiler und länger ein Hang ist desto größer sind die Abfluss- und Abtragsraten.

Hänge können, wie Abbildung 2.3 verdeutlicht, unterschiedlich geformt sein. Uniforme Hänge weisen stets die gleiche Hangneigung auf. Die Bodenabtragsraten werden mit zunehmender



Distanz geringer, Ablösung findet jedoch weiterhin statt. Es gibt allerdings auch Hänge die konvex oder konkav geformt sind. Bei konvexen Hängen nimmt die Neigung stetig zu. Je länger daher der Hang ist desto größer werden die Erosionsraten. Bei konkaven Formen ist es umgekehrt. Die Abtragsraten steigen weniger rasch mit zunehmender Länge bis sich der Prozess umkehrt, sie zu sinken beginnen und schließlich Deposition eintritt (Toy et al. 2002).

Abb. 2.3: Erosion und Deposition für Hangprofile
Quelle: Toy et al. 2002

2.3.4 Landnutzung

Laut Toy et al. (2002) hat die Landnutzung mehr Effekt auf Erosion als jeder andere der drei Faktoren. Die Art der Vegetation wird durch die Faktoren Klima und Boden festgelegt doch die Menge und Dichte derselbigen durch den Menschen.

Landnutzung kann eine vollkommen ungestörte Landschaft ohne jede menschliche Aktivität darstellen. Eine andere Art der Landnutzung kann Forstwirtschaft sein, wo eine Störung nur anhand von Abholzung und Wiederbewaldung stattfindet. Weidenutzung wäre eine weitere Form, bei der der Mensch zunehmend in die Natur eingreift (Toy et al. 2002).

Pflanzenbedeckung spielt für die Bodenerosion eine wesentliche Rolle. Besonders wichtig sind die Dichte der Vegetation, die Höhe der Bedeckung, die Blattform und die

Durchwurzelung. Je höher die Dichte der Bedeckung ist desto mehr wird der Boden vor Niederschlag geschützt. Die Wuchshöhe spielt dabei eine wesentliche Rolle. Wenn sich die Bedeckung nah genug an der Bodenoberfläche befindet, wird die Erosivität der Regentropfen, die auf der Bedeckung auftreffen, um vieles verringert und kann sogar komplett abgefangen werden (Toy et al. 2002).

Besitzt die Bodenbedeckung jedoch große Höhe, erreicht die Fallhöhe der Tropfen laut Chapman (1948) eine ähnlich hohe Erosivität als wenn keine Interzeption der Vegetation stattgefunden hätte.

Niederschlag, der von Blättern aufgefangen wurde, wird in seiner Geschwindigkeit gebremst. Das Wasser kann auch den Pflanzenstiel oder Stamm entlang laufen und wird dann als Stammabfluss bezeichnet. In diesem Fall ist die Ablösekraft der Regentropfen eliminiert worden. Zusätzlich kann Wasser auch verdunsten bevor es den Boden erreicht bzw. von der Pflanze aufgenommen werden und über den Stamm bzw. Stomata in den Boden transportiert werden (Toy et al. 2002).

Die Vegetationsdichte variiert während eines Jahres aufgrund der natürlichen Wachstumsprozesse. Eine maximale Erosionskontrolle kann erreicht werden wenn die optimalen Pflanzen ausgewählt und sie so behandelt werden, dass sie während der größten Regenperioden maximale Pflanzenbedeckung besitzen (Toy et al. 2002).

Ein weiterer Landnutzungsfaktor, welcher der Erosivität der Regentropfen entgegen wirken kann, ist laut Toy et al. (2002) die natürliche Oberflächenbedeckung. Sie definiert sich als Material, welches in direktem Kontakt zum Boden ist und denselbigen vor Tropfeneinschlag schützt sowie den Oberflächenabfluss verringert.

Solche Oberflächenbedeckungen können Pflanzenreste wie zum Beispiel abgefallene Blätter, Ernterückstände, Strohmulch, künstlich fabrizierte Materialien, Gestein oder lebende Pflanzenteile sein, die die Bodenoberfläche berühren.

Abbildung 2.4 verdeutlicht jenen Einfluss. Der Effekt dieser Bodenbedeckungen variiert je nach Klima, Topografie und Bodenbedingungen. Ohne Pflanzen- beziehungsweise Bodenbedeckung tritt vermehrt Erosion auf. Landwirtschaftliche Bodenbearbeitung führt dazu, dass es im Jahr Perioden gibt wo der Ackerboden brach liegt. Außerdem entstehen Verdichtungen des Bodens und Fahrspuren durch landwirtschaftliche Maschinen (Toy et al. 2002).

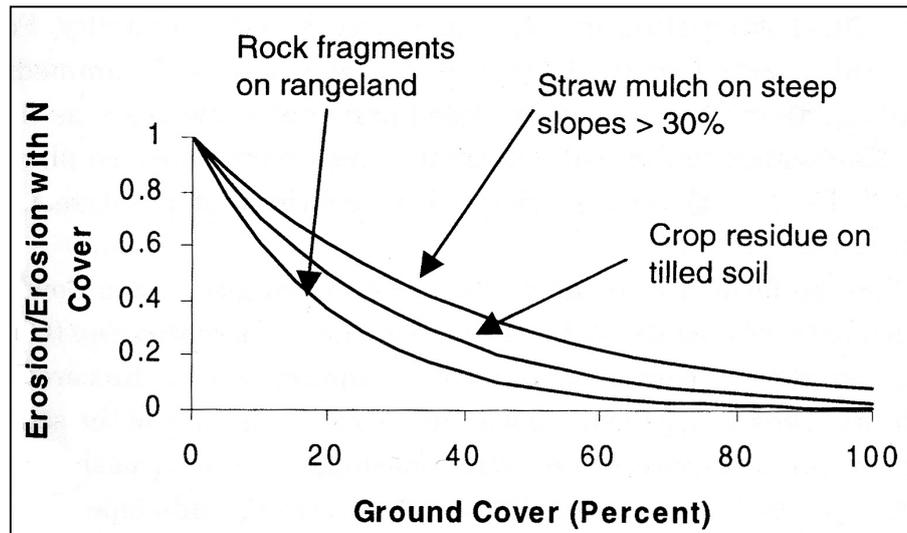


Abb. 2.4: Der Effekt von Bodenbedeckung auf Erosion bei Regentropfeneinschlag
Quelle: Toy et al. 2002

2.4 Prozesse

Morgan (2005) stellt Bodenerosion als einen 2-Phasen Prozess dar. Während des ersten Teils kommt es zur Ablösung einzelner Bodenpartikel vom Substrat. Der zweite Teil des Erosionsprozesses beinhaltet den Transport jener Bodenpartikel anhand erosiver Kräfte wie Wasser und Wind.

Die dritte Phase, welche nicht mehr unmittelbar zum Erosionsprozess gehört, ist die Ablagerung oder Deposition der Partikel.

2.4.1 Ablösung

Unter Ablösung versteht man die Trennung eines oder mehrerer Bodenpartikel vom Substrat.

„Rainsplash“ ist der wichtigste Ablöseprozess. Hierbei trifft ein Regentropfen auf die Oberfläche auf worauf hin Partikel in die Luft geschleudert werden und mehrere Zentimeter weit transportiert werden können. Wie viel bei diesem Prozess erodiert wird hängt von verschiedenen Faktoren wie etwa Regentropfengröße oder Regentropfengeschwindigkeit ab. Regentropfen können bei einem Durchmesser von einem Millimeter Aufprallgeschwindigkeiten von vier Metern pro Sekunde und bei fünf Millimeter Durchmesser etwa neun Millimeter pro Sekunde erreichen (Huang, Bradford and Cushman 1982).

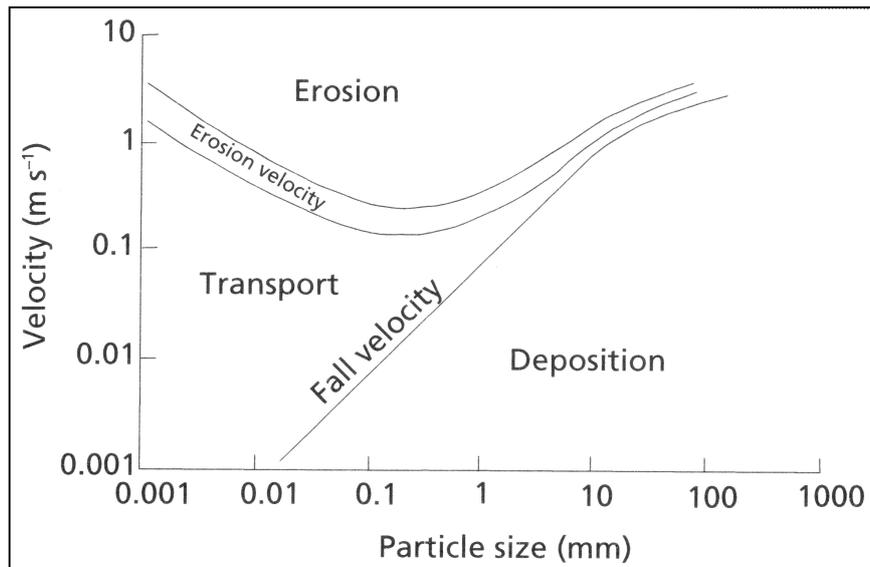


Abb. 2.5: Kritische Wassergeschwindigkeiten für Erosion, Transport und Deposition von Sediment als Funktion der Partikelgröße
Quelle: Hjulström 1935

Abbildung 2.5 zeigt wie die Fließgeschwindigkeit und die Partikelgröße miteinander in Zusammenhang stehen. Je größer die Partikel sind umso schneller muss auch der Oberflächenabfluss sein um die Partikel transportieren zu können. Ebenfalls ersichtlich ist, dass die Erosion nicht linear ansteigt. Man erkennt, dass besonders kleine und besonders große Partikel erst bei großer Geschwindigkeit mitgerissen werden. Die mittleren Größen erodieren bereits bei geringerem Tempo. Der Grund dafür ist, dass kleine Partikel aneinander besser haften und dem Wasser weniger Spielraum geben um eindringen zu können. Die größeren Partikel hingegen sind teilweise zu schwer um abgetragen zu werden. Die mittlere Korngröße hingegen weist keine dieser Tatsachen auf und ist daher am erosionsanfälligen (Morgan 2005).

Ist der Tropfen auf den Boden aufgetroffen beginnen zwei Kräfte zu wirken. Die eine ist eine konsolidierende Kraft, welche den Boden verdichtet. Es kommt zur Ausbildung einer, ein paar Millimeter dicken, Kruste. Die andere Kraft, die zur Geltung kommt wenn ein Regentropfen einschlägt, ist eine streuende Kraft. Sie schleudert Bodenpartikel in alle Richtungen was in Abbildung 2.6 verdeutlicht wird. Der auftreffende Wassertropfen kann laut Auerswald (1998) mit der hohen Fallgeschwindigkeit nicht infiltriert werden. Aus diesem Grund muss der Tropfen radial nach außen ausweichen. Große Scherspannungen werden erzeugt und nehmen zusätzliche Teilchen mit sich (Morgan 2005).

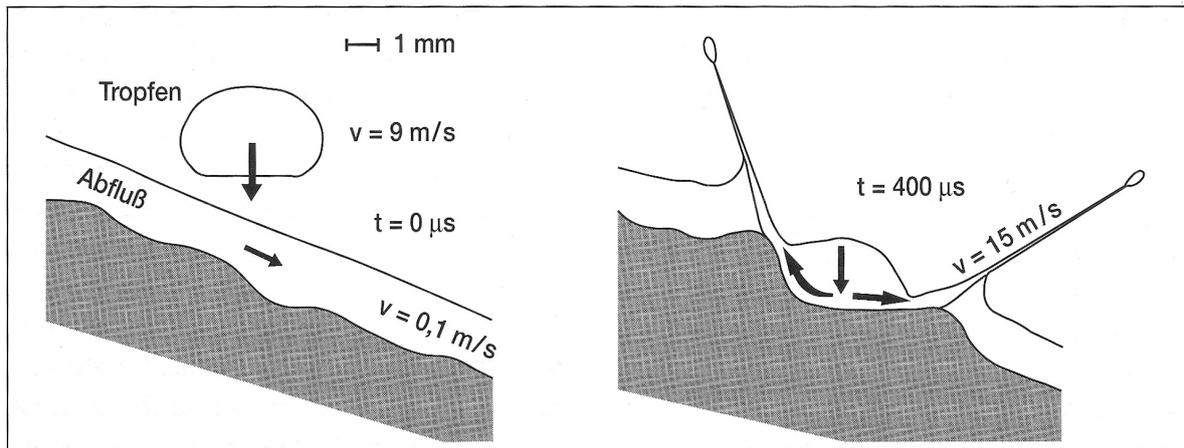


Abb. 2.6: Der „Splash-Effekt“ von Regentropfen
Quelle: Auerswald 1998

Entscheidend dafür ob Bodenpartikel abgelöst werden sind neben der Regentropfengröße und -geschwindigkeit, der eben angesprochenen Scherspannung auch die Textur des Bodens.

Böden mit grober, sandiger Textur sind resistenter gegen Ablösung aufgrund des Gewichts der Bodenteilchen. Feine, tonige Substrate weisen ebenfalls größeren Widerstand auf, da die Regenenergie erst die adhäsiven Kräfte, die zwischen den Mineralien wirken und sie zusammenhalten, überwinden muss. Schluffige und feinsandige Böden sind am leichtesten erodierbar (Morgan 2005).

Auch die Scherspannung beeinflusst die Ablösung von Bodenpartikeln. (Cruse & Larson 1977). Die Scherspannung ist geringer, je feuchter, also wassergesättigter, der Boden ist. Im Allgemeinen verringert sich die Ablösung exponentiell mit zunehmender Scherspannung (Al-Durrah & Bradford 1981).

Ein weiterer Ablöseprozess neben „Rainsplash“ stellt der Oberflächenabfluss dar. Auch er kann Bodenpartikel ablösen. Wichtigster Faktor hierbei ist die Fließgeschwindigkeit. Da der Boden einen bestimmten Widerstand erzeugt, muss die Geschwindigkeit einen gewissen Schwellenwert überschreiten. Abbildung 2.7 zeigt, dass ab einem Partikeldurchmesser von 0,2 Millimetern die kritische Schergeschwindigkeit mit der Partikelgröße ansteigt. Bei Bodenpartikeln mit zunehmend weniger Durchmesser muss ebenfalls die Geschwindigkeit wieder ansteigen, da gerade die feinen Partikel durch ihre Tonanteile Kohäsionskräfte besitzen, die Zusammenhalt geben. Eine Ausnahme gibt es dann, wenn diese Partikel bereits davor erodiert wurden und ihre kohäsiven Kräfte verloren haben. Dann reicht auch eine geringe Schergeschwindigkeit aus (Morgan 2005).

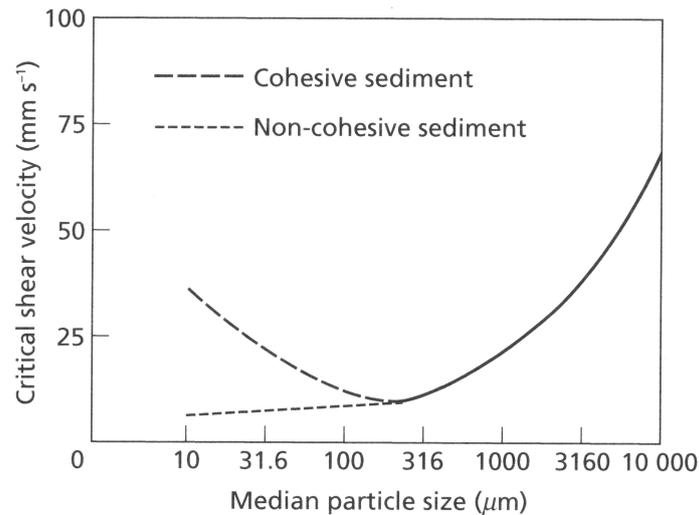


Abb. 2.7: Kritische Schergeschwindigkeit in turbulentem Abfluss für Bodenpartikelablösung als Funktion von Partikelgröße
Quelle: Savat 1982

2.4.2 Transport

Der zweite Teil des Erosionsprozesses stellt den Transport der abgelösten Bodenpartikel dar.

Wichtig sind hier vor allem zwei Arten von erosiven Kräften. Die einen wirken flächenhaft wie zum Beispiel der Oberflächenabfluss oder der „Rainsplash“. Letzterer vermag Teilchen jedoch nur wenige Zentimeter zu transportieren. Die anderen konzentrieren ihre Kräfte in Furchen. Sie transportieren Wasser in Rillen, Gullies oder Flussbetten (Morgan 2005).

Eine wichtige Rolle spielen vor allem die Intensität und die Dauer des Niederschlags sowie der Durchmesser und die Geschwindigkeit der Regentropfen, als auch die Textur, die Infiltrationskapazität und der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens (Morgan 2005).

Oberflächenabfluss, auch „Overland flow“ genannt, tritt während eines Niederschlagsereignisses auf, wenn der oberflächliche Muldenspeicher und der Feuchtegehalt oder die Infiltrationskapazität des Bodens überstiegen werden. Es kommt daraufhin zu einer Wasserschicht gleicher Tiefe, die sich den Hang abwärts bewegt. Auch beim Transport gibt es bezüglich der Textur eine Präferenzierung. Da „Rainsplash“ vorwiegend Partikel zwischen 0,063 und 0,250 Millimetern ablöst und auch der Oberflächenabfluss dazu neigt Teilchen zwischen 0,1 und 0,3 Millimetern abzulösen, beinhaltet das durch den Oberflächenabfluss zu transportierende Sediment nur eine geringe Menge an Partikeln größer als einen Millimeter. Der Hauptbestandteil ist also Feinmaterial. Diese Selektion durch die Ablösung und den Transport führt dazu, dass die erodierten Bereiche zunehmenden Sandanteil aufweisen. Die

Depositionsflächen wiederum beinhalten hauptsächlich toniges Material. Ein weiterer Grund für die zunehmende Versandung der erodierten Flächen ist die Tatsache, dass die Deposition ein Prozess ist, der sich nach der Größe der Partikel richtet. Außerdem wird der größte Teil des Sediments nach relativ kurzen Distanzen wieder abgelagert. Zuerst sind daher die sandigen, groben Anteile von Deposition betroffen, welche sogar eine Art Kruste bilden können. Dadurch ist weniger Feinmaterial der Erosion ausgesetzt (Morgan 2005).

Erosion kann sich jedoch neben dem flächenhaft wirkenden Prozess des Oberflächenabflusses auch in Furchen konzentrieren. Dadurch kommt es zur Ausbildung von Rillen, Gullies oder sogar Flussbetten.

Gründe für die Entstehung von Rillen (Abbildung 2.8) können höhere Abflüsse, steilere Hänge, unterschiedliche Bodenbeschaffenheit aber auch eine nicht einheitliche Verteilung



der Scherspannung des Abflusses sein. Sie besitzen meist eine Breite von wenigen Zentimetern. Stößt der Abfluss jedoch auf eine nicht erodierbare Bodenschicht verbreitert sich die Rille mit der Zeit, da sie sich nicht mehr vertiefen kann (Toy et al. 2002).

Abb. 2.8: Rillenerosion
Quelle: Universität Freiburg

Die Flächen zwischen den Rillen bezeichnet man als „Interrill Area“. Auch landwirtschaftliche Bodenbearbeitung kann dazu führen, dass Rillen entstehen. Diese können jedoch durch mechanische Bodenbearbeitung wieder beseitigt werden. Nach der Einebnung des Bodens sucht sich der Abfluss dann neue Pfade (Toy et al. 2002).

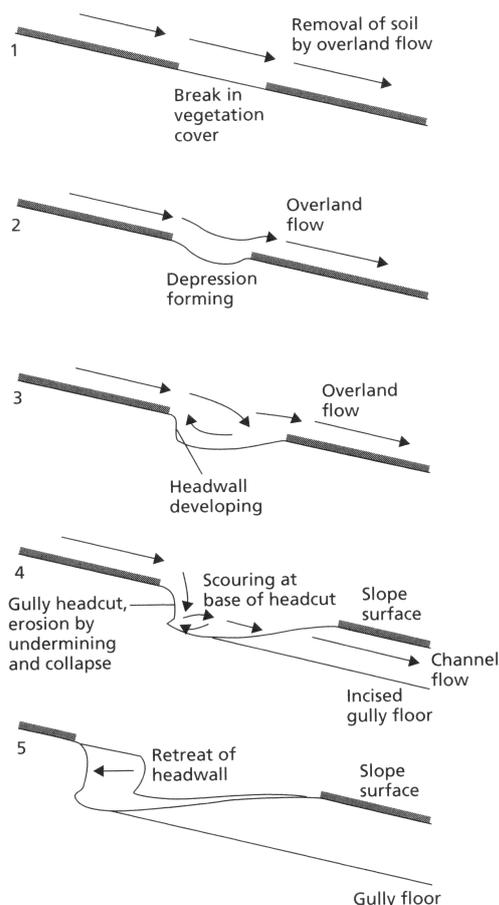


Abb. 2.9: Gullybildung an einem Hang
Quelle: Leopold, Wolman und Miller 1964

2.4.3 Deposition

Wie bereits erwähnt stellt die Sedimentation einen selektiven Prozess dar (Abbildung 2.10), welcher große und dichte Partikel zuerst ablagert. Deposition tritt auf, sobald die Fracht die Transportkapazität des Abflusses überschreitet. Die Rate der Ablagerung ist proportional zu der Differenz zwischen Transportkapazität und Sedimentfracht, Fließgeschwindigkeit, Höhe des Abflusses und der Fallgeschwindigkeit der Partikel (Toy et al. 2002).

Gullies sind im Gegensatz zu Rillen tiefer und breiter gestaltet. Sie besitzen einen Querschnitt von mehr als einem Quadratmeter (Poesen 1993).

Außerdem ist ihr Entstehungsprozess, wie Abbildung 2.9 zeigt, um einiges komplizierter. Einsenkungen entstehen aufgrund der Lockerung der Vegetationsdecke durch zum Beispiel Beweidung oder Feuer. In diesen Depressionen sammelt sich Niederschlagswasser, welches die einzelnen Mulden vergrößert bis sie sich schließlich vereinen und ein Gerinne bilden. Erosion setzt am Beginn der Vertiefung an, verlegt sich danach auf die Basis und vertieft dadurch das Gerinne. Außerdem kommt es zur Unterspülung am Beginn des Gullies, daraufhin zum Kollaps und zum Rückbau der Böschung hangaufwärts (Morgan 2005).

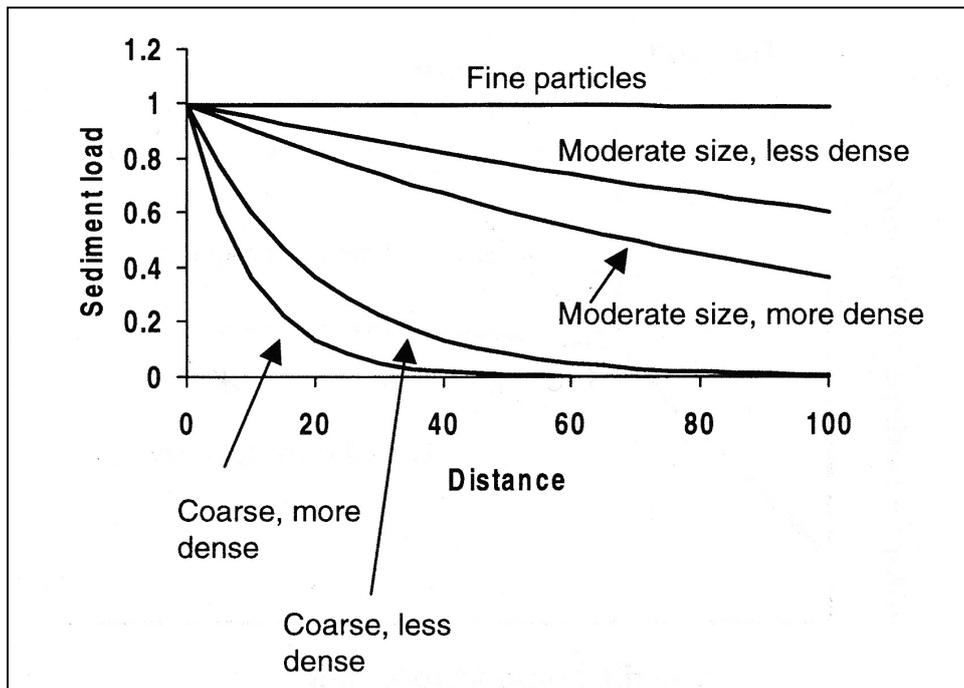


Abb. 2.10: Der selektive Prozess der Ablagerung der verschiedenen Partikelgrößen
Quelle: Toy et al. 2002

3. Modellierung von Bodenerosion

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen der Modellierung von Bodenerosion dargelegt werden. Einerseits geht es um Definitionen und Klassifikationsmöglichkeiten, andererseits wird auf die Wahl des richtigen Modells näher eingegangen.

3.1 Überblick und Definitionen

Messungen von Bodenabtrag sind wichtig für die Bestandsaufnahme von Erosion, für wissenschaftliche Forschungsarbeit und für die Entwicklung von Methoden zur Erosionseinschränkung. Jedoch ist mit Abtragungsmessungen jede Menge Aufwand hinsichtlich Kosten und Zeit verbunden. Um Bodenabträge, Ablagerungen und Sedimentfrachten leichter abschätzen zu können wurden verschiedene Modelle entwickelt, welche durch Input verschiedener Parameter Voraussagen treffen können.

Modelle sind im Allgemeinen abstrakte Abbilder der Wirklichkeit. Morgan (2005) bezeichnet Modelle als notwendige Vereinfachung der Realität.

Im Rahmen der Bodenerosion beinhalten die Modelle erosionsfördernde Einflussgrößen. Diese werden anhand mathematischer Funktionen in Beziehung gesetzt und eventuell mit Exponenten angenähert.

Welches Modell für eine Voraussage verwendet werden soll hängt von mehreren Faktoren ab. Entscheidend ist unter anderem ob sich die Vorhersage auf ein einzelnes Ereignis oder auf einen längeren Zeitraum wie etwa einen Monat, ein Jahr oder mehrere Jahre beziehen soll. Des Weiteren ist die Größe des Gebietes wichtig auf welchem der Abtrag prognostiziert wird. Hier reichen die Skalen von Plotgröße, über einzelne Hänge bis hin zu Einzugsgebieten von mehreren Quadratkilometern.

Generell gibt es verschiedene Anforderungen an Modelle. Einige davon wären Zuverlässigkeit, globale Anwendbarkeit, leichte Handhabung mit einem Minimum an Daten, umfangreiche Inkludierung aller Erosionsprozesse und die Möglichkeit Veränderungen in Bezug auf das Klima, die Landnutzung und die Schutzpraktiken in Betracht zu ziehen. Die Realität sieht jedoch anders aus, da viele dieser Anforderungen miteinander kollidieren (Morgan 2005).

3.2 Geschichte

Das Bewusstsein, dass Erosion ein weltweites Problem darstellt, kam ausgehend von den USA verstärkt in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts auf. Doch erst 1929 gelang es Bennett die Öffentlichkeit auf nationaler Ebene aufmerksam zu machen, dass Bodenerosion eine Bedrohung des Gemeinwohls darstelle. Daraufhin steckte die Regierung 160.000 US Dollar in die Erforschung der Ursachen von Erosion, sowie der Erhaltung und dem Schutz von Böden. Anhand dieses Fonds konnten mehrere Forschungsgebäude in den Vereinigten Staaten von Amerika errichtet werden, welche in den nachfolgenden zehn Jahren anhand von Plotexperimenten wichtige Daten sammelten (Lafren & Moldenhauer 2003).

Erst 1940 entwickelte Zingg die erste mathematische Gleichung zur Darstellung von Bodenverlust. Er baute sein Modell auf die Faktoren L für Hanglänge und S für Hangneigung auf (Renard et al. 1996).

Tabelle 3.1 zeigt die Erosionsgleichung von Zingg sowie die Erweiterungen in den nachfolgenden Jahren. Zingg verwendete neben den zwei Topographieparametern auch zwei Exponenten m und n, welchen er nach eingehenden Feldversuchen die Werte 1,4 beziehungsweise 0,6 zuordnete.

Tab. 3.1: Die Entwicklung der Erosionsgleichungen
Quelle: Lafren & Moldenhauer 2003

Zingg, 1940	$A = C' L^{0.6} S^{1.4}$
Smith, 1941	$A = C'' L^{0.6} S^{1.4} P$
Browning, 1947	$A = C''' L^{0.6} S^{1.4} P$
Musgrave, 1947	$A' = (P_{30}/1.25)^{1.75} K' (L/72)^{0.35} (S/10)^{1.35} C^*$
USLE, 1965	$A = EI_{30} K (L/72.6)^{0.5} (0.065 + .045 S + .0065 S^2) C P$
USLE, 1978	$A = EI_{30} K (L/72.6)^{0.5} (65.4 \sin^2\Theta + 4.56 \sin\Theta + 0.065) C P$
RUSLE, 1997	$A = EI_{30} K (L/72.6)^m (a \sin\Theta + b) C P$
<p>A – Soil loss in tons/acre A' – Soil loss in inches/year C', C'', C''' – Coefficients C* – vegetal cover factor P₃₀ – Maximum Precipitation amount (inches) falling in 30 minutes in a storm K', K – Soil erodibility factors L – Slope length in feet S – Slope in percent Θ – Slope angle in degrees C – Cropping management factor E – Storm rainfall energy in hundreds of foot-tons per acre I₃₀ – Maximum rainfall intensity in a 30 minute period within a storm in inches per hour P – Conservation practice factor M – Exponent on length term-values depend on slope or slope and rill/interrill ratio a, b – coefficients in function making up slope term – values depend on slope</p>	

Bereits 1941 erweiterte Smith das Konzept von Zingg um den Faktor P, welcher die Landnutzung repräsentieren sollte. Des Weiteren war er der Erste, der einen sogenannten „T-Value“ einführte. Dieser bezeichnet den maximal erlaubten Bodenverlust in Tonnen pro Morgen (Ein Morgen = 0,25 Hektar), basierend auf der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit (Laflen & Moldenhauer 2003).

Erst nach dem zweiten Weltkrieg im Jahre 1947 publizierten Musgrave et al. eine nochmals verbesserte empirische Erosionsgleichung, bei der die Wissenschaftler erstmals einen Erodibilitätsfaktor K sowie einen Erosivitätsfaktor P_{30} in Relation stellten. Dieser mathematische Ausdruck wurde als „Musgrave equation“ oder „Slope Practice equation“ bezeichnet. Die Messung der Erosivität beruht auf einer Korrelation von Erosion mit der maximalen Regenmenge in einer 30 Minuten Periode eines Ereignisses, erhöht um den Faktor 1,75 (Laflen & Moldenhauer 2003).

Dieses Modell wurde zirka zehn Jahre angewendet. Man erkannte, dass besonders der Erosivitätsfaktor der Gleichung nicht für die gesamte USA anwendbar war und dass Verbesserungen notwendig waren. 1958 wurde die „Musgrave equation“ daher von einem der bis heute erfolgreichsten empirischen Modelle abgelöst, der „Universal Soil Loss Equation“ (USLE) oder auch Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) genannt. Veröffentlicht wurde sie schließlich 1965 von Wischmeier & Smith im Agricultural Handbook 282. Die USLE sollte insbesondere als Planungswerkzeug für Landwirte und Umweltplaner dienen. 1978 präsentierten Wischmeier & Smith eine Weiterentwicklung der ULSE, die vor allem durch jahrelange Experimente und Forschung eine Verbesserung der Methoden zur Parameterschätzung und der Anwendung des Modells einbrachte (Pudasaini 2003).

Von den späten 80ern bis in die 90er Jahre entstanden basierend auf der USLE in verschiedenen Staaten Modelle, die den spezifischen Anforderungen des dortigen Raumes entsprachen. So entstand beispielsweise das von Elwell 1981 entwickelte Modell SLEMSA für Südafrika oder der Ansatz INDEROSI, publiziert von Gnagey 1991 (Pudasaini 2003).

Neben der Entwicklung jener Modelle, die sich auf empirische und experimentelle Untersuchungen stützen, kam es ab den 70er Jahren zu einer zweiten Modellrichtung. Ausschlaggebend dafür waren Meyer & Wischmeier, die 1969 den Erosionsprozess in vier Bereiche gliederten:

- Ablösung durch Regentropfen
- Transport durch Regentropfen
- Ablösung durch Oberflächenabfluss
- Transport durch Oberflächenabfluss

Sie hatten also erstmals zwischen Rillen und Interrillen unterschieden. Der Weg des Sediments im Untersuchungsgebiet war somit das Hauptaugenmerk.

Foster et al. entwickelten daraufhin in den USA 1980 das semi-empirische Modell CREAMS. In Europa entstand 1992 von Morgan et al. der Modellansatz EUROSEM.

Doch erst das Erosionsmodell WEPP, 1995 von Foster et al. publiziert, schien eine echte Alternative zur USLE zu sein. Es bietet ein weitreichendes Verständnis der Erosionsprozesse, ist sowohl klein- als auch großräumig anwendbar und funktioniert mit jeder Art von Landnutzung (Pudasaini 2003).

3.3 Modelltypen und ihre Anwendungen

Es gibt verschiedene Arten, Modelle in bestimmte Klassen einzuteilen. Die hier verwendete Klassifikationsmethode stammt von Gregory & Walling (1973) und unterscheidet empirische, physikalisch basierende und stochastische Modelle.

Die erste Gruppe dieser Modelle umfasst die empirischen Ansätze. Sie basieren auf gesicherten statistischen Beziehungen zwischen Variablen und werden in black-box-, grey-box- und white-box-Modelle unterteilt.

Bei black-box-Modellen sind lediglich Input- und Outputvariablen bekannt. Es gibt keinerlei Details über die Wirkungsweisen des Systems. Morgan (1999) nennt als einfaches Beispiel für ein Erosionsmodell den Sedimentverlust, den er mit Regen bzw. Abfluss in Beziehung setzt. Der große Nachteil an solch einem Modell ist, dass nicht erklärt wird warum Erosion stattfindet.

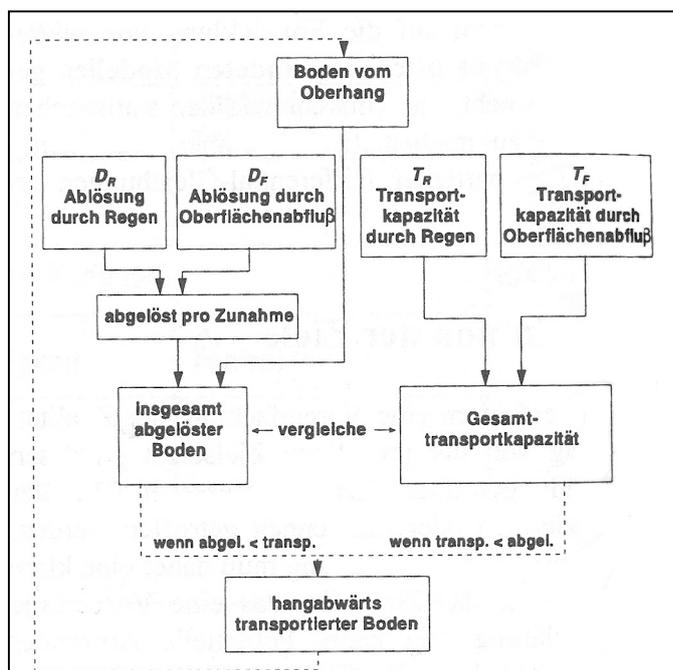
Die grey-box-Modelle hingegen zeigen bereits einige Details der Wirkungsweise. Sie basieren laut Morgan (1999) auf dem Festlegen der wichtigsten Faktoren und auf der Ermittlung ihrer Verbindung zum Bodenverlust. Seiner Meinung nach äußern sie sich in Form einer Regressionsgleichung, welche die Beziehung zwischen Sedimentverlust und einer großen Anzahl an Variablen, wie etwa Hangneigung und -länge oder Erodibilität, ausdrückt.

Die dritte Untergruppe der empirischen Modelle umfasst die sogenannten white-box-Modelle. Hierbei sind alle Einzelheiten und ihre Wirkungsweisen genauestens bekannt (Morgan 1999).

Einige sehr bekannte empirische Erosionsmodelle sind die USLE (Universal Soil Loss Equation) mit ihren Modifikationen RUSLE sowie MUSLE, oder etwa das MMF-Modell (Morgan, Morgan und Finney Modell).

Neben den empirischen Modellen unterscheiden Gregory & Walling (1973) außerdem noch physikalisch basierende Ansätze. Die Bedeutung jener Modelle wird zukünftig immer größer, da in den letzten Jahrzehnten eindeutige Fortschritte im Wissen um Erosionsprozesse erzielt wurden. Gregory & Walling (1973) definieren Ansätze auf physikalischer Basis als Modelle, die auf mathematischen Gleichungen zur Beschreibung der Prozesse beruhen. Berücksichtigt werden die Gesetze zur Erhaltung von Masse und Energie.

Mit physikalisch basierenden Ansätzen ist es also, im Gegensatz zu den empirischen Modellen, möglich die räumliche Verteilung von Sediment und Abfluss während Starkregenereignissen zu prognostizieren.



Statt einer Regressionsgleichung verwenden diese Modelle eine spezielle Differentialgleichung, meistens eine Kontinuitätsgleichung, die laut Morgan (1999) die Erhaltung eines Stoffes über Raum und Zeit ausdrückt.

Abb. 3.1: Flussdiagramm für das Modell der Wassererosionsprozesse
Quelle: Meyer & Wischmeier 1969

Er meint außerdem, dass das Meyer & Wischmeyer-Schema (siehe Abbildung 3.1) der Ursprung von fast allen physikalisch basierenden Erosionsmodellen darstellt. Solch eine Betrachtung macht es möglich, die Systemstruktur, die Variablen, die Flüsse und Interaktionen zu definieren.

Vorteile dieses Ansatzes sind laut Bodenerosionsplattform (Thüringer Landesanstalt für LW 2009), dass sie eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung erlauben. Sie ermöglichen meist die Kalkulation des Bodenverlustes und der Deposition, sowie der Gewässerbelastung durch Feststoffe und sind oft räumlich übertragbar. Nachteile hingegen sind die meist große Anzahl von Eingangsparametern und deren aufwändige Erfassung. Außerdem stellen sie hohe Anforderungen hinsichtlich der Datendichte und es ergibt sich zumeist sehr hoher rechentechnischer Aufwand.

Bekanntere physikalisch basierende Modelle sind zum Beispiel EUROSEM, WEPP oder CREAMS.

Der letzte der drei großen Ansätze umfasst das stochastische Modell. Es basiert laut Gregory & Walling (1973) auf künstliche Datenfolgen, die anhand von statistischen Kennwerten bestehender Probedaten entwickelt wurden. Dadurch ist es möglich, dass mit einer geringen Menge an Daten Eingangsparameter für Modelle erstellt werden.

3.4 Wahl des Modells

Für die Auswahl eines bestimmten Modells sind laut Toy et al. (2002) mehrere Schritte notwendig. Zuerst ist es essentiell, zu wissen wie ein Modell funktioniert, welche Eingangsdaten benötigt werden und welche Daten tatsächlich vorhanden sind. Des Weiteren muss eruiert werden wie hoch die Ressourcen (Ausgaben für Installation, Sammlung von Daten, Interpretation der Ergebnisse) für die Modellierung sind und ob Alternativen weniger kostenintensiv wären. Als dritter Schritt muss geklärt werden welche Modelle es gibt und welches man schließlich auswählt.

Toy et al. (2002) sind der Ansicht, dass die Wahl eines Modells immer ein Kompromiss ist, da nie alle gewünschten Anforderungen exakt erfüllt werden können. Für ihn sind Faktoren wie Einfachheit in der Anwendung, verfügbare Eingangsdaten und Anerkennung des Modells von wissenschaftlichen Arbeitsgruppen wesentliche Punkte. Auch Genauigkeit stellt eine wichtige Anforderung an ein Modell dar, es muss allerdings abgeschätzt werden ob eine erhöhte Genauigkeit die dadurch ebenfalls angestiegenen Kosten rechtfertigt. Zwei wichtige Faktoren bei der Wahl sind die Fragen ob es ein breites Anwenderspektrum gibt und seit wann das Modell in Verwendung ist, denn je mehr und je länger der Ansatz in Gebrauch ist desto größer sind die Erfahrungswerte um eventuelle Fehlerquellen zu beseitigen.

3.5 PESERA

In dieser Arbeit wurde nach reiflicher Überlegung ein Modell ausgesucht welches noch relativ unbekannt, jedoch sehr vielversprechend wirkt und vor allem für Europa in Zukunft enorm an Bedeutung gewinnen wird, da die derzeit im Entwurfsstadium befindliche EU-Bodenrahmenrichtlinie die Ausweisung von erosionsgefährdeten Flächen mittels Anwendung von Erosionsmodellen vorschlägt. Eines der möglichen Modelle für solch eine Ausweisung ist das Modell PESERA. Ein Modell, das 2004 im Rahmen einer europäischen Forschungskoooperation entwickelt wurde und einen prozessbasierenden Ansatz darstellt.

Österreich hat eine Reihe von Berichtspflichten, die international zu erfüllen sind. Unter anderem eben auch die sich derzeit im Entwicklungsstadium befindliche EU-Bodenrahmenrichtlinie. Das Problem ist allerdings, dass es bisher keine ausreichende Validierung für PESERA gibt. Es fehlt eine Überprüfung der einzelnen Parameter mit Messdaten.

Ein Kritikpunkt besteht zwar darin, dass dieses Modell eigentlich nur großflächig und für längere Zeiträume angewandt werden soll, eine Validierung jedoch nur kleinräumig, meistens auf Plotskala, stattfinden kann.

4. Modellaufbau

In diesem Kapitel soll der Aufbau des Modells PESERA, also das Konzept, seine Parameter und bisher durchgeführte Validierungen beschrieben werden. Des Weiteren werden die Eckpfeiler der beiden Modelle USLE und MUSLE angerissen, die ebenfalls in die Analyse von PESERA miteinbezogen werden.

4.1 Modellkonzept

Das Erosionsmodell PESERA (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment) wurde 2004 von Kirkby et al. entwickelt. Es basiert auf frühere theoretische Arbeiten von de Ploey et al. (1991) und Kirkby & Cox (1995), welche im Rahmen der EU-Projekte MEDALUS (1994-1997), MoDeM (1998-1999), PESERA (2000-2004) und DESERT-LINKS (2001-2005) entstanden sind.

PESERA stellt einen prozessbasierten räumlich verteilten Ansatz dar, der auf physikalische Grundlagen beruht. Das Modell ist bis heute das Einzige, das europaweit Schätzungen von Bodenerosion durch Wasser anhand eines abgeglichenen Ansatzes und mit Standarddatensätzen liefert. PESERA ist in der Lage zwischen Gebieten mit erhöhter und tolerierbarer Degradation zu unterscheiden sowie „Hotspots“ zu identifizieren. Es quantifiziert für besonders sensible Regionen Erosionsraten in Tonnen pro Hektar und schlägt Bodenhaltungsstrategien vor. Derzeit wird das Modell mit einer Auflösung von einem Kilometer, mit Ausnahme einiger Flächen für die keine Daten vorhanden sind, für ganz Europa angewendet (Kirkby et al. 2004).

Das Modell integriert die Faktoren Klima, Boden und Topographie in einer einzigen Gleichung für Abfluss und Erosion.

Das Konzept des Erosionsmodells PESERA wird in drei Phasen unterteilt. Zu diesem Thema kann der Artikel „PESERA RDI Model“ von Kirkby und Irvine (2001) herangezogen werden, welcher wichtige Aussagen liefert, die im Folgenden dargestellt werden.

1. Ein Modell für den Speichergrenzwert von Wasser um die Menge an täglichem Regen in täglichen Oberflächenabfluss umzurechnen.

2. Ein Potenzgesetz zur Kalkulation des Sedimenttransports aus Abfluss und Hangneigung und zur Interpretation jenes Sedimenttransportes am Auslass als durchschnittlichen Bodenabtrag.
3. Integration der täglichen Erosionsraten mit täglichen Regenmengen über eine Häufigkeitsverteilung um langfristige durchschnittliche Erosionsraten zu erhalten.

Phase 1: Das Speichergrenzwertmodell

Während diesem Abschnitt werden tägliche Regenmengen zu täglichem Oberflächenabfluss konvertiert. Als Werkzeug dazu dient der sogenannte Speichergrenzwert. Er ist von vielen Faktoren abhängig. Einerseits spielen Bodenparameter wie etwa Textur, Tiefe oder organisches Material eine Rolle. Aber auch das Vorhandensein von Vegetation, vor allem der Kronenschluss, ist entscheidend, da bei fehlender Bewachsung der Boden eher zur Verkrustung neigt. Des Weiteren sind der Bodenfeuchtegehalt oder die Bodenbearbeitung durch Ackerbau wichtige Faktoren. Man gewichtet daher bewachsene und brachliegende Flächen zu jenem Speichergrenzwert.

Danach wird der Oberflächenabfluss errechnet indem man den Grenzwert von der Menge an Regen abzieht. Die nachfolgende Gleichung verdeutlicht die Kalkulation des tatsächlichen Oberflächenabflusses.

$$J = \sum_{r>h} p(r - h)$$

where the summation is made over all storms, r
which exceed the runoff threshold h
and p is the proportion of runoff above the threshold

Abb. 4.1: Kalkulation des tatsächlichen Oberflächenabflusses
Quelle: Kirkby und Irvine 2001

Zur Erlangung der Vegetation, welche wie bereits berichtet für den Speichergrenzwert wesentlich ist, wird das Modell zusätzlich mit einem Vegetationswachstumsmodell verknüpft, um jahreszeitliche Änderungen bezüglich Biomasse darstellen zu können. Alternativ kann die Vegetationsbedeckung anhand von Fernerkundung erlangt werden. Vorteile des alternativen Ansatzes wären die Einbringung zusätzlicher Faktoren wie etwa Beweidungsintensität oder Brandrodung in das Modell. Allerdings fehlt dann die Möglichkeit zur Entwicklung von Szenarien, welche mit dem Vegetationswachstumsmodell durchaus machbar wären.

Um das Modell für ganz Europa anwendbar zu machen wurde für gefrorene und schneebedeckte Böden im Laufe des Entwicklungsprozesses ein zusätzlicher Faktor in die Gleichung eingebaut.

Phase 2: Potenzgesetz für Sedimenttransport

Das Potenzgesetz berechnet den täglichen Sedimenttransport folgendermaßen:

$$\text{Sediment Transport} = \text{Erodibility} \times (\text{Runoff} \times \text{Distance from divide})^2 \times \text{Gradient}$$

Abb. 4.2: Potenzgesetz des täglichen Sedimenttransportes

Quelle: Kirkby und Irvine 2001

Die Erodibilität wird hauptsächlich durch die Textur bestimmt, währenddessen der Gradient, also die Hangneigung, zum Beispiel anhand eines digitalen Höhenmodells ermittelt werden kann.

Für den Fall, dass der Sedimenttransport erst am Ende des Hangs gemessen wird, wird obige Gleichung als Sedimentbetrag folgendermaßen umgeschrieben:

$$\text{Sediment Yield} = \text{Modified Erodibility} \times \text{Runoff}^2 \times \text{Relief}$$

Abb. 4.3: Potenzgesetz für den täglichen Sedimentbetrag

Quelle: Kirkby und Irvine 2001

Die modifizierte Erodibilität enthält einen Korrekturfaktor im Relief, da die Hangneigung am Ende des Hangs nicht die gleiche ist, wie die durchschnittliche Gesamthangneigung.

Phase 3: Schätzung langfristiger durchschnittlicher Erosionsraten

In diesem Teilprozess wird durch eine Analyse historischer Zeitreihen für jedes Monat eine Häufigkeitsverteilung erstellt. In diese Untersuchung fließen die Anzahl an Regentage, die durchschnittliche Regenmenge pro Regentag und seine Standardabweichung mit ein.

Um schlussendlich langfristige durchschnittliche Raten zu erhalten, müssen der tägliche Abfluss und die tägliche Erosionsmenge für jedes mögliche Regenereignis in dieser Häufigkeitsverteilung gewichtet werden.

Das Hauptaugenmerk der in der Arbeit verwendeten Kalkulationen liegt demnach auf Phase 2, der Schätzung von Sedimentbeträgen am Ende der Plots. Die verwendete Formel lautet daher:

$$S = kq^m \Lambda^n$$

where k is the soil erodibility,

q is the overland flow discharge per unit width

Λ is local slope gradient

and m, n are empirical exponents in the range 0 - 2.

Abb. 4.4: Grundformel der Phase 2

Quelle: Kirkby und Irvine 2001

Jene Formel hat ihren Ursprung in der Musgrave Equation (Musgrave 1947).

Für die Berechnung von PESERA sind im Wesentlichen vier Datensätze nötig:

- Klima
- Vegetation
- Boden
- Topographie

Abbildung 4.5 zeigt jene Datensätze, welche Kirkby und Irvine (2001) für die Anwendung des Modells verwendet haben. Für das Klima, das durch den Faktor Abfluss repräsentiert wird, werden auf monatlicher Basis Regenparameter, Temperatur und Angaben über die potentielle Evapotranspiration benötigt.

Für die Berechnung des Bodenparameters braucht man Informationen über Boden-erodibilität, verfügbare Bodenwasserkapazität und Krustenbildung. Um die Landnutzung feststellen zu können sind entweder Fernerkundungsdaten oder die Anwendung eines Vegetationswachstumsmodells unabkömmlich. Zur Erlangung des topographischen Faktors wurde von Kirkby und Irvine (2001) ein digitales Höhenmodell (DGM) hinzugezogen.

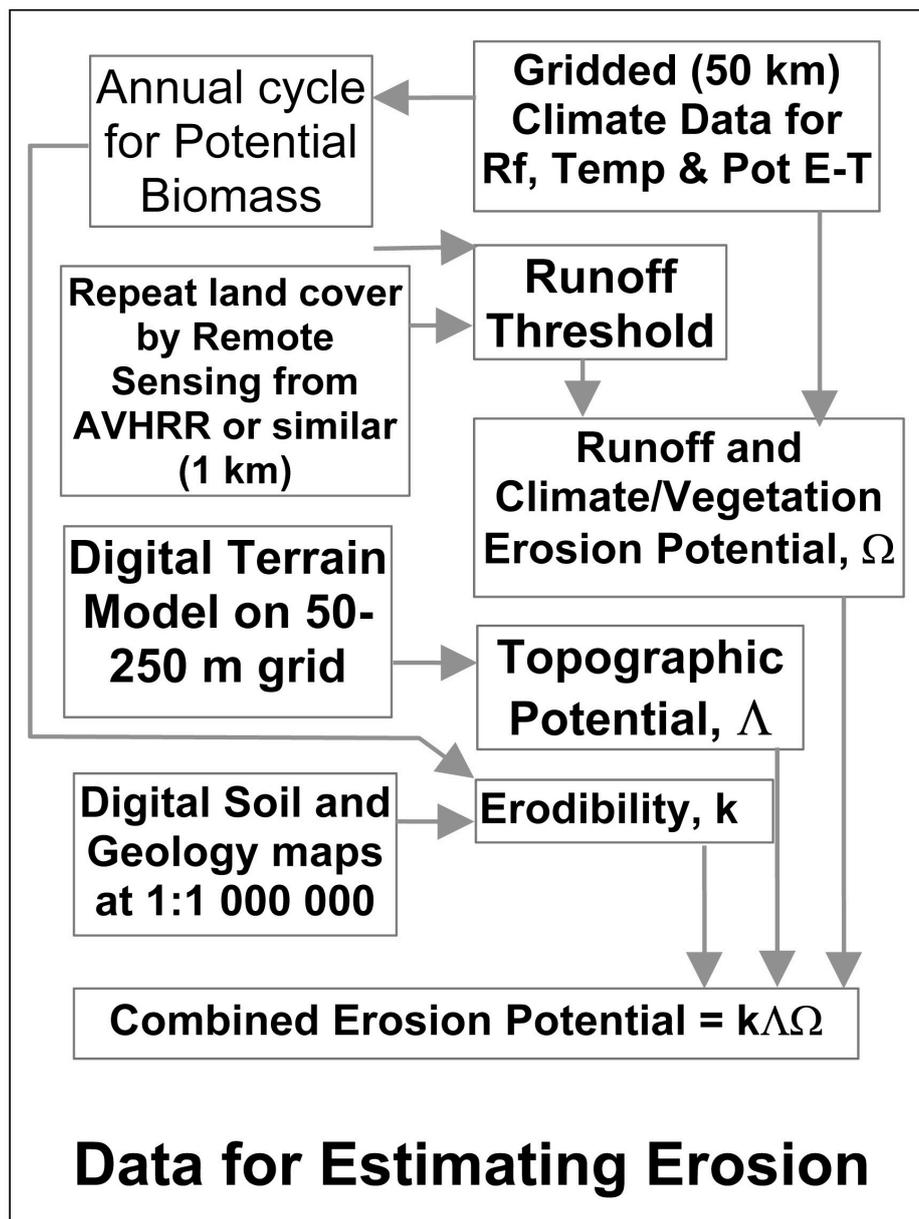


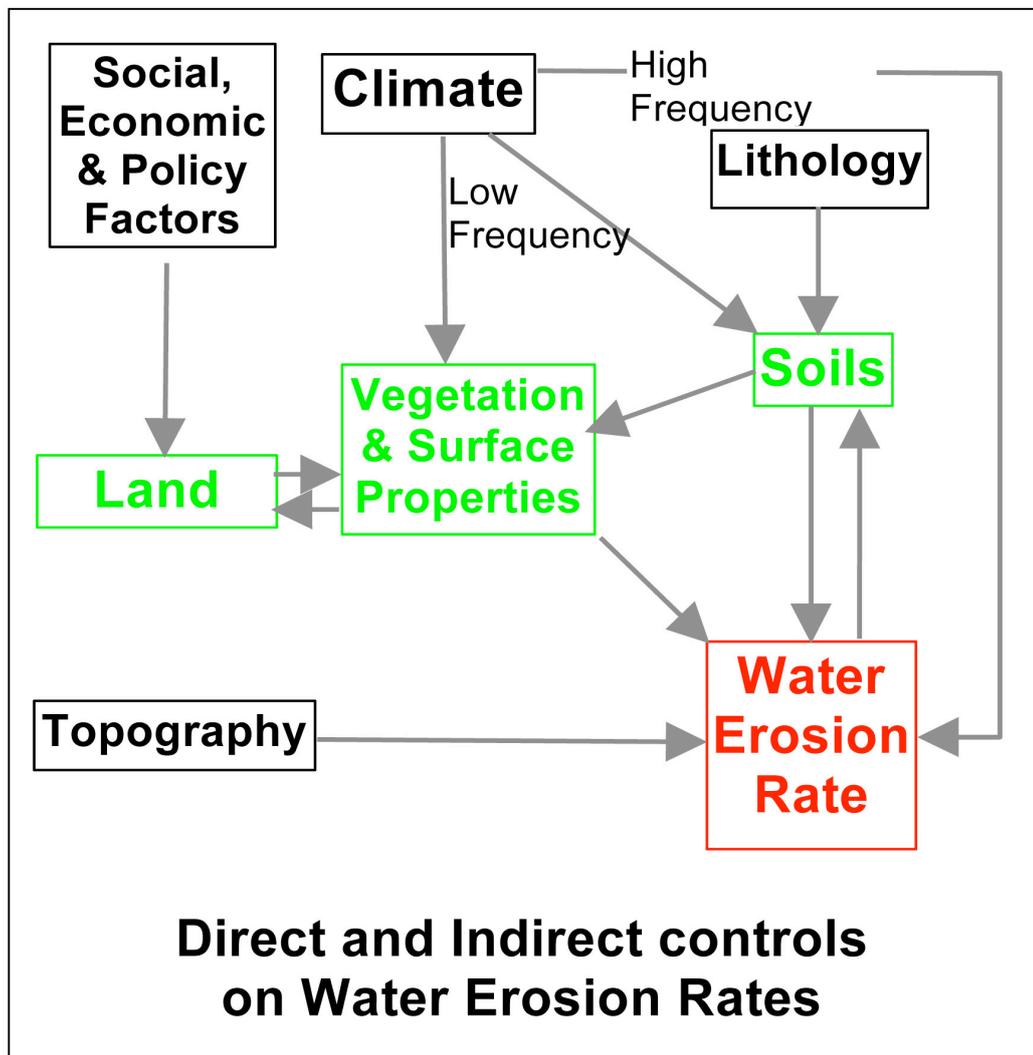
Abb. 4.5: Datensätze für das Modell PESERA
 Quelle: Kirkby und Irvine 2001

4.2 Parameter

Das Modell PESERA stützt sich im Wesentlichen auf vier Faktoren, die komplex aufgebaut sind und miteinander in Interaktion stehen. Jeder Faktor ist auf Indizes aufgebaut, welche zum Beispiel im Fall des Klimas die Saisonalität des Regens reflektieren.

Abbildung 4.6 verknüpft die vier Parameter in einem Flussdiagramm und zeigt ihre Interaktionen auf. Soziale, wirtschaftliche und politische Faktoren lenken die Landnutzung in eine bestimmte Richtung, welche selbst wiederum die Umwelt mitbeeinflusst. Der Boden

wird einerseits von der Lithologie, aber auch vom Klima gelenkt. Rückwirkend verändern ihn auch die auftretende Erosion.



*Abb. 4.6: Flussdiagramm der Parameter
Quelle: Kirkby und Irvine 2001*

4.2.1 Faktor Klima

Der Klimaparameter repräsentiert in der verwendeten Gleichung den Oberflächenabfluss. Im Fall der Datensammlung wurden die vom Bundesamt für Wasserwirtschaft erhaltenden Werte gleich direkt in die Gleichung eingesetzt. Bei vorhandener Vegetation müsste der Abfluss anhand eines Speichergrenzwertes bereinigt werden.

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen häufig und selten auftretenden Regenereignissen. Letztere legen den saisonalen Zyklus fest, indem sie den Bodenwasserhaushalt regulieren und somit das Pflanzenwachstum bestimmen. Oft vorkommende Regenfälle beeinflussen die

Erosionsraten direkt und sind für den Oberflächenabfluss verantwortlich. Die Berechnung erfolgt wie in Phase 1 erklärt anhand des Speichergrenzwertmodells.

Im Laufe der Entwicklung des Modells entdeckte man jedoch Schwächen bezüglich der Errechnung des Grenzwertes. Das Submodell berücksichtigte nicht den vorhergehenden Feuchtegehalt des Bodens. Darum errechnete das Modell für semi-arides Klima bessere Ergebnisse als für die feuchteren Gebiete Nordeuropas. Diesbezüglich wurden daher an dem Modell für diese Regionen spezielle Änderungen vorgenommen.

4.2.2 Faktor Vegetation

Der Faktor Vegetation fließt ebenfalls in den Oberflächenabfluss ein, da der Speichergrenzwert unter anderem von ihr beeinflusst wird.

Die Pflanzendecke wirkt auf zwei Arten. Einerseits führt sie zu einer Erhöhung des Grenzwertes, indem sie den Boden vor Regentropfeneinschlag und Verkrustung schützt sowie Regen abfängt, welcher teilweise verdunstet. Außerdem erhöht Vegetation den Anteil an organischem Material im Boden.

Andererseits beeinflusst die Pflanzendecke nicht nur den Grenzwert sondern auch die Erodibilität, da es zu einer Erhöhung der Oberflächenrauigkeit kommt, die wiederum die Fließgeschwindigkeit des Regens mindert. Des Weiteren bindet Vegetation anhand von Wurzelwerk die Bodenaggregate enger aneinander.

Wie bereits erwähnt kann der Faktor Vegetation entweder durch ein Vegetationswachstumsmodell oder durch Fernerkundungsdaten ermittelt werden.

Das Vegetationswachstumsmodell basiert auf Evapotranspiration und Wassernutzungseffizienz. Die Vorteile dieser Methode sind, dass sowohl organisches Material im Boden also auch Pflanzenbiomasse gleichzeitig berechnet werden können. Ein weiterer Pluspunkt ist die Nutzung jenes Ansatzes als Vorhersagemodell für Klima- und/oder Landnutzungsänderungen.

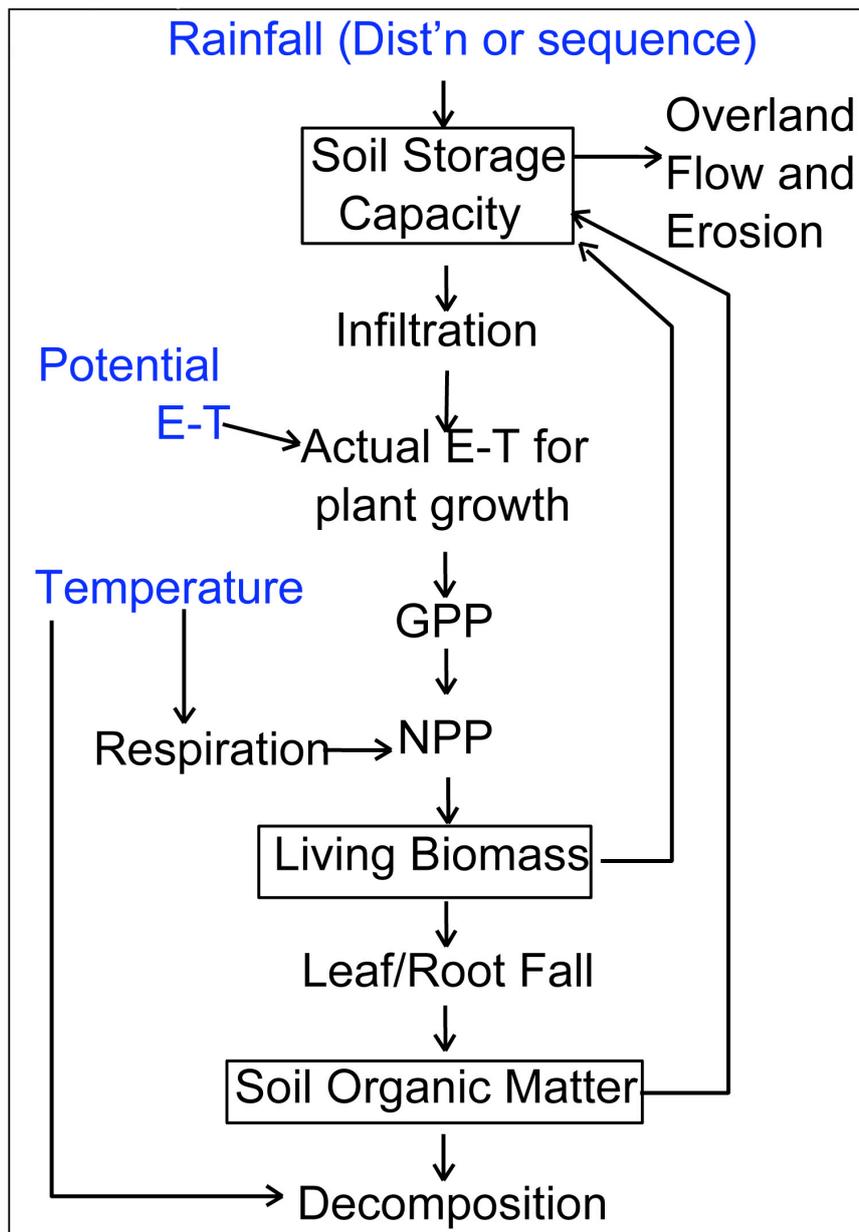


Abb. 4.7: Flussdiagramm des Vegetationswachstumsmodells
 Quelle: Kirkby und Irvine 2001

Abbildung 4.7 liefert eine schematische Darstellung des Wachstumsmodells. Die Bruttoprimärproduktion (GPP) wird anhand der aktuellen Evapotranspiration errechnet, wobei jene aktuelle Evapotranspiration wiederum durch den Niederschlag und der potentiellen Evapotranspiration ermittelt wird.

Anhand der Einbringung der Respiration, welche eine Funktion der Temperatur darstellt, erhält man danach die Nettoprimärproduktion. Wenn der Wert jener Nettoproduktion negativ ist, wird dies durch Laubabwurf angezeigt. Die abgeworfenen Blätter sind ein Teil der Biomasse und werden zur organischen Bodenmaterie hinzugezählt. Ein bestimmter, von der

Temperatur abhängiger, Anteil des organischen Bodenmaterials zersetzt sich, der erhaltene Teil trägt, wie die Biomasse, zur Bodenspeicherkapazität bei.

Um die Vegetation beziehungsweise Landnutzung klassifizieren zu können entwickelten Kirkby und Irvine (2001) im Laufe des Projekts eine eigene Klassifikation der Vegetationsbedeckung. Als Grundlage dafür diente die „CORINE landcover classification“.

4.2.3 Faktor Boden

Zur Kalkulation des Bodenparameters schlagen Kirkby und Irvine (2001) vor, USDA Kategorien oder die europäische Bodenklassifikation zu verwenden. Abbildung 4.8 stellt das Körnungsdreieck der USDA Bodenklassifikation dar. Sie verwendet dafür die drei Bodengrundfraktionen Sand, Schluff und Ton mit ihren Übergangstypen.

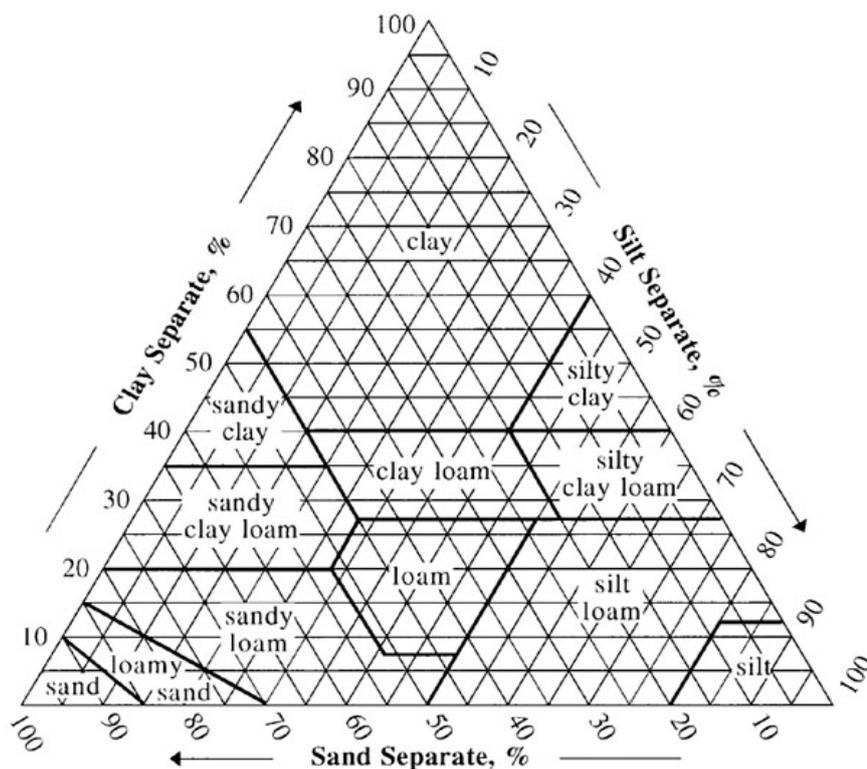


Abb. 4.8: Körnungsdreieck der USDA

Quelle: USDA 2009

Die wichtigste Bodeneigenschaft stellt die Erodibilität dar, welche in der verwendeten Gleichung den Faktor k angibt. Ebenfalls zu beachten ist der Erosionsgrenzwert, der die minimale Fließkraft angibt, die vorherrschen muss um Bodenabtrag auszulösen.

Die Erodibilität wird anhand der Bodentextur festgelegt. Die höchsten Werte scheinen bei feinsandigen und schluffigen Böden auf. Grobsandige Böden besitzen erhebliche Korngrößen, die schwerer erodierbar sind. Tonige Böden hingegen sind stabiler, da die feinen Bodenpartikel sich gut verdichten können und dadurch wenig Raum für das Eindringen von Wasser bieten.

Bestimmte Texturklassen werden, wie Tabelle 4.1 zeigt, gruppiert und zu fünf Bodentypen zusammengefasst. Jedem Typ wird dann ein bestimmter Erodibilitätswert zugeordnet. Diese Werte wurden empirisch von Kirkby und Irvine (2001) ermittelt.

Tab. 4.1: Klassifikation der Texturklassen zu Bodentypen und ihre Erodibilitätswerte
Quelle: Kirkby und Irvine 2001

Texturklasse	Bodentyp	Abkürzung	Erodibilitätsklasse	Wert
S, LS	Coarse	C	High	10
SL	Medium	M	Low	1
L, SiL, Si	Medium Fine	MF	High	10
SCL, CL, SiCL	Fine	F	Moderate	3
SC, C, SiC	Very Fine	VF	Low	1

Neben der Bodentextur spielt auch die Vegetation eine wichtige Rolle. Sie erhöht den Widerstand und reduziert die Fließgeschwindigkeit des Wassers. Des Weiteren führen organisches Bodenmaterial und hoher Tongehalt zu einer erhöhten Zahl an stabilen Bodenaggregate.

4.2.4 Faktor Topographie

Der Faktor der Topographie wird in der von mir angewendeten Gleichung mit „Lambda“ bezeichnet. Er beinhaltet den Indikator Hangneigung. Kirkby et al. (2004) ermittelten diesen Faktor aus einem digitalen Höhenmodell mit einer Auflösung von neun Meter. Da die in dieser Arbeit verwendeten Daten auf einer Plotgröße von zehn Quadratmetern beruhen, war kein DHM nötig. Die Hangneigung wurde vor Ort ermittelt.

4.3 Bisherige Validierungen

Unter einer Validierung versteht man die Überprüfung der vom Modell erhaltenen Daten mit realen Messwerten. Solche Überprüfungen sind grundsätzlich nur in kleinem Maßstab, meistens wird Plotgröße verwendet, möglich. Außerdem muss davor eine Kalibrierung, also Anpassung des Modells, an die dortigen Gegebenheiten erfolgen.

PESERA wurde bereits in verschiedenen Ländern Europas validiert. Teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse konnten erzielt werden.

2003 überprüften Van Rompaey et al. das Modell PESERA in Belgien, Tschechien, Spanien und Italien. Da als Maßstab große Einzugsgebiete verwendet wurden, griff man auf eine indirekte Validierungsmethode zurück, indem man die Erosionsraten aus Sedimentvolumina von Reservoirs ableitete. Für Belgien und der tschechischen Republik konnte PESERA relativ hohe Korrelationen mit Werten von 0,64 (Bestimmtheitsmaß) beziehungsweise 0,95 berechnen. Das heißt, dass die Tendenzen der beiden Werte für Belgien zu 64 Prozent und für Tschechien zu 95 Prozent in dieselbe Richtung gehen. Beim Vergleich der absoluten Werte zeigte PESERA schlechte Übereinstimmungen. Das Modell überschätzte die Ablagerungswerte für Belgien um den Faktor zwei. Die Ergebnisse für die tschechische Republik hingegen wurden von PESERA um das Vierfache unterschätzt.

Die Validierungen von Einzugsgebiete im mediterranen Spanien und Italien fielen generell schlecht aus. Eine Korrelation war mit den Koeffizienten von 0,04 für Spanien und 0,20 für Italien nicht vorhanden. Die absoluten Werte Italiens wurden von PESERA um den Faktor zwei unterschätzt. Eine mögliche Erklärung für die besonders schlechten Ergebnisse der beiden südeuropäischen Länder könnten wichtige Sedimenttransportprozesse sein, welche im Modell nicht enthalten sind. PESERA wurde entwickelt um Bodenabtrag anhand von Rillen- und Interrillenerosion zu berechnen. Der dominante Abtragsprozess in mediterranen Ländern stellt jedoch Gullyerosion dar.

Weitere Gründe für das allgemein schlechte Abschneiden von PESERA könnte die indirekte Validierungsmethode oder die niedrige Auflösung der Eingangsdaten sein (Van Rompaey et al. 2003).

Auch in Frankreich und Griechenland wurde das Modell PESERA validiert, jedoch hier im regionalen Maßstab. Frankreich verwendete als Basis für den Vergleich eine Erosionsgefährdungskarte der Region Normandie, die im Laufe von Projekten erstellt wurde. Jene Karte wurde selbst zur Genüge mit Messdaten verglichen, so dass sie nun ihrerseits als Validierungsgrundlage verwendet werden konnte. Ergebnisse jener Überprüfung zeigten eine weiträumige Unterschätzung von PESERA. Sie wurde zwar durch Anwendung hoch auflösender Daten verringert, bestand aber weiterhin, vor allem für die Werte im Frühling und Sommer. Verantwortlich hierfür war hauptsächlich die schlechte Qualität der meteorologischen Daten (Bissonnais & Daroussin 2003).

In Griechenland wurde die Insel Lesbos validiert. Auch hier wurde zum Vergleich eine, im Rahmen des Projekts MEDALUS III erstellte, Erosionsgefährdungskarte herangezogen. Da die Karte den Grad der Gefährdung darstellt, wurden auch die von PESERA erhaltenen

Werte in fünf Risikoklassen eingeteilt. Die Ergebnisse, wie in Abbildung 4.9 und 4.10 ersichtlich, zeigten viele Ähnlichkeiten wie etwa die Tatsache, dass beide den größten Anteil, nämlich ca. 50 Prozent, der Fläche der moderaten Erosionsklasse zuwies. Diskrepanzen zeichneten sich in der Klasse der schwersten Erosionsgefährdung ab. Dort überschätzte PESERA die Karte, da das Modell 13,3 Prozent mehr Fläche in jene Klasse einteilte. Die Kategorien „leichte und schwere Gefährdung“ wurden wiederum etwas unterschätzt.

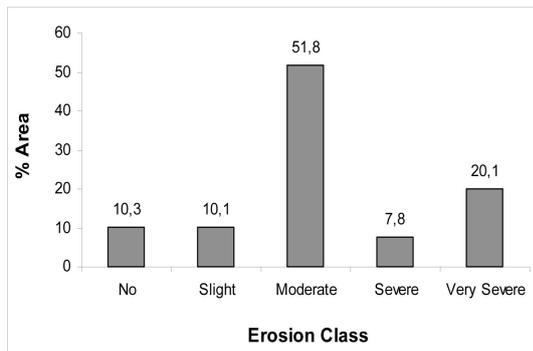


Abb. 4.9: Erosionsgefährdungskarte MEDALUS III

Quelle: Kosmas, Kosmopoulou & Tsara 2003

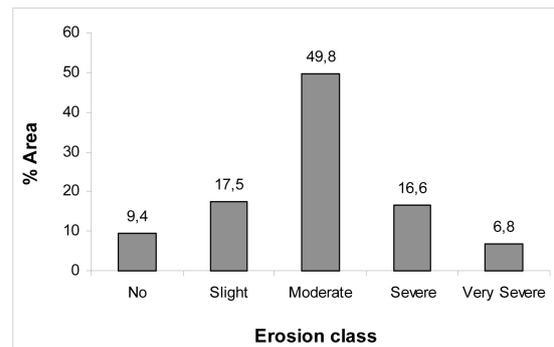


Abb. 4.10: Berechnungen von PESERA

Quelle: Kosmas, Kosmopoulou & Tsara 2003

Die Mitarbeiter des Projektes von Lesbos waren mit den Ergebnissen im Allgemeinen recht zufrieden. Sie nannten eine angemessene Datenbasis als Grundvoraussetzung für den Erfolg (Kosmas, Kosmopoulou & Tsara 2003).

4.4 USLE und MUSLE

Da im Rahmen dieser Diplomarbeit die von PESERA ermittelten Ergebnisse mit den empirischen Erosionsmodellen USLE und MUSLE verglichen wurden, soll an dieser Stelle kurz auf ihre Funktionsweisen und Parameter eingegangen werden.

4.4.1 USLE

Die USLE beziehungsweise ABAG wurde 1965 in den USA von Wischmeier & Smith entwickelt und 1978 verbessert. Sie stellt ein empirisches Vorhersagemodell dar, welches durchschnittliche jährliche Raten für Hänge berechnet.

Die USLE baut auf folgender Grundgleichung auf:

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

wobei:

A = Durchschnittlicher langjähriger Bodenabtrag in Tonnen pro Hektar

R = Regen- und Oberflächenabflussfaktor

K = Bodenerodierbarkeitsfaktor

L = Hanglängenfaktor

S = Hangneigungsfaktor

C = Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor

P = Erosionsschutzfaktor

Quelle: Wischmeier & Smith 1978

Ein großer Vorteil der USLE ist die Repräsentation der einzelnen Parameter durch einen einzigen Wert. Dadurch wird die Berechnung enorm vereinfacht. Des Weiteren ist das Modell in der Lage, für verschiedenste Kombinationen an Bedingungen die Raten zu errechnen. Dies ist wichtig um erkennen zu können ob die Toleranzgrenze überschritten wird (Schwertmann, Vogl und Kainz 1987).

Der Faktor R, also jener Parameter der die Erosivität beschreibt, ergibt sich im Falle der USLE aus dem Produkt der aufsummierten Flächendichte der kinetischen Energie eines erosiven Niederschlags und seiner maximalen 30-Minuten-Intensität (Schwertmann, Vogl und Kainz 1987).

Jener Parameter K, welcher die Erodierbarkeit des Bodens darstellt, wird anhand folgender Datensätze ermittelt:

- Gehalt (%) an der Korngröße 0,002 - 0,1 Millimeter (Schluff plus Feinstsand)
- Gehalt (%) an der Korngröße 0,1 Millimeter (Sand abzüglich Feinstsand)
- Gehalt (%) an organischer Substanz
- Aggregatklasse
- Durchlässigkeitsklasse

Anhand einer empirischen Gleichung werden diese fünf Bodeneigenschaften schließlich zueinander in Beziehung gesetzt und ergeben den Faktor K (Schwertmann, Vogl und Kainz 1987).

Die Parameter L und S werden gemeinsam berechnet und einem sogenannten Nomogramm entnommen. Das Nomogramm wurde anhand einer empirischen Beziehung entwickelt und ergibt bei bekannter Neigung und Länge den in die Grundgleichung einzusetzenden Wert (Schwertmann, Vogl und Kainz 1987).

Faktor C stellt die Bodenbedeckung und die Bearbeitung des Hanges dar. Um ihn berechnen zu können benötigt man Informationen über die relativen Bodenabträge, die Verteilung des R-Faktors über ein ganzes Jahr und die Kalenderdaten der einzelnen Kulturperioden (Schwertmann, Vogl und Kainz 1987).

Der letzte der USLE Parameter ist der Erosionsschutzfaktor P. Er quantifiziert den Schutz, welche Kontur- und Streifennutzung verursachen. Zur Berechnung wird außerdem der LS-Faktor hinzugezogen, da durch Schutzmaßnahmen die erosive Hanglänge verkürzt werden kann (Schwertmann, Vogl und Kainz 1987).

4.4.2 MUSLE

Die MUSLE, oder auch „Modified Universal Soil Loss Equation“, ist eine veränderte Form der USLE und wurde 1975 von Williams entwickelt.

Auch sie verwendet die Grundgleichung:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad \text{Quelle: Wischmeier \& Smith 1978}$$

Der einzige Unterschied ist die Berechnung des R-Faktors. Anstatt die Erosivität anhand von aufsummierter Flächendichte der kinetischen Energie eines erosiven Niederschlags und seiner maximalen 30-Minuten-Intensität zu kalkulieren, verwendete Williams einen Abflussfaktor:

$$A = (11,8 * (Q * q_p)^{0,56}) * K * C * S * L * P$$

wobei:

A, K, C, S, L, P = wie USLE-Parameter

Q = Abflussvolumen in Kubikmeter

q_p = maximaler Abfluss in Kubikmeter pro Sekunde

Quelle: Jackson, Gebhardt und van Haveren o.J.

Der Grund für die Entwicklung der MUSLE lag darin, dass man anhand des verbesserten R-Faktors den Bodenabtrag für jede Messparzelle individuell ermitteln konnte und dadurch hoffte, bessere Ergebnisse erzielen zu können.

5. Methodik und Daten

Dieses Kapitel bringt zuerst die Methode näher, die im Rahmen des Projekts DESPRAL angewendet wurde, um die in der Arbeit verwendeten Daten zu erhalten. Danach erfolgt eine Darstellung dieser erhaltenen Datensätze sowie deren Verarbeitung im SPSS um das Modell PESERA berechnen zu können.

5.1 Methode der Datengewinnung

Die Daten, welche zur Validierung des Modells PESERA verwendet wurden, konnten durch das EU-Projekt DESPRAL gesammelt werden. DESPRAL bezeichnet einen ökologischen Bodenversuch zur Bestimmung des Transportpotentials von Sediment und Phosphor von landwirtschaftlichen Flächen in den Abfluss.

Das Projekt startete 2000 und dauerte vier Jahre lang an. Die Projektpartner kamen aus Großbritannien, Italien, Finnland, Österreich und Ungarn. Für Österreich nahm unter anderem das Bundesamt für Wasserwirtschaft, Abteilung Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, teil.

Im Rahmen von DESPRAL kam es in drei EU-Staaten zu Feldversuchen um Abfluss- und Sedimentmengen, Phosphorgehalte sowie Korngrößenverhältnisse auf Ackerflächen zu messen. Sowohl in Österreich als auch in Italien und Ungarn wurden anhand des Regensimulators von Strauss et al. (2000) künstliche Beregnungen durchgeführt. Die Versuchsflächen waren fünf Meter lang und zwei Meter breit. Der Simulator selbst



(Abbildung 5.1) ist modular aufgebaut. Seine mittlere volumetrische Tropfengröße beträgt zwei Millimeter und die mittlere kinetische Energie des Niederschlags macht 17 Joule pro Millimeter aus. Pro Beregnung sprüht der Simulator aus einer Höhe von 2,7 Metern entionisiertes Wasser durch sechs Sprinkler (Strauss et al. 2000).

Abb. 5.1: Der Regensimulator von Strauss et al.
Quelle: Strauss et al. 2000

Pro EU-Staat gab es zwei Standorte, welche jeder für sich dreimal berechnet wurde. Nur ein Standort in Ungarn wurde einer vierten Berechnung unterzogen. Jeder Standort bestand aus vier Versuchsflächen.

Vor der ersten Simulation wurden an allen Standorten Saatbeetbedingungen hergestellt. Der Boden wurde bis zu einer Tiefe von zehn Zentimetern händisch gelockert. Danach wurden die Plots 30 Minuten lang mit 30 Millimeter Wasser künstlich beregnet. Während dieser Vorbereitungsphase spannte man Netze über die Versuchsflächen um eine Zerstörung der Bodenstruktur durch die kinetische Energie der Regentropfen zu verhindern. Schlussendlich lies man das Substrat einen Tag trocknen damit sich einheitliche Bedingungen bezüglich der Bodenfeuchte einstellten (Strauss et al. 2000).

Die eigentlichen Beregnungen fanden unter einer Beregnungsintensität von 60 Millimetern pro Stunde statt. Diese relativ hohe Intensität wurde aufgrund der Vergleichbarkeit der Resultate mit den anderen Simulationen gewählt. Sie tritt laut Klaghofer (1987) unter mitteleuropäischen klimatischen Bedingungen alle vier Jahre einmal auf. Beregnet wurde so lange bis konstante Abflussraten gemessen wurden. Während den Beregnungen wurde in einem Intervall von zwei bis fünf Minuten der Oberflächenabfluss in Eimern aufgefangen und gemessen. Fünf Tage lang setzte sich das abgeschwemmte Sediment ab. Danach dekantierte man die Fracht, wog den Bodenabtrag lufttrocken ab und bestimmte außerdem den Phosphoranteil. Während den Simulationen wurden außerdem noch Infiltrationsrate, Oberflächenrauigkeit, Scherspannung und Bodendichte gemessen. Nach der ersten Beregnung lies man die Plots eine Woche unberührt, bevor man eine erneute Simulation durchführte. Der dritte Durchgang erfolgte zwei Wochen nach der ersten Beregnung. Abbildung 5.2 zeigt einen der ungarischen Plots nach vier Regensimulationen, etwa 20 Tage nach Herstellung der Saatbeetbedingungen (Strauss et al. 2000).



Abb. 5.2: Der Standort Nagyhorvati (Ungarn)
Quelle: Strauss et al. 2000

5.2 Resultierende Daten

Die Ergebnisse der Regensimulationen stellen die Grundlage der Überprüfung dieser Arbeit, sprich Validierung, des Modells PESERA dar. Zur Verfügung gestellt wurden die Daten von Hrn. DI Peter Strauss, Mitarbeiter des Bundesamts für Wasserwirtschaft, welches ebenfalls am Projekt DESPRAL beteiligt war.

In jenes Modell fließen folgende vier Datensätze mit ein:

- Klima
- Vegetation
- Boden
- Topographie

Ein fünfter Datensatz über die gemessenen Abtragswerte stand ebenfalls zur Verfügung und wurde sowohl zur Kalibrierung als auch zur Validierung des Modells verwendet.

5.2.1 Klima

Als Eingangsdaten für den Parameter Klima in der Grundgleichung von PESERA dienten Angaben über den gesamten gemessenen Oberflächenabfluss jeder einzelnen der 88 Beregnungen. Zusätzlich wären Informationen über den Speichergrenzwert, welcher noch vom Abfluss abgezogen werden müsste, nötig. Dieser ist jedoch laut Kirkby und Irvine (2001) nur relevant, falls auf den Plots Vegetation vorherrschen würde. Die Versuchsflächen der drei EU-Staaten wiesen allerdings Saatbeetbedingungen auf, das heißt die Ackerflächen lagen brach dar. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde daher Phase 1 des Modells nicht berücksichtigt.

Die Angaben über die Abflussmengen lagen in Liter pro Quadratmeter vor.

Tabelle 5.1 zeigt die im Rahmen von DESPRAL gemessenen Oberflächenabflussvolumina getrennt nach Standort, Plot und Beregnung. Die Standorte wurden mit Abkürzungen bezeichnet. HU3 und HU4 stehen für die zwei ungarischen Versuchsflächen, IT5 und IT6 für die italienischen Standorte und RI4, RI5 und RO für die österreichischen Plots in Ritzlhof und Rottenhaus.

Tab. 5.1: Oberflächenabfluss aller 88 Regensimulationen
 Quelle: Excel Sheet Projekt DESPRAL

Standort-kürzel	Plot-nummer	Regen-simulation	Gemessener Abfluss in l*m ⁻²
HU3	1	1	7,54
HU3	1	2	13,83
HU3	1	3	32,27
HU3	1	4	40,83
HU3	2	1	4,06
HU3	2	2	13,78
HU3	2	3	31,24
HU3	2	4	39,33
HU3	3	1	3,85
HU3	3	2	24,77
HU3	3	3	36,81
HU3	3	4	40,66
HU3	4	1	1,76
HU3	4	2	26,15
HU3	4	3	32,84
HU3	4	4	38,77
HU4	1	1	21,60
HU4	1	2	17,07
HU4	1	3	17,73
HU4	2	1	19,63
HU4	2	2	15,51
HU4	2	3	16,75
HU4	3	1	20,60
HU4	3	2	17,90
HU4	3	3	17,20
HU4	4	1	21,80
HU4	4	2	16,90
HU4	4	3	17,00
IT5	1	1	24,53
IT5	1	2	29,20
IT5	1	3	27,09
IT5	2	1	24,45
IT5	2	2	15,95
IT5	2	3	28,75
IT5	3	1	24,08
IT5	3	2	28,86
IT5	3	3	28,82
IT5	4	1	24,70
IT5	4	2	27,21
IT5	4	3	28,65
IT6	1	1	30,83
IT6	1	2	21,01
IT6	1	3	22,11
IT6	2	1	31,40
IT6	2	2	21,23

Standort-kürzel	Plot-nummer	Regen-simulation	Gemessener Abfluss in l*m ⁻²
IT6	2	3	22,05
IT6	3	2	22,86
IT6	3	3	23,64
IT6	4	1	26,63
IT6	4	2	24,63
IT6	4	3	22,76
RI4	1	1	5,60
RI4	1	2	11,40
RI4	1	3	7,20
RI4	2	1	9,30
RI4	2	2	12,40
RI4	2	3	10,10
RI4	3	1	12,50
RI4	3	2	13,90
RI4	3	3	11,00
RI4	4	1	13,70
RI4	4	2	18,50
RI4	4	3	11,20
RI5	1	1	4,20
RI5	1	2	12,60
RI5	1	3	16,20
RI5	2	1	6,60
RI5	2	2	12,50
RI5	2	3	10,40
RI5	3	1	13,00
RI5	3	2	9,80
RI5	3	3	9,20
RI5	4	1	5,20
RI5	4	2	7,90
RI5	4	3	8,70
RO	1	1	8,00
RO	1	2	12,60
RO	1	3	13,10
RO	2	1	16,00
RO	2	2	14,60
RO	2	3	2,80
RO	3	1	14,80
RO	3	2	16,80
RO	3	3	17,70
RO	4	1	15,20
RO	4	2	15,90
RO	4	3	15,60

5.2.2 Vegetation

Für den Eingangsparameter Vegetation gab es keine Daten, da die Versuchspartellen keinerlei Pflanzenbedeckung aufwiesen. Jener Faktor war daher in der Grundgleichung von PESERA irrelevant.

5.2.3 Boden

Als Bodendatensätze waren Angaben über die Korngrößenverteilung der Plots (siehe Tabelle 5.2) nötig, welche ebenfalls vom Bundesamt für Wasserwirtschaft zur Verfügung gestellt wurden. Da die in der Diplomarbeit verwendeten Böden die Texturklassen L und SiL aufweisen, wurde ihnen einen Erodibilitätswert k von 10 zugeordnet. Des Weiteren sind Informationen über eventuelle Bodenverkrustungen wichtig, welche die Testflächen jedoch nicht aufwiesen.

Tab. 5.2: Korngrößenverteilung der 7 Standorte
Quelle: Excel Sheet Projekt DESPRAL

Standort	SAND	coarse sand	medium sand	fine sand	finest sand	SILT	coarse silt	medium silt	fine silt	CLAY
	%	>0,63mm	0,2-0,63mm	0,125-0,2mm	0,063-0,125mm	%	0,063-0,02mm	0,02-0,0063mm	0,0063-0,002mm	%
HU3	30,00	0	8	7,87	14,13	50,00	32	13	5,00	20,00
HU4	27,00	1	3	23,00	0,00	56,00	35	14	7,00	17,00
IT5	27,00	1	4	5,71	16,29	61,00	29	25	7,00	12,00
IT6	11,00	1	1	1,26	7,74	69,00	45	19	5,00	20,00
RI4	17,00	1	5	4,08	6,92	60,00	36	17	7,00	23,00
RI5	16,00	2	4	3,17	6,83	61,00	37	18	6,00	23,00
RO	7,25	0	0	0,84	6,41	60,00	27	21	10,75	32,75

5.2.4 Topographie

Da die Validierung des Modells PESERA nur kleinräumig auf Plots von zehn Quadratmetern erfolgt, ist für den Topographiefaktor kein digitales Höhenmodell erforderlich. Benötigt wurden lediglich Angaben über die Hangneigung der Versuchspartellen. Tabelle 5.3 listet jene Werte für alle Standorte auf.

Tab. 5.3: Hangneigung der 7 Standorte
Quelle: Excel Sheet Projekt DESPRAL

Standort	Hangneigung in %
HU3	7,5
HU4	13,0
IT5	0,5
IT6	0,5
RI4	8,0
RI5	8,1
RO	16,5

5.2.5 Gemessene Bodenabträge

Um eine Kalibrierung des Modells PESERA sowie darauffolgende Prüfung der Güte durchführen zu können wurden die tatsächlich gemessenen Erosionsraten benötigt.

Tab. 5.4: Gemessene Abtragsmengen in $g \cdot m^{-2}$ Quelle: Excel Sheet Projekt DESPRAL

Standort-kürzel	Plot-nummer	Regen-simulation	Gemessene Erosion in $g \cdot m^{-2}$
HU3	1	1	53,33
HU3	1	2	145,49
HU3	1	3	408,04
HU3	1	4	732,98
HU3	2	1	18,04
HU3	2	2	205,05
HU3	2	3	568,26
HU3	2	4	928,09
HU3	3	1	19,90
HU3	3	2	313,28
HU3	3	3	589,70
HU3	3	4	803,67
HU3	4	1	4,93
HU3	4	2	142,13
HU3	4	3	497,23
HU3	4	4	677,44
HU4	1	1	1625,46
HU4	1	2	1412,70
HU4	1	3	1697,04
HU4	2	1	2002,06
HU4	2	2	1459,80
HU4	2	3	2237,22
HU4	3	1	2661,40
HU4	3	2	1585,10
HU4	3	3	2379,00
HU4	4	1	2207,50
HU4	4	2	1400,20
HU4	4	3	2078,60
IT5	1	1	179,00
IT5	1	2	114,90
IT5	1	3	82,30
IT5	2	1	288,50
IT5	2	2	103,10
IT5	2	3	145,70
IT5	3	1	201,80
IT5	3	2	147,80
IT5	3	3	100,00
IT5	4	1	298,10
IT5	4	2	205,00
IT5	4	3	162,60
IT6	1	1	307,80
IT6	1	2	85,60
IT6	1	3	101,40
IT6	2	1	363,10
IT6	2	2	85,70

Standort-kürzel	Plot-nummer	Regen-simulation	Gemessene Erosion in $g \cdot m^{-2}$
IT6	2	3	125,10
IT6	3	2	133,43
IT6	3	3	146,80
IT6	4	1	162,15
IT6	4	2	125,27
IT6	4	3	131,10
RI4	1	1	11,40
RI4	1	2	30,35
RI4	1	3	31,24
RI4	2	1	16,00
RI4	2	2	30,17
RI4	2	3	38,66
RI4	3	1	15,09
RI4	3	2	26,70
RI4	3	3	22,70
RI4	4	1	28,28
RI4	4	2	28,70
RI4	4	3	23,59
RI5	1	1	54,10
RI5	1	2	52,52
RI5	1	3	82,10
RI5	2	1	66,00
RI5	2	2	33,35
RI5	2	3	65,98
RI5	3	1	48,00
RI5	3	2	46,74
RI5	3	3	66,84
RI5	4	1	47,50
RI5	4	2	40,57
RI5	4	3	73,70
RO	1	1	62,50
RO	1	2	197,70
RO	1	3	162,60
RO	2	1	413,90
RO	2	2	430,55
RO	2	3	35,17
RO	3	1	281,10
RO	3	2	401,60
RO	3	3	339,00
RO	4	1	423,01
RO	4	2	559,60
RO	4	3	298,70

Tabelle 5.4 stellt die im Rahmen des Projekts DESPRAL gesammelten Ergebnisse pro Standorte für jeden Plot und jede Berechnung einzeln in Gramm pro Quadratmeter dar.

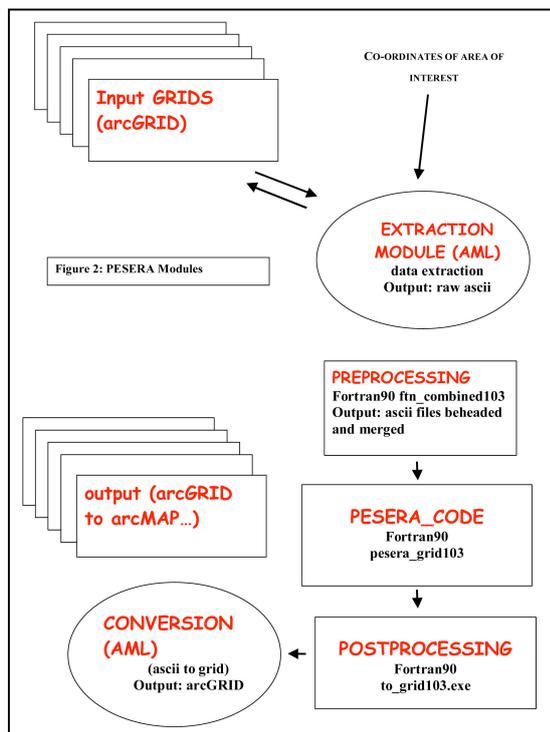
Da jene Sedimentbeträge erst am Ende des Plots gemessen wurden, wurde für diese Studie die zweite der zwei möglichen Gleichungen in Phase 2 des Modells gewählt.

5.3 Berechnung des Modells

PESERA kann für Berechnungen auf jährlicher Basis anhand von zwei Programmen ausgeführt werden:

- PESERA_GRID: Ist ein zellenbasierender Ansatz mit einer Auflösung von einem Kilometer, welcher durch die Software ArcGIS anhand der Programmiersprache Fortran 90 verwendet wird.
- PESERA_VBA: Ist ein punktbasierender Code, welcher im Kalkulationsprogramm Microsoft Excel auszuführen wurde.

5.3.1 Berechnung im ArcGIS



PESERA_GRID benötigt 128 Datensätze im ArcGrid-Format. Jene Eingangsdaten setzen sich aus Klima-, Boden-, Topographie- und Landnutzungseigenschaften zusammen.

Abbildung 5.3 zeigt die Arbeitsschritte, die während der Berechnung des Modells mit der Software ArcGIS durchgeführt werden müssen. Zuerst extrahiert ein Arc Macro Language (AML)-Modul jene Grid-Datensätze ins ASCII-Format. Diese ASCII Dokumente werden danach zu einem einzigen Dokument verknüpft, damit daraufhin Schritt drei, die Ausführung der Rechenoperationen des PESERA_GRID Code beginnen kann (Irvine & Kosmas 2003).

Abb. 5.3: Die 5 Schritte zum Ausführen von PESERA mit PESERA_GRID

Quelle: Irvine & Kosmas 2003

Im Postprocessing kommt es zu einer Neuordnung der Struktur bevor dann als letzter Schritt das Ergebnis wieder anhand des AML-Moduls zurück in das ArcGrid formatiert wird, um eine

Visualisierung anhand von Karten im ArcGIS oder in einem anderen geographischen Informationssystem zu ermöglichen (Irvine & Kosmas 2003).

5.3.2 Berechnung im Microsoft Excel

Die zweite Möglichkeit das Modell zu berechnen erfolgt anhand des Programms Microsoft Excel mit dem PESERA_VBA Code. Der Großteil der Kalkulationen erfolgt über Visual Basic Macrobefehle. Zum Download zur Verfügung gestellt wird das Excel Spread Sheet auf der Homepage des European Soil Portals.

Das Kalkulationsblatt beinhaltet folgende Arbeitsblätter und Diagramme: Das Hauptarbeitsblatt, Diagramme über Erosion, Wasser, Vegetation, Daten über Landnutzung, Klima und ein Arbeitsblatt zur Hangprofilberechnung. Der Großteil der Eingangsdaten wird im Hauptarbeitsblatt (siehe Abbildung 5.4) vom Benutzer eingetragen. Gekennzeichnet wird dies anhand roter Felder. Nicht verändert werden dürfen die blauen Einträge.

MONTH	Rainfall (mm)	r0= Mean Rain/Rain-Day	CV of r0 (SD/Mean)	Pot E-T	Actual E-T	Cover %	Till?	Cover Storage	Bare Storage	Weighted Total Storage
Jan	50	25	1	23.5	22	74%		114.0	10.1	93.8
Feb	50	12.5	0.69	45.2	39	83%		114.0	10.9	103.9
Mar	45	7.5	1.49	54.5	41	86%		114.0	11.0	106.2
Apr	20	10	1	76.2	29	70%		114.0	11.0	90.0
May	6	6	1	210.2	7	34%		114.0	11.0	53.0
Jun	31	15.5	1	190.1	31	36%		114.0	11.0	54.8
Jul	1	1	1	180.3	1	26%		114.0	11.0	44.9
Aug	1	1	1	156.7	1	22%		114.0	11.0	41.2
Sep	1	1	1	89.3	1	20%		114.0	11.0	38.7
Oct	1	1	1	71.2	1	18%		114.0	11.0	37.0
Nov	121	20.16	0.71	56.2	51	34%		114.0	11.0	53.4
Dec	71	14.2	0.54	67.2	57	53%		114.0	11.0	73.1
ANNUAL	Total = 398			Total = 1221	Total = 281	Mean = 46%				Mean = 66 To

Abb. 5.4: Hauptarbeitsblatt zur Berechnung von PESERA im Microsoft Excel
 Quelle: Screenshot aus Microsoft Excel, 15.3.2009

Folgende Angaben werden zur Kalkulation benötigt: Informationen über Bodentextur, Landnutzung, Speichergrenzwert, Hangeigenschaften, Niederschlag und Evapotranspiration. Nach Eingabe aller notwendiger Informationen werden die Macrobefehle aktiviert und die Berechnung startet.

Folgende Ergebnisse werden dann auf monatlicher Basis in Form von Diagrammen und Tabellen dargestellt:

- Aktuelle Evapotranspirationsrate und Pflanzenbedeckung
- Oberflächenabfluss
- Erosionsraten und -verteilung
- Gesamter Oberflächenwasserspeicher
- Biomasse, Humusproduktion, Niederschlagsinterzeption
- Klimaszenarien

5.3.3 Berechnung im SPSS

Die beiden Modellberechnungen im ArcGIS und Microsoft Excel verwenden Eingangsdaten auf monatlicher Basis. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch einzelne Berechnungen auf Plotgröße als Grundlage der Analysen verwendet wurden, mussten andere Methoden der Durchführung gesucht werden.

Zwei der drei Phasen der Modellierung fielen weg, da einerseits keine Vegetation auf den Versuchspartellen anzutreffen und somit das Vegetationswachstumsmodell überflüssig war (Phase 1), andererseits weil keine jährlichen Erosionsraten berechnet wurden (Phase 3). Daher musste ein Weg gefunden werden die Grundgleichung (siehe auch Kapitel 4.1), welche ein Produkt aus drei Parametern mit dazugehörigen Exponenten darstellt, berechnen zu können.

Aufgrund guter Erfahrung mit dem Statistikprogramm SPSS wurde diese Software für die Analyse verwendet.

Zuerst wurden alle nötigen Eingangsdaten in das Programm SPSS eingegeben. Danach wurde die Rechenoption „nichtlineare Regression“ angewendet um eine ausführliche Kalibrierung zu erreichen. Gleichzeitig konnte überprüft werden ob die tatsächlich gemessenen Werte mit den von PESERA berechneten Angaben übereinstimmten.

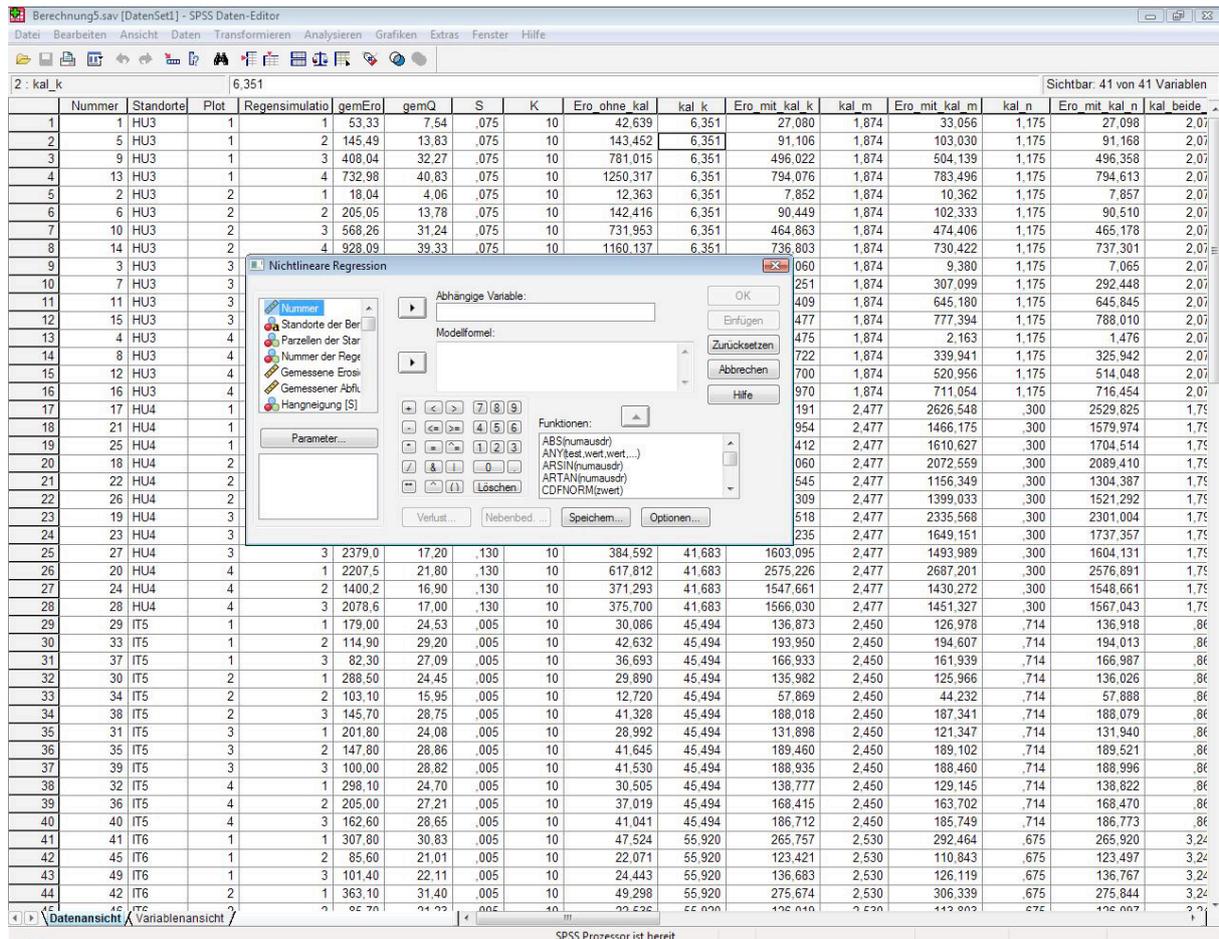


Abb. 5.5: SPSS Datenansicht mit der Rechenoption „Nichtlineare Regression“
Quelle: Screenshot aus SPSS, 15.3.2009

Um die Ergebnisse auch visuell darstellen zu können wurde die Option Grafiken → Interaktiv → Streudiagramme verwendet. Damit konnte gezeigt werden wie sehr die errechneten Werte den gemessenen entsprechen und welche Standorte und Berechnungen besonders auffällig waren.

6. Untersuchungsgebiete

Kapitel 6 geht auf die einzelnen Standorte, an denen die für die Untersuchung verwendeten Bodenproben entnommen wurden, hinsichtlich ihrer Lage, Geologie, Pedologie und Klimatologie näher ein.

6.1 Lage

Hier sollen die Testflächen der drei EU-Länder hinsichtlich ihrer Lage in Europa sowie bezüglich ihrer Verortung im jeweiligen Staat vorgestellt werden.

6.1.1 Lageübersicht aller Standorte

Da die Regensimulationen des Projekts DESPRAL in verschiedenen EU-Staaten stattfanden soll die nachfolgende Karte einen Überblick über die Entfernung der Testflächen zueinander geben. Deutlich erkennbar ist die Lage alle Standorte am Rand der Alpen, genauer gesagt im pannonischen Becken, in der böhmischen Masse und in der Poebene.

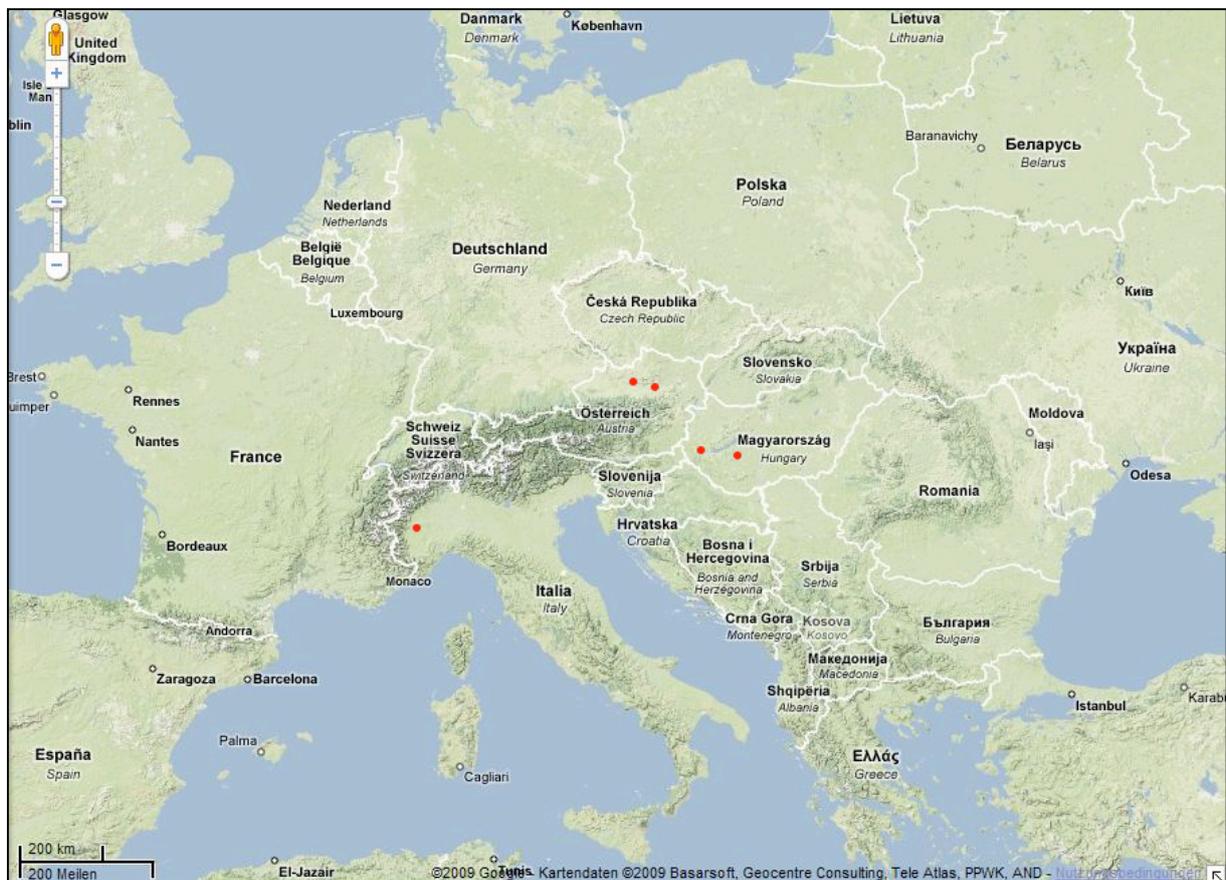


Abb. 6.1: Übersicht der Standorte von Mitteleuropa
Quelle: Google Maps 2009

6.1.2 Lage der österreichischen Standorte

Die beiden österreichischen Standorte, wo Regensimulationen durchgeführt wurden, sind Rottenhaus und Ritzlhof. Abbildung 6.2 zeigt die genaue Verortung der beiden Testgebiete in Österreich.

Rottenhaus, der östliche der beiden rot markierten Standorte, befindet sich im Westen des Bundeslandes Niederösterreichs und ist ein Teil der Gemeinde Wieselburg. Genauer gesagt befindet sich der Standort auf einer landwirtschaftlichen Bundesversuchswirtschaft. Auf diesem Gelände besteht der gesetzliche Auftrag, Forschung und Feldversuche durchzuführen. Die Versuchs- und Forschungstätigkeit erfolgt dort grundsätzlich auf Projektbasis gemeinsam mit Partnern aus Verwaltung, Wissenschaft und Wirtschaft. Bezüglich der geographischen Lage von Wieselburg befindet sich die Gemeinde auf einer Seehöhe von 269 Metern, einer geographischen Länge von $15^{\circ}13'$ und einer geographischen Breite von $48^{\circ}13'$.

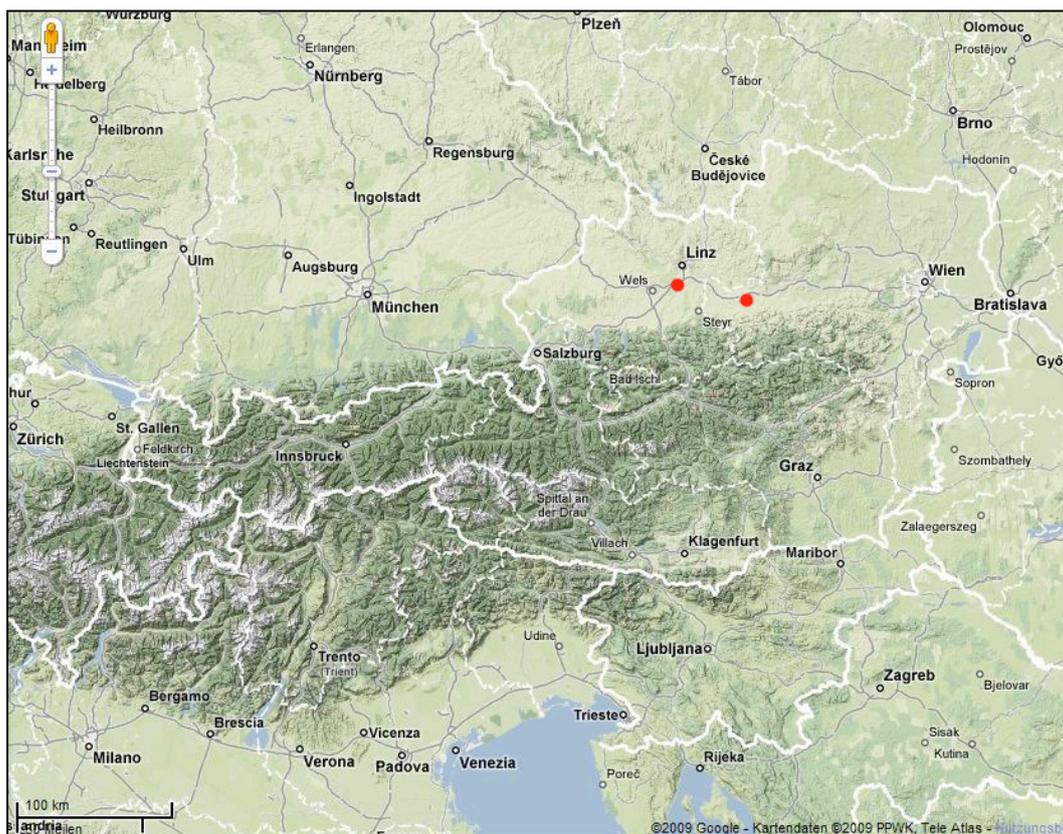


Abb. 6.2: Lage der beiden österreichischen Testflächen Rottenhaus und Ritzlhof
Quelle: Google Maps 2009

Der Standort Ritzlhof hingegen befindet sich im östlichen Teil des Bundeslandes Oberösterreich. Ritzlhof ist eine landwirtschaftliche Berufs- und Fachschule, welche zur

Gemeinde Ansfelden gehört und ebenfalls wie Rottenhaus Versuchsflächen zur Verfügung stellt. Die Schule befindet sich auf einer geographischen Länge von $14^{\circ}14'$ und einer geographischen Breite von $48^{\circ}11'$.

6.1.3 Lage der ungarischen Standorte

Die zwei Standorte in Ungarn befinden sich in Nagyhorvati sowie in Somogybabod. Abbildung 6.3 zeigt die Verortung der beiden Versuchsflächen in Ungarn. Die beiden Standorte liegen im Westen Ungarns in der Nähe des Balatonsees.

Nagyhorvati, der westlichere rote Punkt, ist eine kleine Ortschaft mit einer geographischen Länge von $17^{\circ}04'$ und einer geographischen Breite von $46^{\circ}41'$. Der Standort liegt zirka zwölf Kilometer vom westlichen Ende des Balatonsees entfernt und gehört zur Gemeinde Esztergályhorvati.

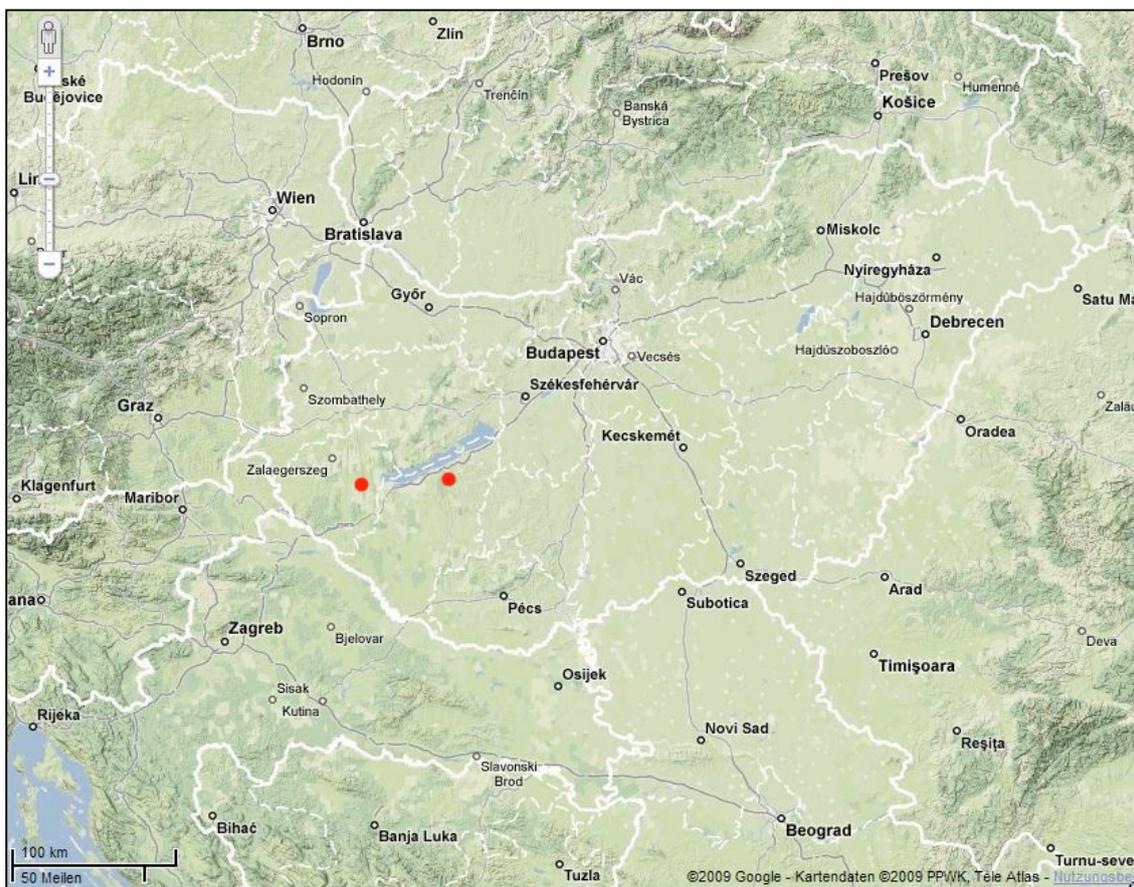


Abb. 6.3: Lage der beiden ungarischen Testflächen Somogybabod und Nagyhorvati
Quelle: Google Maps 2009

Somogybabod stellt selbst eine kleine Gemeinde dar und befindet sich auf einer geographischen Länge von $17^{\circ}46'$ und einer geographische Breite von $46^{\circ}40'$. Die

Versuchsfläche ist ebenfalls etwa zwölf Kilometer vom Balatonsee entfernt, jedoch in südlicher Richtung.

6.1.4 Lage der italienischen Standorte

Bei den beiden italienischen Standorten kam es bezüglich der Regensimulationen zu einem Sonderfall. Es wurden zwar in Riva und Tetto Frati die Böden entnommen, sie wurden jedoch auf das Versuchsfeld der Universität von Turin gebracht und dort beregnet. Da die beiden Standorte in keiner Karte zu finden waren gilt die Annahme, dass es sich bei den beiden Namen möglicherweise um eine lokale Bezeichnung von Feldstücken handelt.

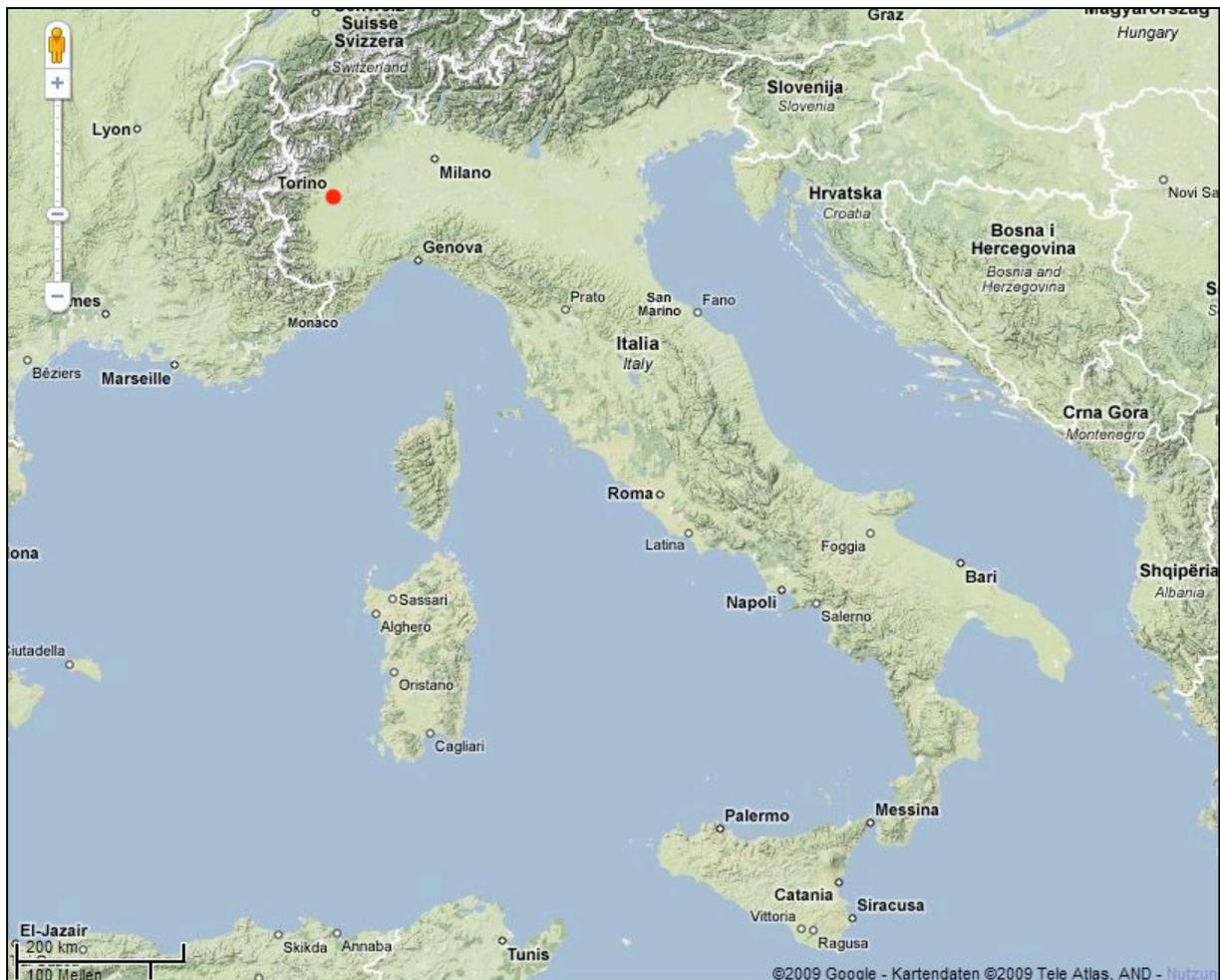


Abb. 6.4: Lage der italienischen Testfläche in Turin
Quelle: Google Maps 2009

Abbildung 6.4 zeigt daher die Versuchsfläche der Universität Turin, wo die Regensimulationen tatsächlich stattgefunden haben.

Turin befindet sich geographisch gesehen in Norditalien im Piemont auf einer Seehöhe von 240 Metern sowie auf einer geographischen Länge von $7^{\circ}40'$ und einer Breite von $45^{\circ}02'$.

6.2 Geologie

Im folgenden Kapitel soll auf die Geologie der Versuchsstandorte näher eingegangen werden. Abbildung 6.5 zeigt eine Karte über die Geologie der Alpen und des Alpenvorlandes sowie die Zuordnung der Standorte zu einer geologischen Zone.

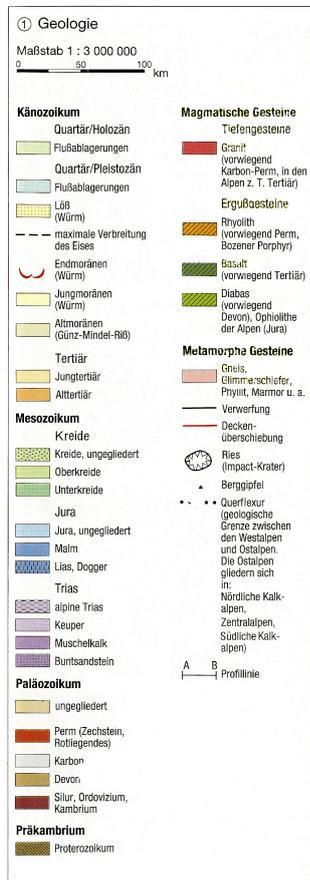
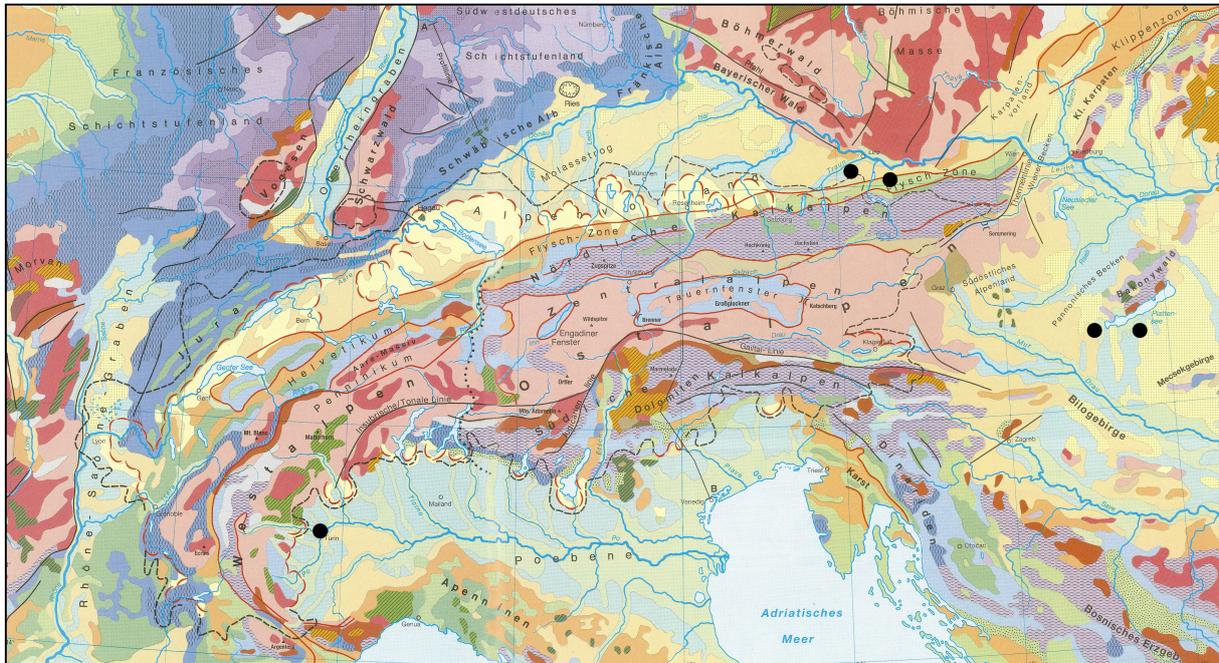


Abb. 6.5: Geologie des Alpenraums
Quelle: Forster 1995

Wie aus Abbildung 6.5 hervorgeht befinden sich die beiden österreichischen Versuchsflächen Rottenhaus und Ritzlhof geographisch gesehen im nördlichen Alpenvorland. Dort breitet sich hauptsächlich die Molassezone aus, welche dort auch einen Teil des Ostrandes der Böhmisches Masse bedeckt.

Auch die zwei ungarischen Standorte Nagyhorvati und Somoogybabod, die sich im pannonischen Becken befinden, werden zur Molassezone gezählt. Das pannonsche Becken, welches mit 500 bis 600 Kilometern Durchmesser das größte intramontane Becken Europas darstellt, wird oftmals auch als pannonsche Tiefebene oder Karpatenbecken bezeichnet.

Die Böden der beiden italienischen Standorte die, wie bereits in Kapitel 6.1.3 besprochen, an die Universität Turin gebracht wurden, befinden sich in der Poebene. Auch diese ist ein Teil der südlichen Molassezone.

Der Begriff „molasse“ ist französisch und bedeutet „schlaff, sehr weich“. Er bezeichnet die Abtragungsprodukte eines neu entstandenen Gebirges, welche in Sedimentbecken im Vorland jenes Gebirges abgelagert wurden (Krenmayr et al. 1999).

Die Molassezone wird auch als subalpine Molasse oder Faltenmolasse bezeichnet. Sie setzt sich aus bis zu 5000 Meter dicken Schichten von Ablagerungen zusammen, welche marinen oder brakischen Ursprungs sind. Aber auch Abtragungsprodukte die im Süßwasser entstanden sind, zählen dazu. Sie sammelten sich ab dem Obereozän (Tertiär), also vor etwa 40 bis 35 Millionen Jahren, an. Abbildung 6.6 zeigt den betreffenden Ausschnitt der geologischen Zeittafel, auf der ersichtlich ist, dass die Entstehung der Molassezone am Ende des Miozäns vor 5,3 Millionen Jahren abgeschlossen wurde (Krenmayr et al. 1999).

K Ä N O Z O I K U M							
QUARTÄR		T E R T I Ä R					
HOLO-ZÄN	PLEISTO-ZÄN	PLIOZÄN	MIOZÄN	OLIGO-ZÄN	EOZÄN	PALEO-ZÄN	
Mio.J.	0,01	1,75	5,3	23,8	33,7	54,8	65

Abb. 6.6: Zeittafel des Känozoikums
Quelle: Krenmayr et al. 1999

Schotter, Tone und Sande lagerten sich während der Hebung der Alpen in sogenannten Sedimentbecken ab. Diese konnten Deltas, Küstenregionen und Schelfgebiete sein.

Als ganz typisches Gestein für die Molassezone gilt der „Schlier“. Er ist ein mergeliger, blaugrauer, feinsandiger Schluff, der zumeist in Schelf- beziehungsweise Beckengebieten gebildet wurde (Krenmayr et al. 1999).

Auch die inneralpinen Becken wie etwa das Klagenfurter oder das Wiener Becken sowie die Becken am Alpenrand setzen sich vorwiegend aus Erosionsprodukten der Alpen zusammen. Diese Sedimente sind gut vergleichbar mit jenen der Molassezone. Sogenannte Speichergesteine im Untergrund jener Zone bergen zum Beispiel die Hauptvorkommen von Kohlenwasserstoffen in Österreich. Dort werden pro Jahr enorme Mengen an Öl und Gas gefördert (Krenmayr et al. 1999).

Die Molassezone, die erst im Tertiär entstanden ist, präsentiert sich im Wesentlichen mit sanften, hügeligen Geländeformen. Der Grund dafür ist die relative Weichheit der Gesteine, die noch nicht vollständig verfestigt sind. Durch das darauffolgende Quartär wurden große Flächen mit eiszeitlichen Lockersedimenten wie Moränen, Löss oder Flussterrassen bedeckt.

Diese treten vor allem im Donauroaum und auch in der Nähe der Zubringerflüsse des Stroms aus den Alpen auf (Krenmayr et al. 1999).

6.3 Pedologie

Im Laufe des Projekts DESPRAL wurden die Böden der Testflächen anhand der „World Reference Base for Soil Resources“ (WRB) klassifiziert. Jene Klassifikation wurde 1998 im Rahmen des Kongresses der internationalen bodenkundlichen Union in Montpellier anerkannt. Insgesamt gibt es 32 Referenzbodengruppen. Sie bilden die oberste Stufe der Hierarchie. Tabelle 6.1 listet die für die Standorte zutreffenden Bodengruppen auf. Im nachfolgenden Unterkapitel wird auf die einzelnen Böden näher eingegangen.

Tab. 6.1: WRB Bodenklassifikation der Standorte
Quelle: Strauss et al. (2007)

Standort	Staat	WRB Bodenklassifikation
Rottenhaus	AUT	Anthrosol
Ritzlhof	AUT	Cambisol
Nagyhorvati	HU	Luvisol
Somogybabod	HU	Regosol
Tetto Frati	ITA	Fluvisol
Riva	ITA	Fluvisol

6.3.1 Anthrosol



Der österreichische Standort Rottenhaus weist laut WRB Bodenklassifikation einen Anthrosol auf. Laut der IUSS Working Group WRB (2008) sind Anthrosole, auch Stadtböden genannt, Böden, welche durch die Aktivität des Menschen grundlegend verändert wurden. Unter menschlichen Aktivitäten versteht man einerseits die Zufuhr von organischen Materialien oder von Hausunrat, andererseits führt auch langfristige Kultivierung und Bewässerung zur Bildung von Anthrosolen. Als Ausgangsgestein dient jedes beliebige Bodenmaterial. (IUSS Working Group WRB 2008).

Abb. 6.7: Anthrosol

Quelle: International Committee for Anthropogenic Soils

Bezüglich der Verbreitung ist zu sagen, dass Anthrosole grundsätzlich überall vorkommen, wo Menschen lange Ackerbau betrieben haben (IUSS Working Group WRB 2008).

Ihre Oberböden, welche bis zu 50 Zentimeter mächtig werden, können sehr unterschiedlich sein:

- Plaggic: Hat ein Anthrosole einen „plaggic“ Horizont, so wurden Oberbodenstücke herausgestochen und als Baumaterial oder Dünger verwendet. Solche Oberböden weisen eine gute Durchwurzelbarkeit, Porosität und Wasserspeicherkapazität auf. Negativ für den Ackerbau sind jedoch der hohe Säuregehalt und der Nährstoffmangel. Auf europäischen Anthrosolen werden vor allem Roggen, Hafer, Gerste, Kartoffel, Zuckerrübe und Sommerweizen angebaut. Manchmal finden sie auch im Bereich von Baumschulen und dem Gartenbau Gebrauch.
- Terric: „Terric“ Horizonte entstanden aufgrund von Ablagerungen kalkhaltiger Materialien. Dies tritt zum Beispiel in Irland und Großbritannien auf. Durch die Veränderung des Oberbodens sind jene Anthrosole besser für den Ackerbau geeignet als Böden mit den ursprünglichen Horizonten.
- Irragric: Jene Oberböden entstanden aufgrund lang andauernder Bewässerung.
- Hortic: Anthrosole mit „hortic“ Horizont werden auch Küchenböden genannt. Ein Beispiel dafür sind die Flussterrassen entlang des Amazonas in Brasilien, die durch Küchenabfälle von früheren Indianersiedlungen herrühren (IUSS Working Group WRB 2008).

Zusammen bringen es die Anthrosole mit „plaggic“ und „terrific“ Horizont auf eine Fläche von mehr als 500.000 Hektar weltweit (IUSS Working Group WRB 2008).

6.3.2 Cambisol

Der Cambisol tritt beim österreichischen Standort Ritzlhof auf. Laut der IUSS Working Group WRB (2008) umfasst der Cambisol alle Böden mit einer zumindest anfänglichen Unterbodenentwicklung. Erkennbar ist dies anhand schwacher bis mittlerer Verwitterung des Ausgangsgesteins. Außerdem fehlt eingewaschener Ton sowie organisches Material. Da er meist eine bräunliche Färbung besitzt ähnelt er ein wenig der Braunerde, außerdem wird jener Boden mindestens 15 Zentimeter mächtig.

Cambisole besitzen weltweit zirka 1,5 Milliarden Hektar Fläche. Heimisch sind sie im gemäßigten und borealen Raum, welcher während des Pleistozäns durch Gletscher beeinflusst war. Dafür gibt es zwei Gründe: Einerseits weil das Ausgangsgestein noch jung ist und andererseits weil die Verwitterung in kühlen Gebieten langsamer vonstatten geht.

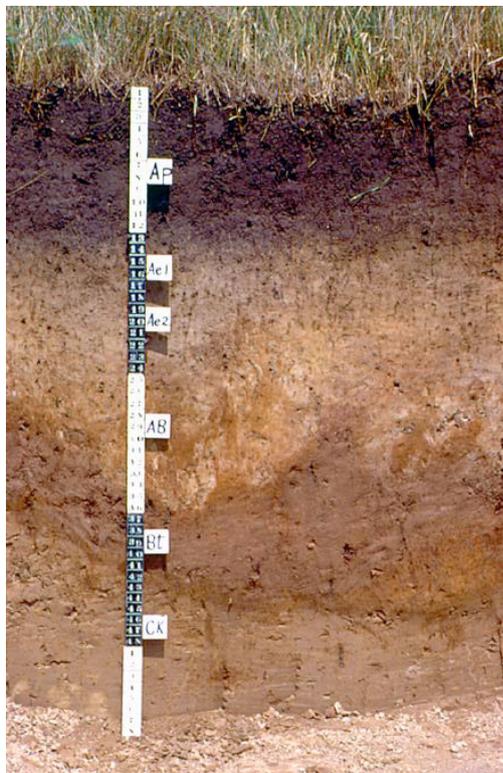
Cambisole können aber auch in Trockengebieten vorkommen. Die größte zusammenhängende Cambisolfäche in den Tropen stellt das aus Terrassen und Ebenen bestehende Ganges-Brahmaputra-Flusssystem dar (IUSS Working Group WRB 2008).



Bezüglich der Nutzung wird der Cambisol im Allgemeinen im Ackerbau intensiv genützt. Er gehört im gemäßigten Raum zu den produktivsten Böden der Welt. Saure Cambisole hingegen weisen eine niedrigere Fruchtbarkeit auf und werden hauptsächlich als Weideland und für die Forstwirtschaft verwendet.

Abb. 6.8: Cambisol
Quelle: *Encyclopaedia Britannica*

6.3.3 Luvisol



Der ungarische Standort Nagyhorvati weist einen Luvisolboden auf. Diese Böden haben die Besonderheit, dass sie während ihrer Entstehung im Unterboden einen höheren Tongehalt ansammeln als im Oberboden. Die IUSS Working Group WRB (2008) nennt dies auch pedogenetische Tongehaltsdifferenzierung. Luvisole korrelieren mit Parabraunerden und sind meist wasserdurchlässig.

Als Ausgangsbasis dienen vor allem Lockergesteine wie glaziale Sedimente oder äolische und alluviale Ablagerungen.

Finden kann man Luvisole vorwiegend in den gemäßigten Breiten, insbesondere in ebenen oder leicht welligen Landschaften mit starken jahreszeitlichen Unterschieden (IUSS Working Group 2008).

Abb. 6.9: Luvisol
Quelle: *Agriculture and Agri-Food Canada*

Insgesamt erstrecken sich Luvisole auf einer Fläche von 500 bis 600 Millionen Hektar und das vor allem im Westen Russlands sowie in Mitteleuropa und den USA.

Bezüglich der Nutzung stellen Luvisole im Allgemeinen fruchtbare Ackerböden dar, die vielfältig genutzt werden. Angebaut werden vor allem Körnerfrüchte, Zuckerrüben und Futterpflanzen. Luvisole mit besonders hohem Schluffanteil sind sehr anfällig für Gefügeschädigung, vor allem wenn die Bearbeitung anhand schweren Gerätes erfolgt. An Hängen mit besonders extremer Hangneigung müssen Maßnahmen zur Erosionskontrolle getroffen werden. Dort wird lediglich extensiv beweidet beziehungsweise Forstwirtschaft betrieben (IUSS Working Group WRB 2008).

6.3.4 Regosol

Die zweite Testfläche in Ungarn befindet sich in Somogybabod und weist als Referenzbodengruppe einen Regosol auf. Regosole bilden laut der IUSS Working Group WRB (2008) taxonomisch die Restgruppe, zu welcher alle jene Böden gehören die aufgrund ihrer Eigenschaften zu keiner der anderen 31 Bodengruppen passen.

Diese Böden sind kaum entwickelt und bestehen aus silikatischem Lockergestein mit schwacher Differenzierung des Profils. Die geringe Profilentwicklung hat das geringe Alter und/oder eine schleppende Bodenentwicklung als Ursache. Grundsätzlich kommen sie überall auf der Welt vor wo kein Permafrost existiert, besonders verbreitet sind sie jedoch in Erosionslandschaften, also in ariden und semi-ariden Regionen. Regosole erstrecken sich global gesehen auf etwa 260 Millionen Hektar (IUSS Working Group WRB 2008).



Bezüglich der landwirtschaftlichen Nutzung jener Böden ist zu sagen, dass sie in Wüstengebieten keine Relevanz haben. Auch 500 bis 1000 Millimeter Niederschlag im Jahr sind zu wenig um die Ernte ertragreich zu machen. Zusätzliche Bewässerung ist hier von Nöten, da die Wasserspeicherkapazität der Regosole sehr niedrig ist.

Die meisten dieser Böden werden extensiv bewirtschaftet. In Gebirgsregionen hingegen sind auch die Regosole sehr erosionsanfällig und sollten daher bewaldet sein (IUSS Working Group WRB 2008).

Abb. 6.10: Regosol
Quelle: Freie Universität Berlin

6.3.5 Fluvisol

Die beiden italienischen Standorte Riva und Tetto Frati weisen Fluvisole auf. Dies sind junge Böden, welche aus fluvialen, marinen oder lakustrinen Ablagerungen entstanden sind. Ihr Profil besteht aus einer gut erkennbaren Schichtung. Es kann aber lediglich ein gut ausgebildeter Oberbodenhorizont existieren. Ihr Vorkommen deckt weltweit 350 Millionen Hektar ab. Grundsätzlich sind sie überall zu finden, hauptsächlich jedoch in alluvialen Ebenen, Flusssedimentkegeln, sowie Überschwemmungsbereichen der Küsten- und Uferstreifen von Meeren, Seen und Flüssen. Wenn die natürlichen Überschwemmungen nicht durch den Bau von Staudämmen und Kraftwerken verschwinden, werden Fluvisole regelmäßig überflutet und mit frischem Sediment bedeckt (IUSS Working Group WRB 2008).

Die größten Vorkommen auf der Erde gibt es entlang von Flüssen wie etwa dem Amazonas, oder in Deltaregionen wie dem Nil- oder Mississippidelta.

Aufgrund der hohen Fruchtbarkeit dieser Böden wurden jene Gebiete bereits in prähistorischer Zeit genutzt. In manchen jener Regionen entstanden sogar die großen Hochkulturen (IUSS Working Group WRB 2008).



Verwendet werden Fluvisole in den Tropen vor allem für den Anbau von Nassreis. Jene Flächen müssen laut der IUSS Working Group WRB (2008) einige Wochen pro Jahr trocken sein, damit es zu keinen Nährstoffproblemen kommt. Außerdem wird durch die Trockenlegung die mikrobielle Aktivität erhöht und die Mineralisation organischem Materials vorangetrieben. Trockenere Fluvisole dienen hauptsächlich dem Anbau von Feldfrüchten. Eine gesteuerte Bewässerung hat trotzdem zu erfolgen (IUSS Working Group WRB 2008).

Abb. 6.11: Fluvisol

Quelle: *Encyclopaedia Britannica*

Fluvisole, die einen hohen Salzgehalt aufweisen, sind meist von Mangrovenwäldern bewachsen. Jene Gebiete sind ökologisch sehr wertvoll. Sie dürfen mit großer Umsicht zum Fangen von Fischen, sowie zur Jagd oder Gewinnung von Salz und Holz verwendet werden (IUSS Working Group WRB 2008).

6.4 Klima

Alle Berechnungen in den drei EU-Staaten wurden während der Sommermonate 2000 und 2001 durchgeführt. Die einheitlichen Regensimulationen haben klarerweise das Abflussregime und dadurch auch die Menge an Sediment bestimmt. Dieses Kapitel soll das Klima repräsentieren, das normalerweise an den Standorten vorherrschend ist. Da jene Versuchsfelder in kleinen Gemeinden beziehungsweise auf einzelnen Feldstücken liegen, von denen keine genauen Klimadaten aufgrund fehlender Messstationen zur Verfügung stehen, wird das Klima für die Regionen der Standorte beschrieben.

6.4.1 Klima der österreichischen Standorte

Die österreichischen Standorte befinden sich am nördlichen Alpenrand. Dort herrscht mitteleuropäisches Übergangsklima. Dieses wird vorwiegend durch Westwetter bestimmt, was jene Seite der Alpen zur Luvseite macht. Luv bedeutet dem Wind zugekehrt. Aus diesem Grund kommt es an der Alpennordseite nur zu einer geringen Variabilität des Niederschlags, das heißt das dortige Gebiet steht unter starkem, oft auftretendem Niederschlag. Grundsätzlich kann man aber sagen, dass das Klima von Westen nach Osten kontinentaler und daher trockener wird (Weischet & Endlicher 2000).

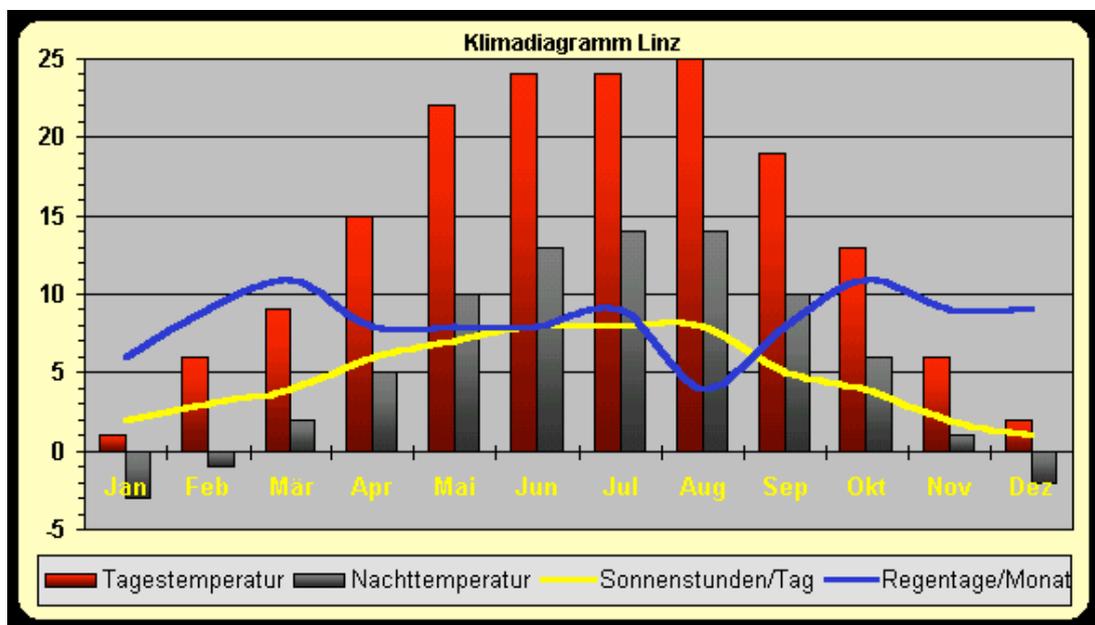


Abb. 6.12: Klimadiagramm Linz
Quelle: Iten 2009

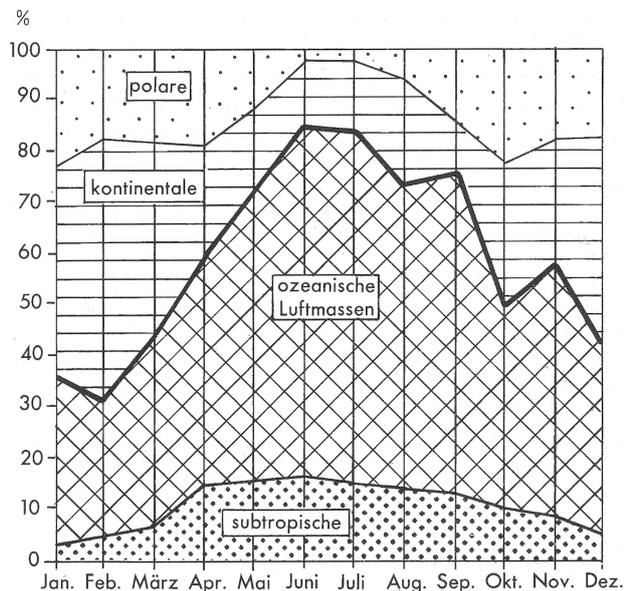
Um das Klima des nördlichen Alpenvorlands zu verdeutlichen wurde stellvertretend für die Region die Stadt Linz ausgesucht. Abbildung 6.12 zeigt den Temperatur- sowie

Sonnenstundenverlauf über ein ganzes Jahr inklusive der Anzahl der gemittelten Regentage pro Monat.

Man erkennt bezüglich der Temperatur im Sommer ein eindeutiges Maximum. Manchmal werden sogar die 30°C überstiegen. In den Sommernächten kühlt es meist um die Hälfte ab. Im recht strengen Winter kommt es vor allem zwischen Dezember und März zu Frost. Der Niederschlag ist laut Klimadiagramm über das ganze Jahr relativ regelmäßig verteilt und beträgt pro Jahr im Durchschnitt 754 Millimeter. Die jährliche Niederschlagsverteilung weist ein Minimum im Spätsommer sowie im Jänner auf.

6.4.2 Klima der ungarischen Standorte

Die beiden ungarischen Testflächen befinden sich geographisch gesehen im pannonischen Becken, in der Nähe des Balatonsees. Das pannonische Becken ist vom Karpatenbogen umgeben, welcher es vor häufigen Kälteeinbrüchen im Winter schützt. Dennoch kann es vor allem über die Donaupforte zu solchen Einbrüchen kommen. Dadurch überwiegen in jenem Teil des Beckens, wie in Abbildung 6.13 ersichtlich ist, von Jänner bis Februar kontinentale Luftmassen. Ab Februar bis etwa Juni nimmt die Bedeutung ozeanischer Luftmassen zu, welche im Winter eine mildernde und im Sommer eine abkühlende Wirkung besitzen (Weischet & Endlicher 2000).



Je weiter südlich man sich im pannonischen Becken befindet umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass das sommerliche Subtrophenhoch einsetzt. Für Ungarn besteht eine Eintrittswahrscheinlichkeit von etwa 20 Prozent. Bezüglich der Temperatur im pannonischen Becken ist zu sagen, dass im Nordwesten im Winter atlantische beziehungsweise mediterrane Einflüsse herrschen, die zum Beispiel in Budapest mittlere Januar-Minima von -4,0°C möglich machen.

Abb. 6.13: Klimadiagramm Budapest
Quelle: Weischet & Endlicher 2000

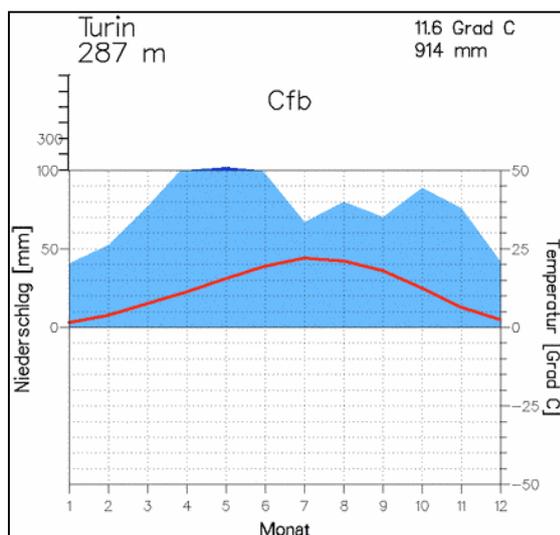
Gefährlich für die Landwirtschaft in der ungarischen Tiefebene sind vor allem Spätfröste, die nach dem Eintreffen eines zeitigen Frühjahrs eintreten. Aber auch die alle fünf Jahre

vorkommenden Dürrejahre mit einem Jahresniederschlag von 400-500 Millimetern sind eine schwere Belastung für den Ackerbau (Weischet & Endlicher 2000).

6.4.3 Klima der italienischen Standorte

Die zwei italienischen Standorte Riva und Tetto Frati befinden sich in der Poebene in Norditalien. Die Poebene bildet laut Weischet & Endlicher (2000) den Übergangsraum zwischen Mitteleuropa und dem Mittelmeergebiet.

Der Sommer ist in ganz Italien durch das Subtrophenhoch gekennzeichnet. In der Poebene liegen die Sommertemperaturen mit mittleren Julimaxima von über 30°C sehr hoch. Sogar im Spätsommer bis in den Herbst hinein herrscht meist noch sommerliches Wetter. Nicht der Winter sondern der Herbst gestaltet sich in der Poebene als die niederschlagsreichste Zeit im Jahr. Der Winter steht nämlich oftmals unter dem Einfluss des kontinentalen Hochdrucks. Im Frühjahr herrscht ähnlich wie in Mitteleuropa bezüglich der Witterung Aprilwetter (Weischet & Endlicher 2000).



Im Winter liegen die Temperaturen auf ähnlichem Level wie in Mitteleuropa. Turin zum Beispiel besitzt ein mittleres Jännerminimum von -1,7°C.

In extrem kalten Wintern sind in der Poebene Frosttemperaturen von -15°C bis -22°C möglich. Außerdem herrschen dort zwischen 35 und 40 Frosttage im Jahr vor (Weischet & Endlicher 2000).

Abb. 6.14: Klimadiagramm Turin

Quelle: Mühr 2009

Weiters wird das dortige Klima von geringer Sonnenscheindauer beeinflusst. Im Sommer liegt sie zwar etwa 20 Prozent über den mitteleuropäischen Werten, jedoch in den restlichen Jahreszeiten überwiegt aufgrund stabiler Hochdrucklagen und den Beckenlagen oft Nebel. Der Jahresniederschlag ist etwas höher als im restlichen Mitteleuropa und teilt sich auf 70 bis 90 Tage im Jahr auf. Die jährliche durchschnittliche Niederschlagsmenge beträgt 914 Millimeter. Im jährlichen Niederschlagsverlauf gibt es ein primäres Herbstmaximum und ein sekundäres Frühjahrsmaximum. Minima treten vor allem im Winter und in den Monaten Juli und September auf (Weischet & Endlicher 2000).

7. Kalibrierung

Eine Kalibrierung definiert man als Schätzung eines oder mehrerer Parameter eines Modells unter der Annahme, dass dieses korrekt ist. Kalibrierungen sind notwendig um das jeweilige Erosionsmodell an lokale Gegebenheiten anpassen zu können. Auch das Erosionsmodell PESERA bietet die Möglichkeit zur Kalibrierung.

Tabelle 7.1 zeigt die Eingangsdaten, die für die nachfolgenden Analysen verwendet wurden.

Tab. 7.1: Eingangsdaten
Quelle: Excel Sheet Projekt DESPRAL

Standort	Plot	Regensimulation	gemessene Erosion in $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	Gemessener Abfluss in $\text{l}\cdot\text{m}^{-2}$	Hangneigung in %
HU3	1	1	53,33	7,54	7,5
HU3	1	2	145,49	13,83	7,5
HU3	1	3	408,04	32,27	7,5
HU3	1	4	732,98	40,83	7,5
HU3	2	1	18,04	4,06	7,5
HU3	2	2	205,05	13,78	7,5
HU3	2	3	568,26	31,24	7,5
HU3	2	4	928,09	39,33	7,5
HU3	3	1	19,90	3,85	7,5
HU3	3	2	313,28	24,77	7,5
HU3	3	3	589,70	36,81	7,5
HU3	3	4	803,67	40,66	7,5
HU3	4	1	4,93	1,76	7,5
HU3	4	2	142,13	26,15	7,5
HU3	4	3	497,23	32,84	7,5
HU3	4	4	677,44	38,77	7,5
HU4	1	1	1625,46	21,60	13,0
HU4	1	2	1412,70	17,07	13,0
HU4	1	3	1697,04	17,73	13,0
HU4	2	1	2002,06	19,63	13,0
HU4	2	2	1459,80	15,51	13,0
HU4	2	3	2237,22	16,75	13,0
HU4	3	1	2661,40	20,60	13,0
HU4	3	2	1585,10	17,90	13,0
HU4	3	3	2379,00	17,20	13,0
HU4	4	1	2207,50	21,80	13,0
HU4	4	2	1400,20	16,90	13,0
HU4	4	3	2078,60	17,00	13,0
IT5	1	1	179,00	24,53	0,5
IT5	1	2	114,90	29,20	0,5
IT5	1	3	82,30	27,09	0,5
IT5	2	1	288,50	24,45	0,5
IT5	2	2	103,10	15,95	0,5
IT5	2	3	145,70	28,75	0,5
IT5	3	1	201,80	24,08	0,5

IT5	3	2	147,80	28,86	0,5
IT5	3	3	100,00	28,82	0,5
IT5	4	1	298,10	24,70	0,5
IT5	4	2	205,00	27,21	0,5
IT5	4	3	162,60	28,65	0,5
IT6	1	1	307,80	30,83	0,5
IT6	1	2	85,60	21,01	0,5
IT6	1	3	101,40	22,11	0,5
IT6	2	1	363,10	31,40	0,5
IT6	2	2	85,70	21,23	0,5
IT6	2	3	125,10	22,05	0,5
IT6	3	1	144,18	22,26	0,5
IT6	3	2	133,43	22,86	0,5
IT6	3	3	146,80	23,64	0,5
IT6	4	1	162,15	26,63	0,5
IT6	4	2	125,27	24,63	0,5
IT6	4	3	131,10	22,76	0,5
RI4	1	1	11,40	5,60	8,0
RI4	1	2	30,35	11,40	8,0
RI4	1	3	31,24	7,20	8,0
RI4	2	1	16,00	9,30	8,0
RI4	2	2	30,17	12,40	8,0
RI4	2	3	38,66	10,10	8,0
RI4	3	1	15,09	12,50	8,0
RI4	3	2	26,70	13,90	8,0
RI4	3	3	22,70	11,00	8,0
RI4	4	1	28,28	13,70	8,0
RI4	4	2	28,70	18,50	8,0
RI4	4	3	23,59	11,20	8,0
RI5	1	1	54,10	4,20	8,1
RI5	1	2	52,52	12,60	8,1
RI5	1	3	82,10	16,20	8,1
RI5	2	1	66,00	6,60	8,1
RI5	2	2	33,35	12,50	8,1
RI5	2	3	65,98	10,40	8,1
RI5	3	1	48,00	13,00	8,1
RI5	3	2	46,74	9,80	8,1
RI5	3	3	66,84	9,20	8,1
RI5	4	1	47,50	5,20	8,1
RI5	4	2	40,57	7,90	8,1
RI5	4	3	73,70	8,70	8,1
RO	1	1	62,50	8,00	16,5
RO	1	2	197,70	12,60	16,5
RO	1	3	162,60	13,10	16,5
RO	2	1	413,90	16,00	16,5
RO	2	2	430,55	14,60	16,5
RO	2	3	35,17	2,80	16,5
RO	3	1	281,10	14,80	16,5
RO	3	2	401,60	16,80	16,5
RO	3	3	339,00	17,70	16,5

RO	4	1	423,01	15,20	16,5
RO	4	2	559,60	15,90	16,5
RO	4	3	298,70	15,60	16,5

7.1 Ursprüngliche Parameter

Zu Beginn der Arbeit wurde daher untersucht, ob eine Kalibrierung der Standorte notwendig ist. Um das herausfinden wurden die tatsächlich gemessenen und simulierten Werte in einem Diagramm eingetragen und das Bestimmtheitsmaß r^2 analysiert.

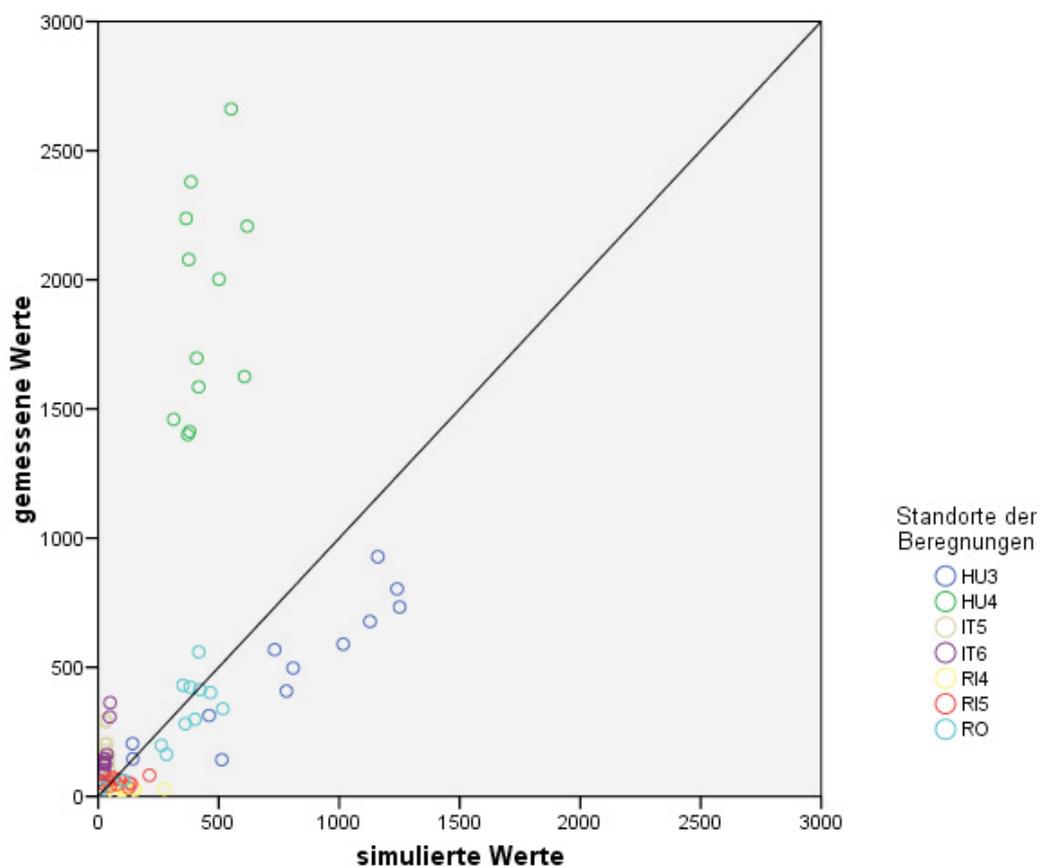


Abb. 7.1: Scatterplot gemessene und simulierte Werte ohne Kalibrierung
Quelle: Eigene Darstellung

Diagramm 7.1 zeigt ein r^2 von lediglich 0,25. Dies bedeutet, dass kaum ein Zusammenhang zwischen den gemessenen und simulierten Werten besteht.

Es wurden insgesamt 88 Probenpunkte (n) in die Regression miteinbezogen. Das Signifikanzniveau p beträgt 0,00, das heißt, dass das Ergebnis r^2 signifikant ist.

Die Skalen geben die gemessenen und simulierten Abtragsraten in Gramm pro Quadratmeter an. Dies gilt auch für die nachfolgenden Scatterplots.

Was besonders auffällig sind die zwölf grünen Messpunkte im oberen linken Bereich des Plots. Sie betreffen alle den Standort HU4. Dies weist auf eine sehr hohe Abtragsrate hin, welche durch das Modell PESERA extrem unterschätzt wurde.

Des Weiteren erkennbar sind die dunkelblauen Messpunkte des Standorts Nagyhorvati HU3, welche vom Erosionsmodell leicht überschätzt wurden und daher unterhalb der Linie dargestellt werden.

Da ein r^2 von 0,25 nur einen schwachen Zusammenhang zwischen den gemessenen und simulierten Werten darstellt, muss also kalibriert werden.

Mögliche Kalibrationsparameter wären die empirischen Exponenten m und n sowie die Erodibilität k . Um eine bestmögliche Anpassung erzielen zu können wurden in der Arbeit alle erdenklichen Möglichkeiten getestet.

7.2 Parameter k

Der Parameter k stellt die Erodibilität dieses Erosionsmodells dar. Nachfolgende Tabelle 7.2 zeigt die optimalen für jeden Standort errechneten k -Werte welche sich in einem weitgestreuten Bereich von 2,5 bis 49,7 aufhalten. Sie weichen zum Teil enorm von dem von PESERA vorgeschlagenen Wert von 10 ab.

Tab. 7.2: Errechnete k -Werte
Quelle: Eigene Darstellung

Standort	HU3	HU4	IT5	IT6	RI4	RI5	RO
k-Wert	8,3	43,1	47,3	49,7	2,5	8,2	9,3

Abbildung 7.2 zeigt das grafische Ergebnis jener k -Wert Kalibrierung. Mithilfe der optimierten Werte konnte ein r^2 von 0,91 mit einem Signifikanzniveau p von 0,00 erreicht werden. Die Datenmenge n beläuft sich wiederum auf 88 Messpunkte.

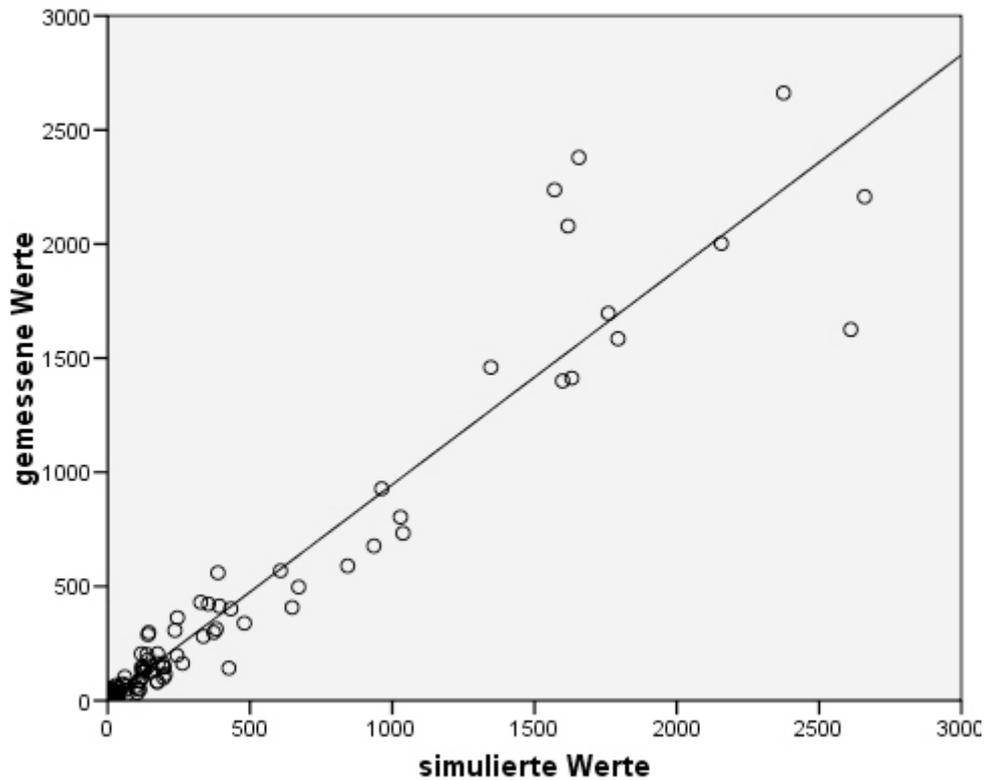


Abb. 7.2: Scatterplot gemessene und simulierte Werte mit k-Kalibrierung
Quelle: Eigene Darstellung

Man erkennt allerdings wiederum die 12 Punkte von HU4, die sich nun im Bereich rechts oben befinden und weiterhin recht weit gestreut sind.

7.3 Parameter m

Im nächsten Schritt wurde eine Anpassung des empirischen Exponenten m vorgenommen. Er steht für die Distanz im Sedimenttransportgesetz dieses Modells.

Tabelle 7.3 stellt die errechneten optimalen m-Werte für jeden Standort dar. Sie besitzen eine viel kleinere Spannweite als die Erodibilität k mit Werten von 1,4 bis 2,5.

Tab. 7.3: Errechnete m-Werte
Quelle: Eigene Darstellung

Standort	HU3	HU4	IT5	IT6	RI4	RI5	RO
m-Wert	1,9	2,5	2,5	2,5	1,4	1,7	2,0

Abbildung 7.3 zeigt das Ergebnis der Kalibrierung des m -Parameters im Scatterplot. Aufgrund der Anpassung des Exponenten m konnte ein r^2 von 0,89 bei einem Signifikanzniveau p von 0,00 erzielt werden. Die Probenmenge belief sich auf 88. Der Scatterplot ähnelt der Kalibrierung von k .

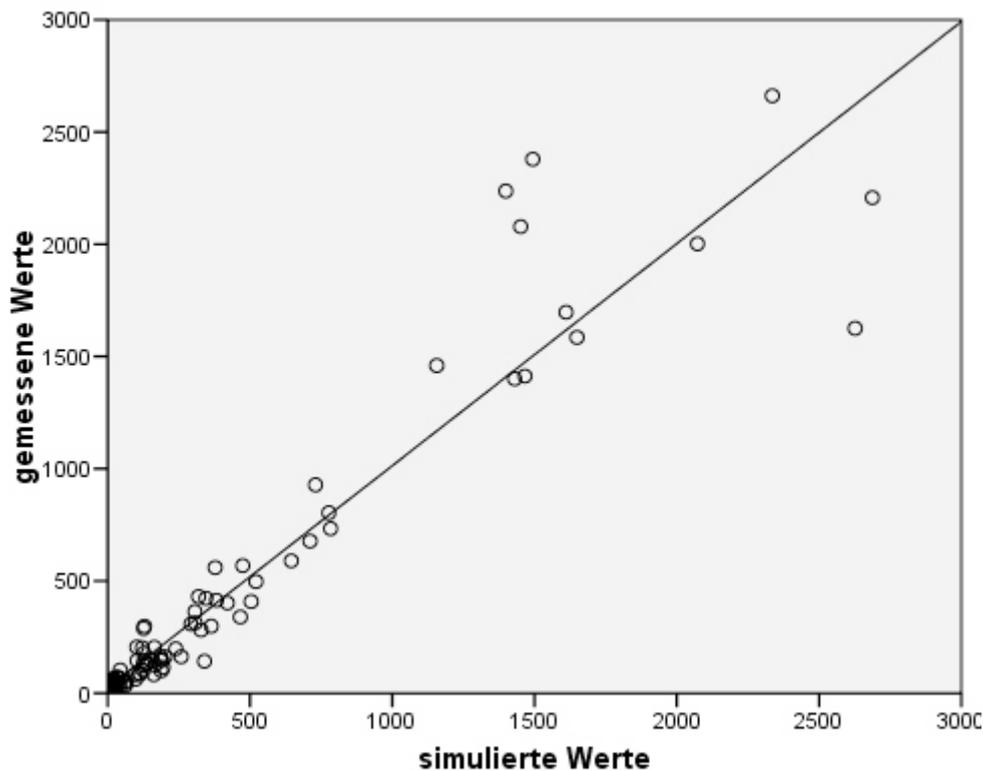


Abb. 7.3: Scatterplot gemessene und simulierte Werte mit m -Kalibrierung
Quelle: Eigene Darstellung

7.4 Parameter n

Im nächsten Schritt wurde der Parameter n , der den Gradient des Sedimenttransportgesetzes repräsentiert, kalibriert.

Nachfolgende Tabelle 7.4 präsentiert die errechneten n -Werte pro Standort. Sie erstrecken sich von 0,3 bis 1,7 und weisen eine etwas höhere Spannweite als die kalibrierten m -Werte auf.

Tab. 7.4: Errechnete n -Werte
Quelle: Eigene Darstellung

Standort	HU3	HU4	IT5	IT6	RI4	RI5	RO
n-Wert	1,2	0,3	0,7	0,7	1,7	1,3	1,1

Auch hier ergab der Scatterplot einen recht hohen Bestimmtheitsgrad von 0,92 bei einer Signifikanz p von 0,00 und 88 Messpunkten. Die Verteilung der Messpunkte korreliert stark mit den Plots aus den Abbildungen 7.2 und 7.3.

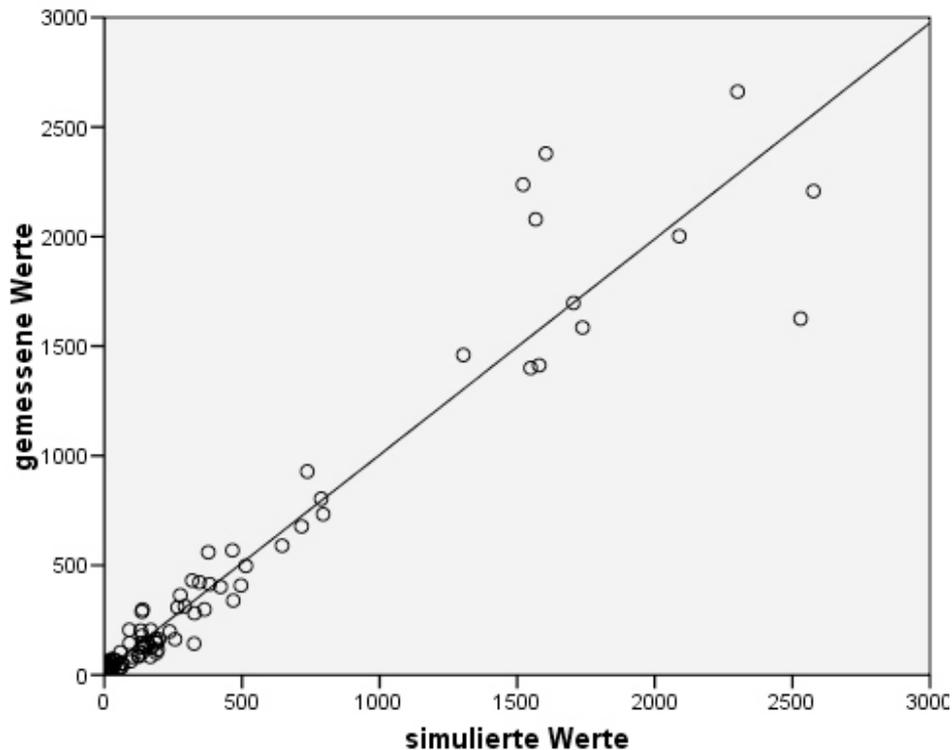


Abb. 7.4: Scatterplot gemessene und simulierte Werte mit n -Kalibrierung
Quelle: Eigene Darstellung

7.5 Parameter k, m, n

Schlussendlich wurden dann noch alle drei Parameter k , m und n zusammen kalibriert um das Ergebnis möglicherweise noch verbessern zu können.

Tabelle 7.5 stellt die optimalen errechneten m -, n - und k -Werte dar. Man erkennt niedrige Werte von m und n im Bereich von -0,8 bis 3,2. Im Gegensatz dazu zeigt die Erodibilität k eine enorme Spannweite mit Werten von 2,0 bis 99,1.

Tab. 7.5: Errechnete k , m , n Werte
Quelle: Eigene Darstellung

Standort	HU3	HU4	IT5	IT6	RI4	RI5	RO
k-Wert	2,0	47,5	99,1	2,7	15,2	29,0	11,8
m-Wert	2,1	0,7	-0,1	3,2	0,3	0,1	1,9
n-Wert	0,7	-0,8	-0,1	1,2	0,1	-0,2	1,1

Parameter m und n und schlägt eine Kalibrierung über die Erodibilität k vor. M und n werden als ganzzahlig und relativ niedrig angegeben ($m=2$, $n=1$).

Grund für die Fixierung der Parameter m und n ist eine provisorische Entscheidung, die im Rahmen des Modelling Workshops im März 2001 getroffen wurde:

„The literature provides little evidence which strongly discriminates between exponent values over a central range, and two arguments converge on the values adopted. First that integral exponents make it possible to reach analytical solutions which speed computation; and second that high exponents of gradient are liable to give falsely high erosion rates in mountainous areas. There is a general correlation between high slope angles and rock/soil types, which are resistant to erosion [...] A lower gradient exponent, within the empirically acceptable range, has therefore been provisionally adopted to reduce the number of falsely high erosion rates in these mountainous areas.“ (Kirkby & Irvine 2001: S.11)

Diese Entscheidung stellt solange eine provisorische Lösung dar bis genügend Validierungen durchgeführt wurden, welche möglicherweise bessere Ergebnisse erzielen.

Da nun alle vier Kalibrierungen ähnliche Ergebnisse aufweisen und der First Annual Report von PESERA eine Fixierung von m und n vorschlägt fällt die endgültige Entscheidung, welcher Parameter am Besten zur Kalibrierung geeignet wäre, auf den Faktor k , die Erodibilität.

7.7 Berechnungsfehler der Kalibrierung

Jeder der sieben Standorte besteht aus vier Plots die jeweils dreimal (mit einer Ausnahme von je vier Simulationen) berechnet wurden. Das ergibt insgesamt 88 Datenpunkte. Die Kalibrierung von k wurde jedoch nur für jeden einzelnen der sieben Standorte durchgeführt. Somit entsteht ein Berechnungsfehler für k , da nur sieben unterschiedliche k -Werte statt 88 berechnet wurden. Dieser Fehler ist für jede Situation unterschiedlich groß. Als Ausgangsbasis (100%) wurde der optimale k -Wert für jeden einzelnen der 88 Messwerte (einzelnes k) hergenommen. Ein Vergleich erfolgt dann mit dem vom Modell vorgeschlagenen Wert (PESERA k), mit dem pro Standort errechneten k -Wert (gemittelt k /Standort) und mit dem für jede Berechnung pro Standort kalkulierten k -Wert (gemittelt k /Standort+Berechnung).

Tabelle 7.7 stellt die Erodibilitätswerte für diese unterschiedlichen Situationen dar. Die blau markierte Berechnung 1 des Standorts IT5 auf allen vier Plots zeigt zum Beispiel sehr vom

Abbildung 7.5 zeigt bezüglich der Anpassung der Parameter k , m und n ein r^2 von 0,95 mit einem Signifikanzniveau p von 0,00. Die Menge der Probenpunkte n beläuft sich wiederum auf 88. Dies bedeutet noch eine geringe zusätzliche Optimierung gegenüber der drei Einzelkalibrierungen.

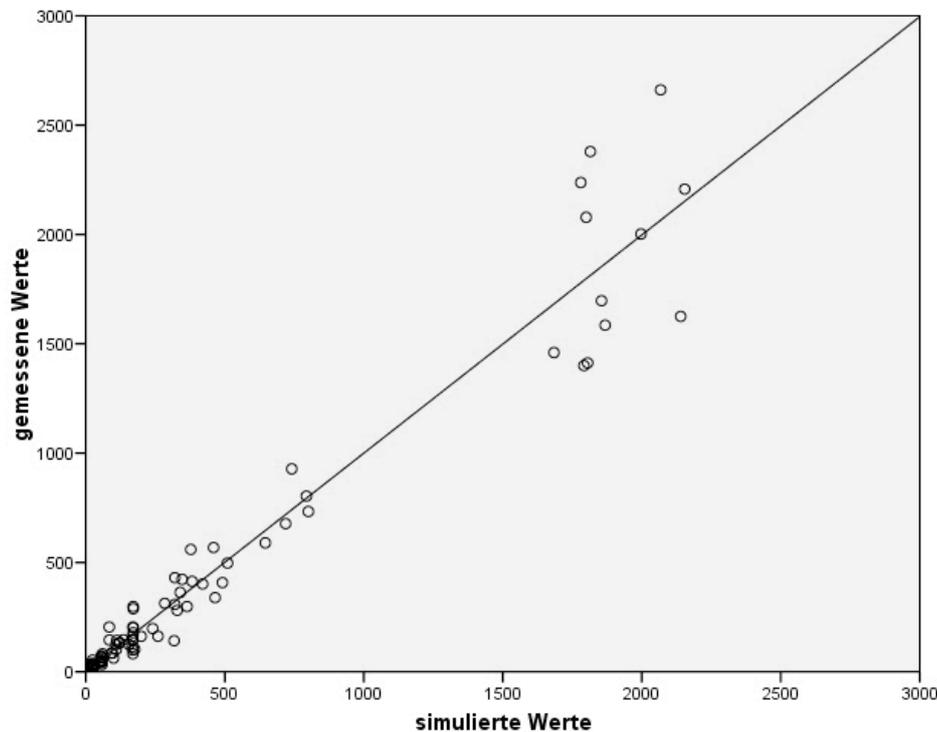


Abb. 7.5: Scatterplot gemessene und simulierte Werte mit Kalibrierung von k, m, n
Quelle: Eigene Darstellung

7.6 Ergebnis der Kalibrierung

Tabelle 7.6 liefert eine Übersicht der Ergebnisse der errechneten R-Quadrate mithilfe der unterschiedlichen Kalibrierungen beziehungsweise ohne Kalibrierung.

Tab.7.6: Errechnete optimale k , m und n Werte
Quelle: Eigene Darstellung

	Ohne Kalibrierung	k-Kalibrierung	m-Kalibrierung	n-Kalibrierung	k-m-n-Kalibrierung
r^2	0,25	0,91	0,89	0,92	0,95

Zusammenfassend kann man sagen, dass alle drei Parameter grundsätzlich gute Ergebnisse liefern. Um nun eine Auswahl treffen zu können, wurde auf ein Zitat aus dem First Annual Report von PESERA Bezug genommen. Es beinhaltet eine fixe Annahme der

PESERA k abweichende Werte. Während das Modell einen Wert von 10 vorschlägt, wurden mithilfe von SPSS viel höhere Ergebnisse errechnet.

Anders ist die Situation bei der gelb markierten ersten Berechnung von RO für alle Plots. Hier stimmen der PESERA k-Wert und die berechneten k-Werte sehr gut überein.

Tab. 7.7: Berechnete k-Werte
Quelle: Eigene Darstellung

Standort	Plot	Berechnung	einzelnes k	PESERA k	gemittelt k/Standort	gemittelt k/Standort+ Berechnung
HU3	1	1	12,50	10	8,30	16,56
HU3	2	1	14,59	10	8,30	16,56
HU3	3	1	17,91	10	8,30	16,56
HU3	4	1	21,23	10	8,30	16,56
HU3	1	2	10,14	10	8,30	8,53
HU3	2	2	14,39	10	8,30	8,53
HU3	3	2	6,81	10	8,30	8,53
HU3	4	2	2,77	10	8,30	8,53
HU3	1	3	5,22	10	8,30	6,24
HU3	2	3	7,76	10	8,30	6,24
HU3	3	3	5,81	10	8,30	6,24
HU3	4	3	6,15	10	8,30	6,24
HU3	1	4	5,86	10	8,30	6,59
HU3	2	4	8,00	10	8,30	6,59
HU3	3	4	6,49	10	8,30	6,59
HU3	4	4	6,01	10	8,30	6,59
HU4	1	1	26,79	10	43,05	37,68
HU4	2	1	39,99	10	43,05	37,68
HU4	3	1	48,19	10	43,05	37,68
HU4	4	1	35,73	10	43,05	37,68
HU4	1	2	37,33	10	43,05	39,92
HU4	2	2	46,67	10	43,05	39,92
HU4	3	2	38,02	10	43,05	39,92
HU4	4	2	37,67	10	43,05	39,92
HU4	1	3	41,50	10	43,05	55,01
HU4	2	3	61,38	10	43,05	55,01
HU4	3	3	61,80	10	43,05	55,01
HU4	4	3	55,34	10	43,05	55,01
IT5	1	1	59,43	10	47,32	80,86
IT5	2	1	96,61	10	47,32	80,86
IT5	3	1	69,66	10	47,32	80,86
IT5	4	1	97,72	10	47,32	80,86
IT5	1	2	26,98	10	47,32	49,73
IT5	2	2	81,10	10	47,32	49,73
IT5	3	2	35,48	10	47,32	49,73
IT5	4	2	55,34	10	47,32	49,73
IT5	1	3	22,44	10	47,32	30,35
IT5	2	3	35,24	10	47,32	30,35
IT5	3	3	24,10	10	47,32	30,35

IT5	4	3	39,63	10	47,32	30,35
IT6	1	1	64,71	10	49,66	60,56
IT6	2	1	73,62	10	49,66	60,56
IT6	3	1	58,21	10	49,66	60,56
IT6	4	1	45,71	10	49,66	60,56
IT6	1	2	38,82	10	49,66	42,30
IT6	2	2	38,02	10	49,66	42,30
IT6	3	2	51,05	10	49,66	42,30
IT6	4	2	41,30	10	49,66	42,30
IT6	1	3	41,50	10	49,66	48,99
IT6	2	3	51,40	10	49,66	48,99
IT6	3	3	52,48	10	49,66	48,99
IT6	4	3	50,58	10	49,66	48,99
RI4	1	1	4,54	10	2,51	2,49
RI4	2	1	2,31	10	2,51	2,49
RI4	3	1	1,21	10	2,51	2,49
RI4	4	1	1,88	10	2,51	2,49
RI4	1	2	2,92	10	2,51	2,04
RI4	2	2	2,45	10	2,51	2,04
RI4	3	2	1,73	10	2,51	2,04
RI4	4	2	1,05	10	2,51	2,04
RI4	1	3	7,53	10	2,51	4,24
RI4	2	3	4,74	10	2,51	4,24
RI4	3	3	2,34	10	2,51	4,24
RI4	4	3	2,35	10	2,51	4,24
RI5	1	1	37,84	10	8,22	20,44
RI5	2	1	18,71	10	8,22	20,44
RI5	3	1	3,51	10	8,22	20,44
RI5	4	1	21,68	10	8,22	20,44
RI5	1	2	4,08	10	8,22	5,19
RI5	2	2	2,64	10	8,22	5,19
RI5	3	2	6,01	10	8,22	5,19
RI5	4	2	8,02	10	8,22	5,19
RI5	1	3	3,86	10	8,22	8,29
RI5	2	3	7,53	10	8,22	8,29
RI5	3	3	9,75	10	8,22	8,29
RI5	4	3	12,02	10	8,22	8,29
RO	1	1	5,92	10	9,29	8,65
RO	2	1	9,79	10	9,29	8,65
RO	3	1	7,78	10	9,29	8,65
RO	4	1	11,09	10	9,29	8,65
RO	1	2	7,55	10	9,29	10,47
RO	2	2	12,25	10	9,29	10,47
RO	3	2	8,63	10	9,29	10,47
RO	4	2	13,43	10	9,29	10,47
RO	1	3	5,74	10	9,29	11,73
RO	2	3	27,16	10	9,29	11,73
RO	3	3	6,56	10	9,29	11,73
RO	4	3	7,45	10	9,29	11,73

Um die Tabellenwerte besser veranschaulichen zu können werden gemittelt über die Plots die einzelnen Berechnungsfehler der Standorte als Diagramme dargestellt.

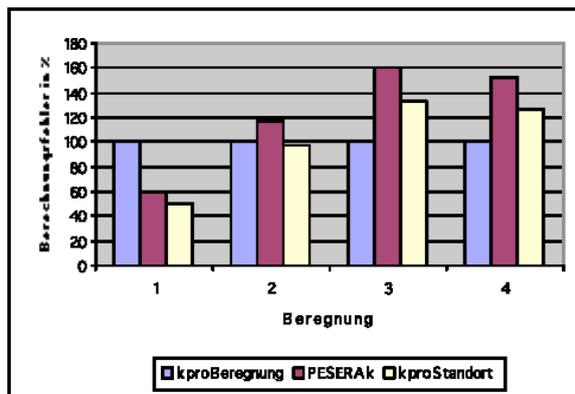


Abb. 7.6: Berechnungsfehler Standort HU3
Quelle: Eigene Darstellung

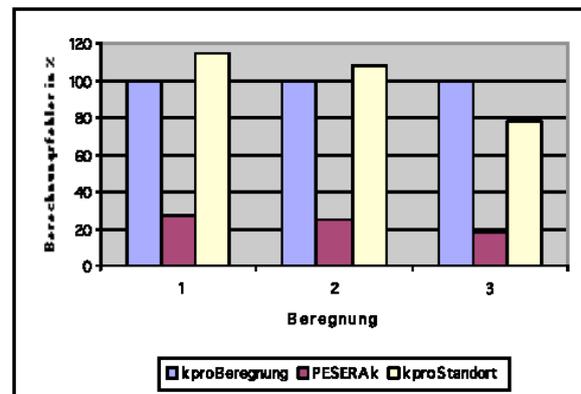


Abb. 7.7: Berechnungsfehler Standort HU4
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 7.6 zeigt den Berechnungsfehler für den Standort HU3. Auf der x-Achse sind die Berechnungen, auf der y-Achse ist der Berechnungsfehler aufgetragen. Der blaue Balken steht für 100 Prozent, der Ausgangsbasis. Hier wurde für jede Berechnung pro Standort der optimale k-Wert berechnet. Der violette Balken stellt den von Kirkby und Irvine (2001) vorgeschlagenen Wert von 10 bzw. dessen Abweichung dar. Der gelbe Balken zeigt, wie groß der Berechnungsfehler ist, wenn man das gemittelte k pro Standort verwendet. Auf diesen k-Werten wurde diese Arbeit aufgebaut. Deutlich erkennbar ist, dass der PESERA k-Wert die größten Abweichungen aufweist. Daher auch die notwendigen Kalibrierungen. Des Weiteren ersichtlich ist, dass allgemein der Berechnungsfehler bei den zwei letzten Berechnungen größer wird. In Abbildung 7.7 wird der Standort HU4 präsentiert. Hier erkennt man, dass der PESERA k-Wert viel zu niedrig ist, während der Erodibilitätswert pro Standort nur kleine Abweichungen zur Basis aufweist.

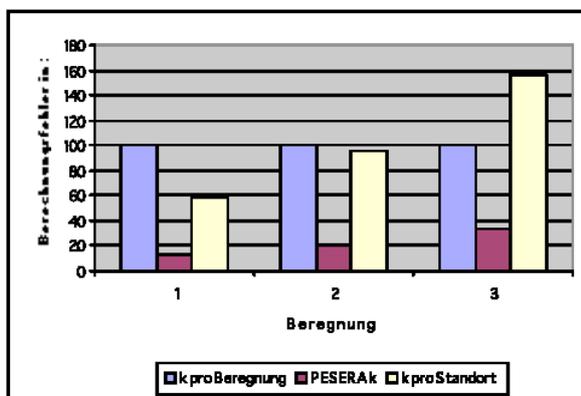


Abb. 7.8: Berechnungsfehler Standort IT5
Quelle: Eigene Darstellung

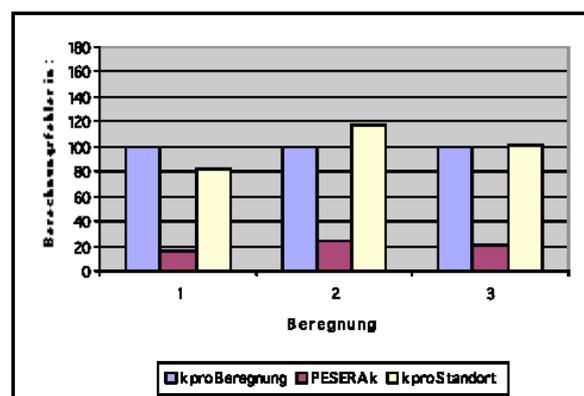


Abb. 7.9: Berechnungsfehler Standort IT6
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 7.8 und 7.9 präsentieren die zwei italienischen Standorte IT5 und IT6. Bei beiden kann man den weit unterschätzten PESERA k-Wert feststellen. Außerdem kann man erkennen, dass sich die berechneten Erodibilitätswerte pro Standort besser an die Ausgangsbasis anpassen, der Berechnungsfehler ist hier also kleiner.

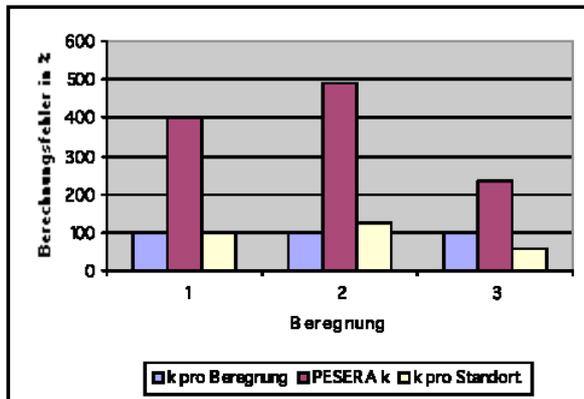


Abb. 7.10: Berechnungsfehler Standort RI4
Quelle: Eigene Darstellung

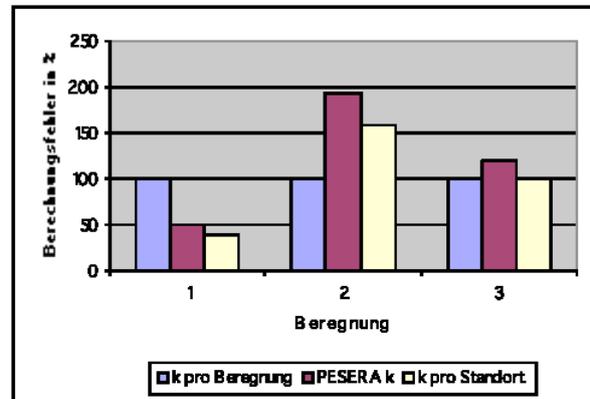
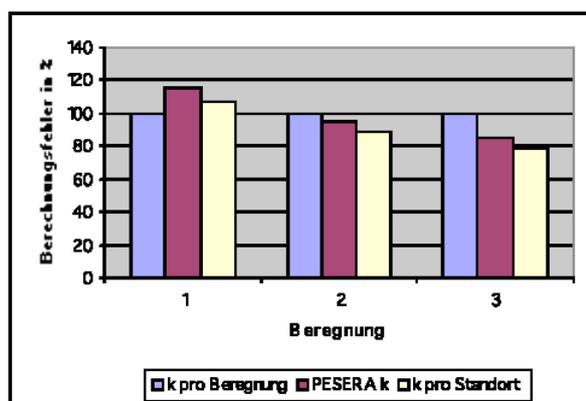


Abb. 7.11: Berechnungsfehler Standort RI5
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 7.10 stellt den österreichischen Standort RI4 dar. Hier erkennt man, dass wie bei den Standorten IT5 und IT6 der PESERA k-Wert große Abweichungen aufweist, nur in die entgegengesetzte Richtung. Bei der zweiten Beregnung zum Beispiel beträgt sie fast 500 Prozent. Hingegen ist der Erodibilitätswert pro Standort sehr gut an den Wert pro Beregnung anpasst.

Die Abbildung 7.11, die den Standort RI5 darstellt, zeigt wiederum ein ganz anderes Bild. Bei der ersten Beregnung werden der vorgeschlagene PESERA k-Wert und die Erodibilität pro Standort unterschätzt. Beregnung 2 und 3 weisen dann allerdings zu hohe Werte auf.

Schlussendlich wird noch in Abbildung 7.12 der Standort RO präsentiert. Hier unterscheiden



sich die Werte am allerwenigsten von der Ausgangsbasis. Bei der ersten Beregnung liegen sie etwas darüber, bei den zwei nachfolgenden sind die Abweichungen im negativen Bereich.

Abb. 7.12: Berechnungsfehler Standort RO
Quelle: Eigene Darstellung

Um nun testen zu können, wie sich der Berechnungsfehler auf ein Erosionsergebnis auswirkt wurden fiktive Annahmen über Boden, Abfluss und Hangneigung eines Standortes erstellt. Auch hier wurden drei Regensimulationen durchgeführt. Die Exponenten m und n beließ

man konstant bei 2 und 1. Verändert wurde jeweils die Erodibilität k . Die erste Annahme stellt den von PESERA vorgeschlagenen Wert 10 für einen Boden des Typs M dar. Zusätzlich wurden dann die Ergebnisse auch für k -Werte von 8 und 12 berechnet, um den Berechnungsfehler darzustellen.

Tab. 7.8: Annahmen für einen fiktiven Hang
Quelle: Eigene Darstellung

	Abfluss in l/m ²	Hangneigung in %	Bodentyp	PESERA k	k 8	k 12
1. Berechnung	15,4	7,0	M	10	8	12
2. Berechnung	19,8	7,0	M	10	8	12
3. Berechnung	16,2	7,0	M	10	8	12

Abbildung 7.13 stellt die mit drei verschiedenen Erodibilitätswerten berechneten Abtragsraten in Gramm pro Quadratmeter dar.

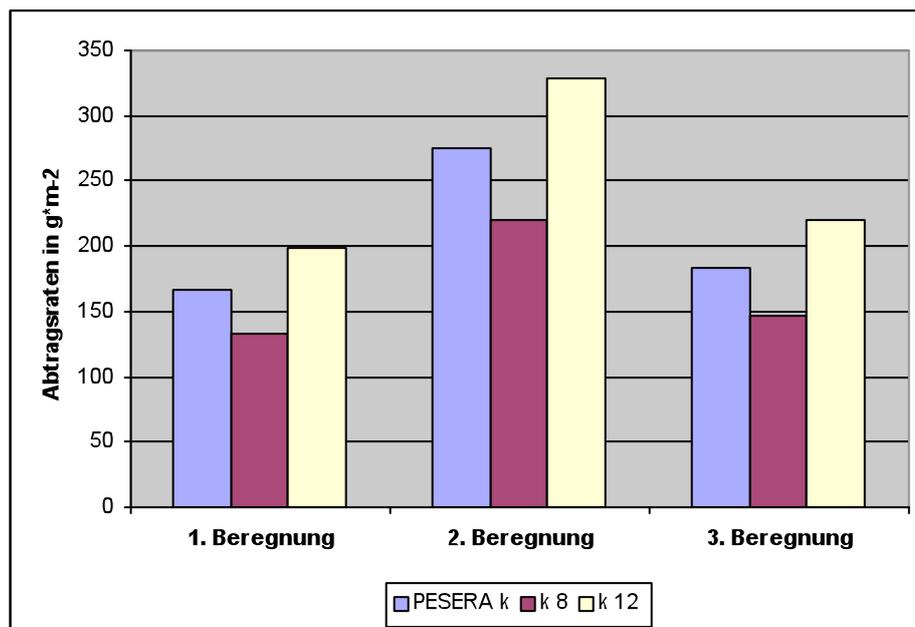


Abb. 7.13: Abtragsraten der drei Berechnungen eines fiktiven Hangs mit verschiedenen k -Werten
Quelle: Eigene Darstellung

Die blauen Balken zeigen die Erosionsraten, wenn man das von PESERA vorgeschlagene k (10) verwendet. Die violetten Balken verwenden ein k von 8, die gelben einen Wert von 12. Die zweite Regensimulation stellt die mit dem meisten Abfluss dar. Dementsprechend hoch sind auch alle drei Abtragsraten. Was auffällt wenn man zum Beispiel die erste und die zweite Berechnung miteinander vergleicht ist, dass die Abweichungen der Balken zueinander in absoluten Werten immer größer werden.

Ob das in relativen Werten auch der Fall ist klärt Abbildung 7.14. Hier erkennt man, dass dem nicht der Fall ist. Der Berechnungsfehler bleibt gleich, auch wenn sich die Abflussmengen in die eine oder andere Richtung verändern.

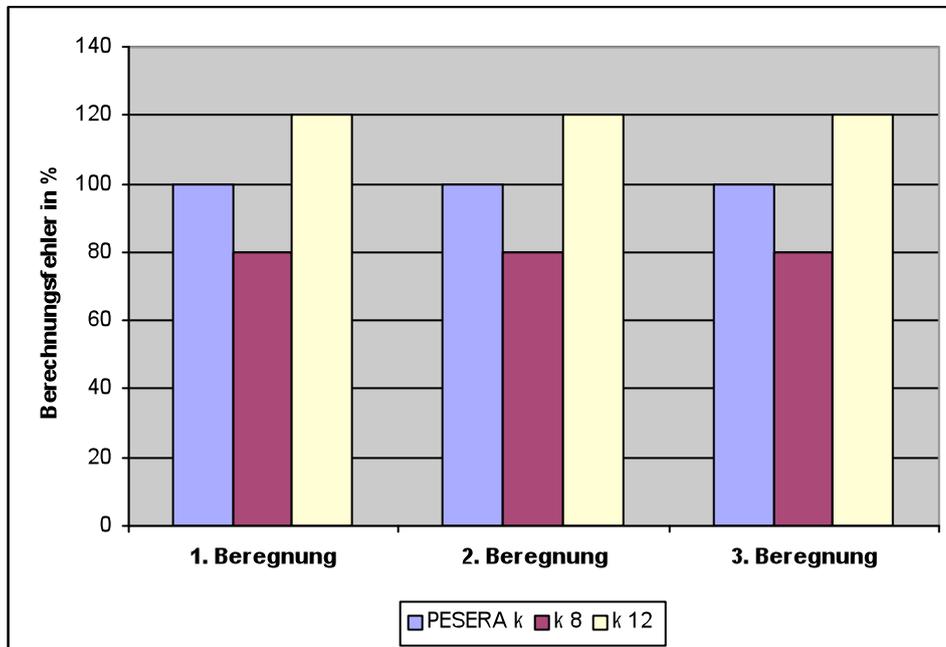


Abb. 7.14: Berechnungsfehler der drei Berechnungen eines fiktiven Hangs mit verschiedenen k-Werten
Quelle: Eigene Darstellung

8. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden einerseits die errechneten mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen, um zu prüfen wie stark die Vorhersagekraft des Modells ist und ob es überhaupt in der vereinfachten Form für Einzelereignisse anwendbar ist.

Andererseits wird auch auf die wandelnde Erodibilität während der einzelnen Berechnungen eingegangen. Hierbei wird analysiert wie die Bedingungen, wie Bodenabtrag und Abfluss, sich ändern müssen, sodass sich die Erodibilitäten in die eine oder die andere Richtung bewegen. Des Weiteren wird das Abtragsmodell USLE von Wischmeier & Smith (1978) herangezogen, um einen Vergleich mit dem PESERA Modell erlangen zu können. Es wird der PESERA k-Wert dem USLE k-Wert gegenübergestellt, um zeigen zu können ob ein Zusammenhang existiert. Außerdem werden die Abtragsraten für die USLE mit den vorhandenen Daten errechnet und mit den Erosionsraten von PESERA verglichen. Als letzten Schritt wird auch die MUSLE berechnet, die im Gegensatz zur USLE Werte pro Standort kalkulieren kann und ebenfalls den Ergebnissen von PESERA gegenübergestellt wird.

8.1 Vergleich der gemessenen Werte mit den PESERA Werten

Dieser Teil der Arbeit soll zeigen, ob das Modell PESERA gute Abtragsprognosen für Einzelereignisse auf Plotgröße liefern kann.

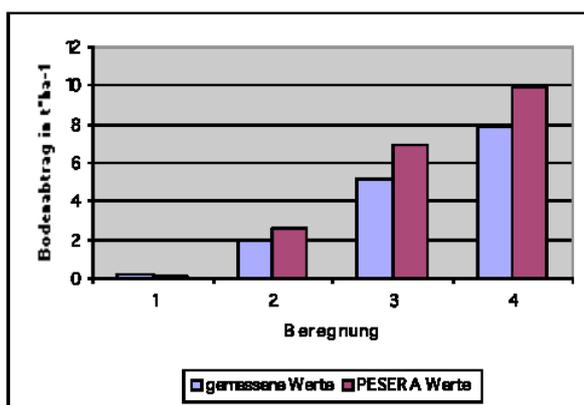


Abb. 8.1: Vergleich gemessen-errechnet HU3
Quelle: Eigene Darstellung

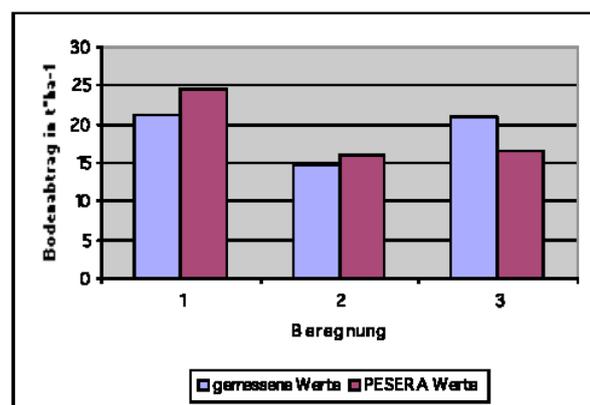


Abb. 8.2: Vergleich gemessen-errechnet HU4
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 8.1 zeigt die gemessenen und die errechneten Werte von Standort HU3 in Tonnen pro Hektar. Hier fanden vier Berechnungen statt. Man erkennt, dass mit der Summe der

Berechnungen die Abträge größer werden. Außerdem steigt auch die Überschätzung der Erosion durch das Modell PESERA.

Der Standort HU4, ersichtlich in Abbildung 8.2, weist allgemein sehr hohe Erosionsraten von 15 Tonnen pro Hektar und mehr auf. Hier ist keine deutliche Tendenz der Abtragsrate mit der Niederschlagshäufigkeit erkennbar. Zwei der drei Berechnungen werden wiederum überschätzt.

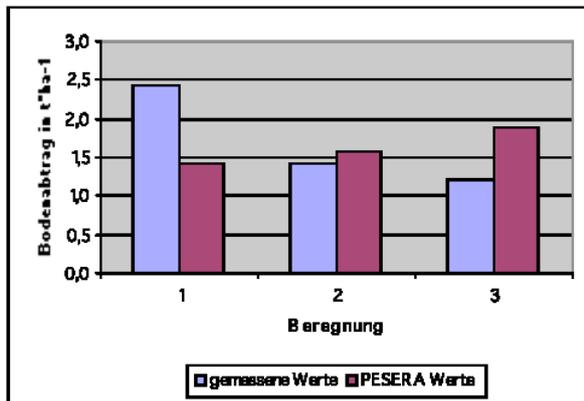


Abb. 8.3: Vergleich gemessen-errechnet IT5
Quelle: Eigene Darstellung

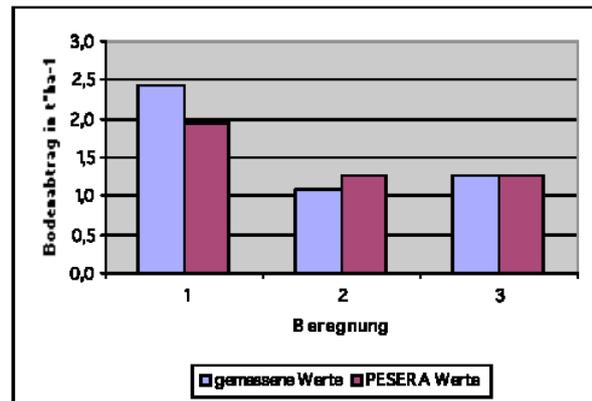


Abb. 8.4: Vergleich gemessen-errechnet IT6
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 8.3 zeigt den Standort IT5. Hierbei handelt es sich um relativ niedrige Erosionsraten im Bereich von 1,2 bis 2,4 Tonnen pro Hektar. Berechnung 1 wurde von PESERA um fast 50 Prozent unterschätzt, bei den zwei nachfolgenden Berechnungen übersteigen die Prognosen die gemessenen Werte.

IT6 weist im Allgemeinen gutsimulierte Abträge auf. Die Abtragsmenge der Berechnung 3 wurde sogar auf eine Kommastelle genau richtig vorhergesagt.

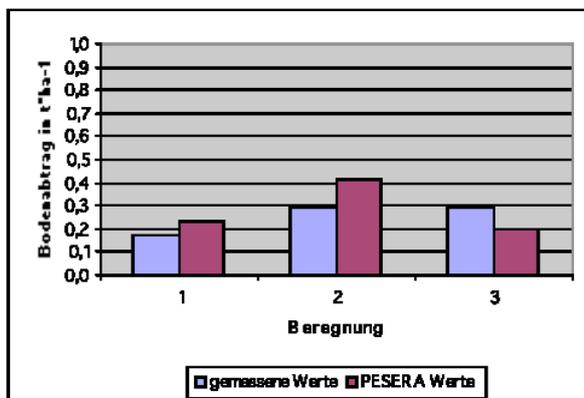


Abb. 8.5: Vergleich gemessen-errechnet RI4
Quelle: Eigene Darstellung

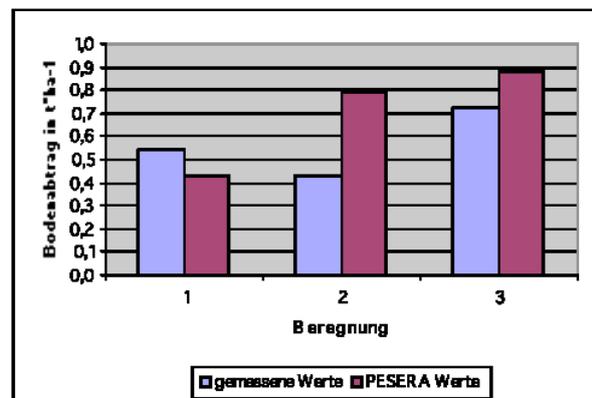
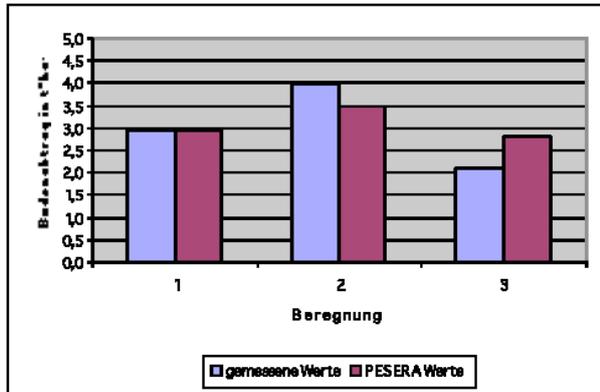


Abb. 8.6: Vergleich gemessen-errechnet RI5
Quelle: Eigene Darstellung

Die beiden nächsten betrachteten Standorte sind die österreichischen Versuchsflächen RI4 und RI5. Bei RI4 wurden nur minimale Abtragsraten von maximal 0,4 Tonnen pro Hektar

gemessen. Daher ist die Differenz auch relativ gering. Die Prognosen ähneln den Messergebnissen. Auch bei RI5 ist das Niveau der Werte relativ gering. Wie bei den beiden italienischen Standorten IT5 und IT6 wird die erste Beregnung leicht unterschätzt, die beiden nachfolgenden überschätzt.



Zuletzt werden noch die Werte des Standorts RO analysiert. Die Prognosen von PESERA sind auch hier zufriedenstellend. Beregnung 1 wurde durch das Modell exakt simuliert.

Abb. 8.7: Vergleich gemessen-errechnet RO
Quelle: Eigene Darstellung

8.2 Ergebnisse der Erodibilität der einzelnen Beregnungen

In diesem Teil der Validierung werden die Bedingungen für die Richtungsänderungen der k-Werte für jede einzelne Beregnung diskutiert.

Tab. 8.1: k-Werte pro Beregnung und Standort
Quelle: Eigene Darstellung

Beregnung	HU3	HU4	IT5	IT6	RI4	RI5	RO
1	17	38	81	61	3	20	9
2	9	40	50	42	2	5	10
3	6	55	30	49	4	8	12
4	7						

Tabelle 8.1 stellt die Erodibilitäten k für jeden Standort und jede Beregnung gemittelt über die Plots dar. Man erkennt zum Teil große Schwankungen, wie zum Beispiel bei IT5, wo Werte von 30 bis 81 berechnet wurden, und sehr unterschiedliche Ausgangsniveaus. Um die Richtungsänderungen und deren Gründe genau erklären zu können werden die Ergebnisse in folgendem Diagramm dargestellt.

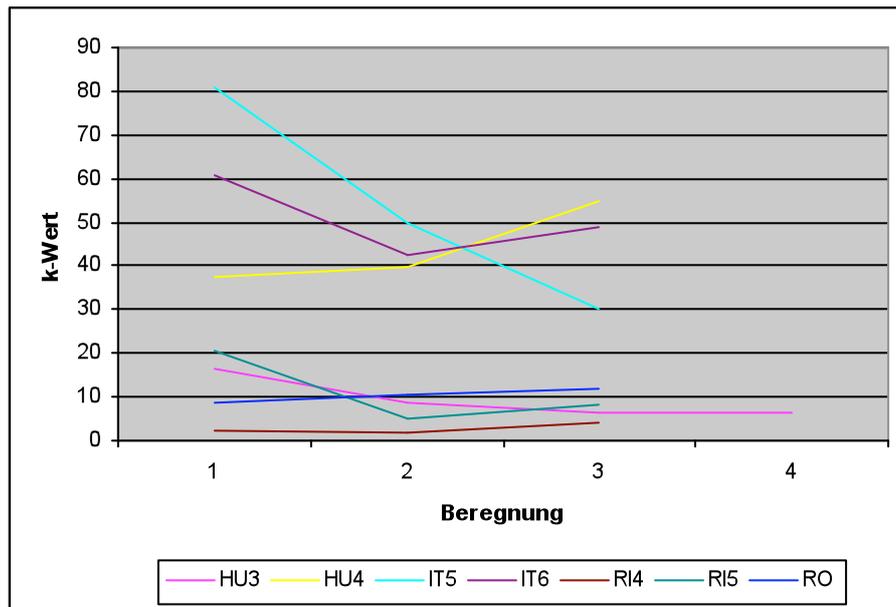


Abb. 8.8: Veränderung des k-Wertes pro Berechnung und Standort
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 8.8 zeigt die Veränderung des Erodibilitätswertes pro Berechnung für jeden Standort. HU3 wurde als einzige Ausnahme viermal berechnet.

Man erkennt, dass alle k-Werte auf unterschiedlichem Niveau beginnen, sie aber dazu tendieren, bei der zweiten Berechnung abzusinken.

Bei Standorten wie HU3, RI4, und RO ändert sich die Erodibilität kaum. Ihre jeweiligen Werte weisen nur eine sehr geringe Spannweite auf. Alle drei besitzen außerdem niedrige k-Werte.

Anders ist die Situation bei HU4, IT5, IT6 und RI5. Die Spanne der Werte liegt hoch, drei von ihnen weisen außerdem sehr hohe Erodibilitäten auf.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Erodibilität unabhängig vom Ausgangsniveau bei der zweiten Berechnung gleich bleibt beziehungsweise sinkt. Während der dritten Simulation steigt sie jedoch mit einer Ausnahme überall wieder an. Bezüglich Abtrags- und Abflussraten kann keinerlei Beziehung festgestellt werden.

8.3 Vergleich der PESERA Erodibilitäten mit den USLE Erodibilitäten

In diesem Kapitel wird im Speziellen auf den k-Faktor, die Erodibilität, eingegangen. Der optimale k-Wert für jeden Standort der mit PESERA berechnet wurde, wird dem optimalen Erodibilitätswert der USLE von Wischmeier & Smith (1978) gegenübergestellt.

Die Berechnungen des k-Wertes für die USLE erfolgen anhand in Kapitel 4.4.1 beschriebener Datensätze. Durch eine empirische Gleichung werden jene Datensätze in Beziehung gebracht und der k-Wert berechnet.

Tab. 8.2: Vergleich PESERA k-Werte und USLE k-Werte

Quelle: Eigene Darstellung

Standort	PESERA k-Wert	USLE k-Wert
HU3	8	0,47
HU4	43	0,73
IT5	47	0,67
IT6	50	0,52
RI4	3	0,46
RI5	8	0,42
RO	10	0,41

Tabelle 8.2 stellt die k-Werte der beiden Erosionsmodelle für jeden der sieben Standorte dar. Die Spannweiten sind bei den PESERA Erodibilitäten bedeutend größer als bei den USLE-Werten. Unberücksichtigt bleiben die absoluten Zahlen, da beide Werte unterschiedlich berechnet werden. Doch die Richtung, in die sie sich bewegen ist entscheidend. Man erkennt die höchsten PESERA Werte bei den Standorten HU4, IT5 und IT6. Dies deckt sich auch mit den USLE Erodibilitäten. Die Tendenz zeigt also in die gleiche Richtung.

Zur besseren Veranschaulichung wurden diese Werte auch noch grafisch anhand eines Scatterplots dargestellt.

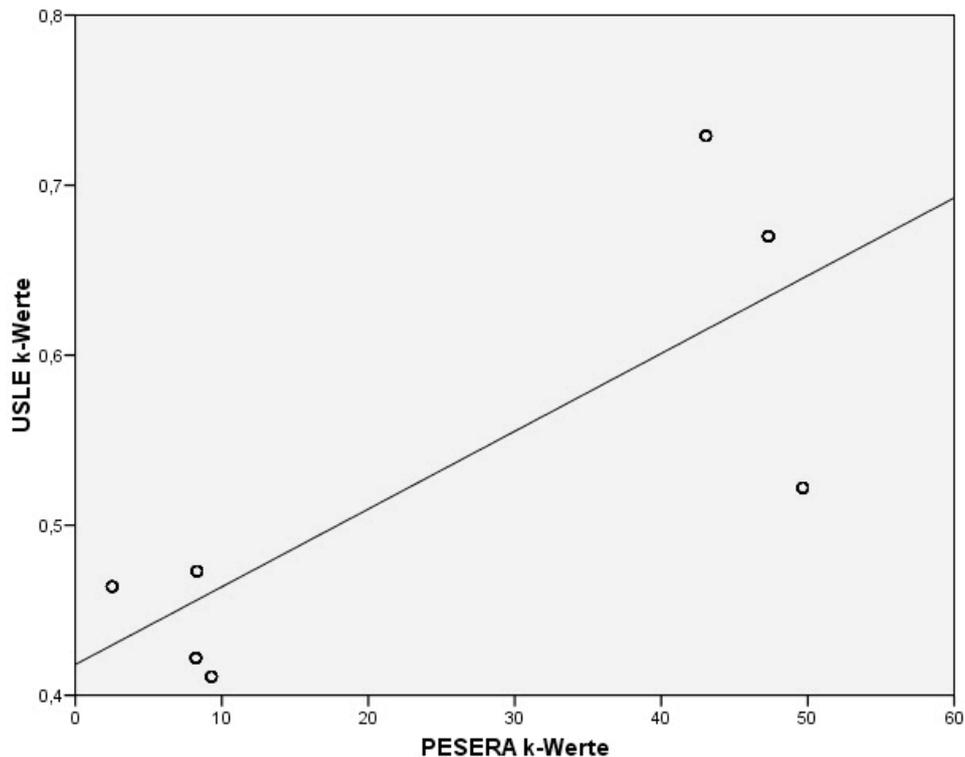


Abb. 8.9: Vergleich PESERA Erodibilität und USLE Erodibilität
Quelle: Eigene Darstellung

Die Grafik zeigt ein r^2 von 0,63 mit einem Signifikanzniveau von 0,00. Das heißt, dass 63 Prozent der Varianz der USLE k-Werte durch die PESERA k-Werte erklärt werden. Somit ist ein recht guter Zusammenhang vorhanden.

8.4 Vergleich der USLE-Werte mit den PESERA-Werten

In diesem Kapitel wird die gesamte allgemeine Abtragsgleichung der USLE dem Modell PESERA gegenübergestellt um feststellen zu können, ob die beiden Abtragsmodelle miteinander korrelieren.

Die USLE kann jedoch nur Abtragsraten pro Standort und nicht pro Beregnung berechnen. Aus diesem Grund mussten die PESERA Ergebnisse pro Standort gemittelt werden, um nur einen Wert zu erhalten.

Um nun beide Erosionsmodelle miteinander vergleichen zu können wurden die vorhandenen Daten für die Berechnung der einzelnen Erosionsfaktoren der USLE verwendet. Nachfolgende Abbildung 8.10 zeigt die Korrelation der beiden Modelle. Ein r^2 von 0,55 konnte erzielt werden. Es wird also nur 55 Prozent der Varianz der USLE Werte durch die PESERA Werte erklärt. Das Signifikanzniveau beträgt 0,00. Die Angabe der sieben Messpunkte erfolgt in Tonnen pro Hektar.

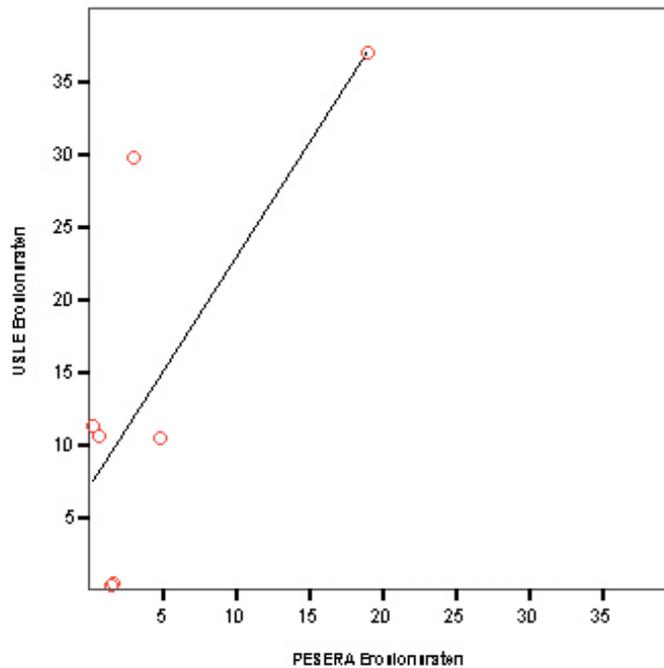


Abb. 8.10: Vergleich PESERA und USLE Raten
Quelle: Eigene Darstellung

Die Regressionsgleichung (Grundmodell: $y = k \cdot x + d$) sieht wie folgt aus: USLE Erosionsraten = $1,58 \cdot \text{PESERA Erosionsraten} + 7,04$. Die Steigung k zeigt die Über- bzw. Unterschätzung der einen Achse durch die andere an. Wäre die Steigung 1, fänden die Änderungen der beiden Modelle im gleichen Ausmaß statt. Die Anpassungslinie würde einem Winkel von 45 Grad entsprechen.

Hier liegt allerdings ein Anstieg k von 1,58 vor. Das bedeutet, dass die PESERA Werte die USLE Werte überschätzen. Man erkennt ein Ansteigen der Anpassungslinie um 58 Prozent steiler als die 45 Grad. Die Steigung beträgt also 71,1 Grad. Das Konfidenzintervall, welches die Genauigkeit der Steigung der Regressionsgeraden beschreibt, beträgt $\pm 0,3$.

8.5 Vergleich der USLE-Werte mit den gemessenen Werten

An dieser Stelle wird die Prognosefähigkeit der USLE auf die Probe gestellt. Die Modellergebnisse werden den tatsächlich gemessenen Werten gegenübergestellt.

Abbildung 8.11 zeigt den Vergleich der, von der USLE prognostizierten, Abtragsraten mit den tatsächlich gemessenen Werten in Tonnen pro Hektar. Es wurden sieben Messpunkte in die Berechnung miteingezogen.

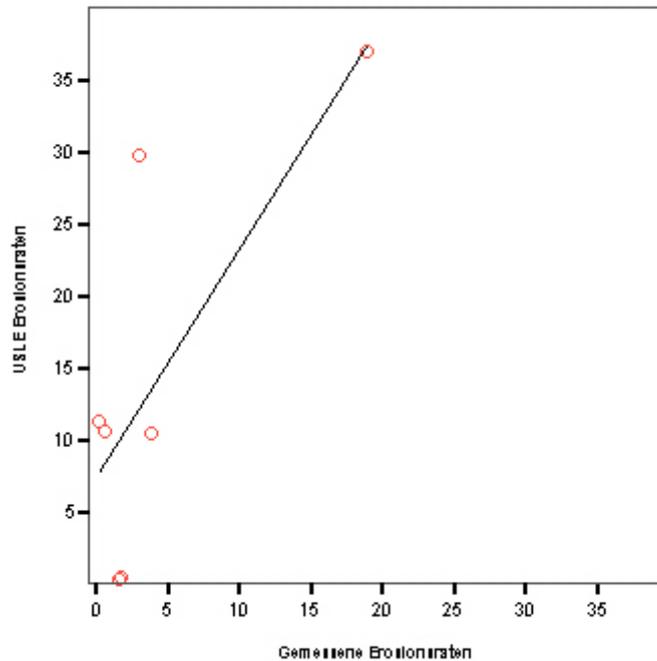


Abb. 8.11: Vergleich USLE Raten und gemessene Werte
Quelle: Eigene Darstellung

Ein r^2 von 0,56 mit einem Signifikanzniveau von 0,00 konnte erzielt werden. Dieses Ergebnis ist ähnlich schlecht wie das aus dem vorherigen Kapitel 8.4. Nur 56 Prozent der Varianz der USLE Werte konnte durch die gemessenen Werte erklärt werden.

Im Gegensatz zum PESERA Modell, welches nach eingehender Kalibrierung ein r^2 von 0,91 erreichen konnte, zeigt die USLE nur mäßige Ergebnisse.

8.6 Vergleich der MUSLE-Werte mit den gemessenen Werten

Der Vergleich der prognostizierten Abtragsraten der USLE mit den tatsächlich gemessenen Werten ergab, wie aus Kapitel 8.5 ersichtlich, ein nicht sehr zufriedenstellendes Ergebnis. Um diese Tatsache zu verbessern wurde nun die modifizierte USLE (MUSLE) angewendet. Die MUSLE wurde 1982 von Williams entwickelt und enthält einen verbesserten R-Faktor. Durch das Einfügen des Abflusses wird die Abtragungsgleichung für jede Messparzelle individuell, somit sollen bessere Ergebnisse erzielt werden.

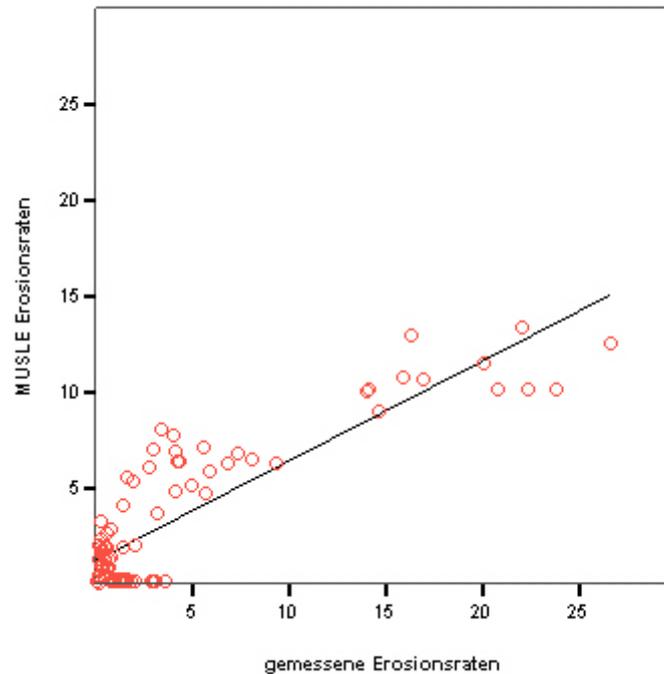


Abb. 8.12: Vergleich MUSLE Raten und gemessene Werte
Quelle: Eigene Darstellung

Man erkennt eine leichte Unterschätzung der MUSLE Raten durch die gemessenen Werte, welche in Kilogramm pro Beregnungsfläche angegeben sind. Jedoch liegt die aus 88 Messpunkten (n) bestehende Punktwolke auf einer Geraden. Ein r^2 von 0,75 mit einem Signifikanzniveau p von 0,00 konnte erzielt werden.

Dies zeigt, dass im Gegensatz zum erreichten r^2 von 0,56 mit der USLE, die MUSLE relativ gesehen bessere Ergebnisse erzielt. Die Unterschätzung der absoluten Werte ist allerdings zu berücksichtigen.

9. Diskussion der Ergebnisse und mögliche Perspektiven

Dieses Kapitel geht nochmals auf die aufwändige Kalibrierung ein um ersichtlich zu machen warum man überhaupt kalibrieren muss, welche Parameter sich am besten dazu eignen und warum man besser einen als mehrere Faktoren anpassen sollte. Zusätzlich wird auf den Berechnungsfehler eingegangen, der je nach Art der Kalibrierung unterschiedlich groß ist.

Als zweiten Schwerpunkt erfolgt eine abschließende Diskussion der Validierung des Modells. Analysiert werden die Modellergebnisse, die mit tatsächlichen Werten verglichen wurden. Auch auf die Erodibilität der einzelnen Berechnungen wird genauer eingegangen. Anschließend wird diskutiert, wie gut das Modell USLE die Abträge prognostiziert und ob es bessere Vorhersagen trifft als PESERA. Als letzten Schritt in der Diskussion der Validierung wird darauf eingegangen ob die verbesserte Version der USLE, die MUSLE, genauere Werte als sein Vorgängermodell errechnet und ein Schlussresumée gezogen.

Am Ende wird über die weitere Zukunft des Modells diskutiert. Hierbei soll vor allem auf die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten und die Weiterentwicklung von PESERA eingegangen werden.

9.1 Diskussion der Kalibrierungsergebnisse

Jenes Kapitel spaltet sich in zwei Bereiche auf. Einerseits wird auf die Anpassung des Modells eingegangen, andererseits auf den Berechnungsfehler der entsteht, wenn man eine Kalibrierung durchführt.

9.1.1 Diskussion der Kalibrierung

Der erste Schritt bestand darin, herauszufinden ob eine Kalibrierung überhaupt notwendig sei. Um dies feststellen zu können wurden zuerst die tatsächlich gemessenen Werte mit den simulierten Werten verglichen und das Bestimmtheitsmaß r^2 analysiert. Je höher der Wert jenes Maßes ist desto mehr Ähnlichkeit besteht zwischen den zwei Variablen.

Die Untersuchungen ergaben ein r^2 von 0,25. Dieses Ergebnis zeigte, dass nur ein geringer Zusammenhang zwischen den gemessenen und errechneten Werten besteht. Das Modell eignet sich also ohne Kalibrierung, zumindest in diesem Fall, nicht zur Prognose von Abtragsraten. Besonders auffällig verhielt sich der ungarische Standort HU4, dem PESERA extrem hohe Abtragsraten prognostizierte. Eine Analyse ohne diesen Standort ergab ein weit höheres Bestimmtheitsmaß. Einige der Gründe für die Besonderheit dieses Standorts sind

einerseits der sehr abtragsanfällige Bodentyp Regosol und andererseits die hohe Hangneigung von 13 Prozent. Da aber alle Standorte in die Analyse eingebunden wurden und ein r^2 von 0,25 ein schlechtes Ergebnis darstellte wurde eine Kalibrierung durchgeführt.

Mögliche Kalibrierungsparameter stellten die empirischen Exponenten m und n sowie der Erodibilitätsfaktor k dar. Kalibriert wurde pro Standort, das heißt sieben Werte wurden ermittelt. Umfassende Untersuchungen ergaben folgende Resultate: Bei der Kalibrierung des Parameters k wurden Werte im Bereich von 2,5 bis 49,7 errechnet. Besonders die hohen Werte waren weit vom nicht kalibrierten k , mit der Zahl 10, entfernt. Jedoch konnte ein r^2 von 0,91 erzielt werden. Das heißt, dass 91 Prozent der Werte der simulierten Abträge den tatsächlich gemessenen Erosionsraten bezüglich ihrer Richtung entsprachen. Nun sollte festgestellt werden ob die Kalibrierungen von m und n ebenfalls gute Ergebnisse lieferten. Die Resultate ähnelten dem der Anpassung von k . Die Kalibrierung von m ergab ein Bestimmtheitsmaß von 0,89 und jene von n ein r^2 von 0,92. Beide Kalibrierungen ergaben Werte in einem weit kleineren Bereich als bei k und zwar von 0,3 bis 2,5. Um das Ergebnis nochmals zu optimieren wurden dann alle drei Parameter kalibriert um ersichtlich zu machen wie groß sich jene Verbesserung darstellte. Ein r^2 von 0,95 konnte erreicht werden.

Das Fazit jener Untersuchung war, dass die Optimierung über alle drei Parameter zu gering sei als, dass sich die Veränderung aller Faktoren auszahle. Um nun zu entscheiden welcher der drei Parameter kalibriert werden sollte wurde auf ein Zitat aus dem First Annual Report Bezug genommen. Dort ging man von einer Kalibrierung von k aus und einer Fixierung von m und n mit den Werten 2 und 1.

Die Hypothese „Anhand einer Kalibrierung von PESERA können die Prognosen optimiert werden“ kann also verifiziert werden. Die Ergebnisse haben sich deutlich verbessert.

9.1.2 Diskussion des Berechnungsfehlers der Kalibrierung

Im letzten Teil der Kalibrierung wurde noch auf den entstehenden Berechnungsfehler eingegangen, der durch die Kalibrierung von k verursacht wurde. In Kapitel 9.1.1 wurde bereits angesprochen, dass die Kalibrierung pro Standort durchgeführt wurde. Das bedeutet, dass für jede Testfläche ein Wert errechnet wurde. Jeder Standort besteht allerdings aus vier Plots, welche jeweils, mit einer Ausnahme von vier Simulationen, dreimal beregnet wurden. Das ergibt insgesamt 88 statt 7 Datenpunkte.

Der Ausgangswert der Untersuchung bestand aus dem optimalen k -Wert, errechnet also für jeden der einzelnen 88 Datenpunkte. Verglichen wurde die Basis (88 Datenpunkte) dann mit dem k -Wert pro Standort (7 Datenpunkte), wie er auch für die spätere Validierung schlussendlich verwendet wurde. Außerdem wurde der Ausgangswert auch dem von

PESERA vorgeschlagenen k-Wert (1 Datenpunkt) und dem k-Wert pro Standort und Beregnung (20 Datenpunkte) gegenübergestellt. Der ungarische Standort HU3 zeigte beim PESERA k-Wert die größten Abweichungen. Außerdem war hier auffällig, dass mit jeder weiteren Beregnung, ausgehend von der ersten, der Berechnungsfehler größer wurde. Bei HU4 hingegen war diese Tendenz nicht ersichtlich. Was dort allerdings in Erscheinung trat war die Tatsache, dass das PESERA k am weitesten von der Ausgangsbasis entfernt war, nämlich ein um etwa 80 Prozent zu niedriger Wert. IT5 und IT6, die beiden italienischen Testflächen, stellten ebenfalls wie bei HU4 einen weit unterschätzten PESERA k-Wert fest. Die Erodibilitätswerte pro Standort ähnelten hingegen sehr der Ausgangsbasis. RI4 hingegen glich zwar der Tatsache, dass auch hier das PESERA k die größten Abweichungen besaß, jedoch waren die Werte diesmal zu hoch. RI5 wies bei Beregnung 1 zu niedrige Werte für das PESERA k und das k pro Standort auf, bei Beregnung 2 und 3 war es genau umgekehrt. Die Analyse des Berechnungsfehlers des österreichischen Standorts RO stellte ein ganz anderes Bild dar. Hier ähnelten sich alle errechneten k-Werte sowohl zueinander als auch bezüglich der Ausgangsbasis.

Zusammenfassend kann man also sagen, dass vor allem mit dem PESERA k-Wert, der ja nur einen Wert anstelle von 88 repräsentiert, die schlechtesten Ergebnisse erzielt wurden.

Damit nun ersichtlich wird wie der Berechnungsfehler sich auf eine Erosionsrate bezieht wurden nun fiktive Annahmen über Boden, Abfluss und Hangneigung erstellt. Die Exponenten m und n wurden wiederum fixiert, kalibriert wurde über k. Folgende k-Werte wurden für die Analyse ausgewählt: Der von PESERA für den Bodentyp M vorgeschlagene Wert 10 und zwei fiktive Annahmen mit den Werten 8 und 12. Auch hier wurde von drei Beregnungen ausgegangen. Die Ergebnisse zeigten, dass je größer die Abflussmengen sind umso größer auch die Abweichungen in absoluten Zahlen sind. Relativ gesehen bleibt der Berechnungsfehler aber gleich.

Die Hypothese *„Bei jeder gemittelten Kalibrierung entsteht ein Berechnungsfehler“* kann daher ebenfalls verifiziert werden.

9.2 Diskussion der Validierungsergebnisse

Jenes Kapitel befasst sich nochmals mit der Überprüfung des Modells anhand gemessener Werte, besondere Beachtung wird der Erodibilität k geschenkt. Außerdem werden PESERA auch die Modelle USLE und MUSLE gegenübergestellt.

9.2.1 Diskussion des Vergleichs der gemessenen Werte mit den PESERA Werten

Der erste Schritt der Validierung von PESERA hatte zum Ziel, die tatsächlich gemessenen Abtragsraten mit den Prognosen von PESERA zu vergleichen. Zu berücksichtigen ist hier, dass die Anwendung auf Plotgröße, für ein Einzelereignis und auf einer Fläche ohne Vegetation stattgefunden hat. Aufgrund dieser Tatsachen wurde das 3-Stufen-Modell von PESERA stark vereinfacht, da einige Prozesse wegfielen. Nur Phase 2 wurde in Betracht gezogen.

Bei den beiden ungarischen Standorten HU3 und HU4 überschätzte PESERA die gemessenen Werte, wobei vor allem bei HU3 zu bemerken ist, dass nach jeder weiteren Berechnung die Erosionsmengen sowie die Überschätzung durch das Modell zunahmen. HU4 zeigte mit 15 bis 22 Tonnen Abtrag pro Hektar enorme Erosion an.

Die italienischen Testflächen IT5 und IT6 wiesen im Gegensatz zu den ungarischen Standorten ein niedriges Erosionslevel mit 1,2 bis 2,4 Tonnen pro Hektar auf. Das liegt vor allem an der geringen Hangneigung von 0,5 Prozent. Bezüglich der Prognose von PESERA ist zu sagen, dass das Modell vor allem für IT6 ausgezeichnete Vorhersagen getroffen hat. Bei IT5 unterschätzte PESERA vor allem die erste Berechnung, wobei bedacht werden muss, dass dort allgemein das Erosionslevel sehr niedrig ist und sich daher die absoluten Werte nicht großartig unterscheiden.

Auch die österreichischen Standorte RI4 und RI5 wiesen niedrige Erosionsraten von maximal 0,9 Tonnen pro Hektar auf. Die Prognosen des Modells fielen vor allem für RI4 hervorragend aus. Auch die Abträge der drei Berechnungen für den österreichischen Standort RO wurden von PESERA zufriedenstellend vorhergesagt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass PESERA's Vorhersagen und die tatsächlich gemessenen Werte mit einem r^2 von 0,91 einen sehr hohen Zusammenhang aufweisen. Die Hypothese „Die Erosionsmenge der Plots kann mit dem Modell PESERA vorhergesagt werden“ wird ebenfalls verifiziert.

9.2.2 Diskussion der Ergebnisse der Erodibilität der einzelnen Berechnungen

Als zweiten Punkt der Validierung wurde ein bestimmter Parameter der Grundgleichung für jede einzelne Berechnung, nämlich der Erodibilitätsfaktor k , welcher ja auch zur Kalibrierung verwendet wurde, analysiert. Hier soll geklärt werden ob die Richtungsänderungen des k -Wertes ausschlaggebend für Abtrags- und Abflussraten sind.

Besonders auffällig waren die extrem hohen k -Werte für die beiden italienischen Standorte und für HU4. Dort kam es auch zu extremen Schwankungen der Erodibilität. Die restlichen vier Standorte wiesen kaum Änderungen bezüglich der Erodibilität im Laufe der

Berechnungen auf. Die Spannweite der Werte war sehr gering. Die Werte jener Testflächen befanden sich auf niedrigem Niveau. Was jedoch für alle gilt ist die Tatsache, dass der k-Wert unabhängig vom Ausgangsniveau bei der zweiten Berechnung absank und bei der dritten Simulation entweder gleich blieb oder wieder leicht anstieg. Eine weitere Erkenntnis war die Tatsache, dass zwischen der Erodibilität und den Abtrags- beziehungsweise Abflussraten keinerlei Zusammenhang bestand. Die Annahme: *„Die Erodibilität, sprich Anfälligkeit des Bodens gegenüber Erosion, beeinflusst sowohl Abtrags- als auch Abflussraten“* muss daher falsifiziert werden.

9.2.3 Diskussion des Vergleichs der PESERA Erodibilitäten mit den USLE Erodibilitäten

Im nächsten Validierungskapitel wurde auf den Vergleich der PESERA Erodibilitäten mit den Erodibilitäten der USLE eingegangen. Zu diesem Zweck wurden die Abtragsraten für die USLE kalkuliert und vor allem der k-Wert genauer betrachtet.

Die absoluten k-Werte der beiden Modelle konnten natürlich nicht übereinstimmen, da sie ja unterschiedlich berechnet wurden. Jedoch sollte die Tendenz der Werte begutachtet werden. Die Spannweite fiel für die PESERA k-Werte, die zwischen 3 und 50 lagen, bedeutend größer aus als für die entsprechenden USLE Werte mit einer Spanne von 0,41 bis 0,67. Bei jenen Standorten wo PESERA hohe k-Werte angab waren auch die USLE Erodibilitäten hoch. Noch deutlicher wird diese Tendenz durch das Bestimmtheitsmaß r^2 mit einem Wert von 0,63 ausgedrückt, was einen recht guten Zusammenhang darstellt. Zu beachten ist allerdings, dass nur ein Datenpunkt pro Standort zur Verfügung stand und die Analyse daher auf sieben Werten beruhte.

Die Hypothese: *„Der Erodibilitätsparameter der Modelle USLE und PESERA tendiert in die gleiche Richtung“* konnte verifiziert werden.

9.2.4 Diskussion des Vergleichs der USLE-Werte mit den PESERA-Werten

Als nächstes wurde nun die gesamte USLE Gleichung mit PESERA verglichen, bzw. ihre beiden Abtragsprognosen. Da die USLE nur pro Standort und nicht pro Berechnung Vorhersagen treffen kann wurden die PESERA Erosionsraten der einzelnen Simulationen über einen Standort gemittelt. Das heißt, es gibt wiederum nur sieben Datenpunkte. Nach grafischer Darstellung erkannte man einen Zusammenhang der Werte von 55 Prozent, ein r^2 von 0,55 wurde errechnet. Ersichtlich durch die Steigung der Geraden wurde vor allem, dass die USLE Raten durch die PESERA Werte überschätzt wurden, was nun zu folgenden Überlegungen führte: Überschätzen auch die tatsächlich gemessenen Abtragsraten die USLE?

Die Annahme „*Das Modell USLE liefert ähnliche Abtragsraten wie PESERA*“ musste falsifiziert werden.

9.2.5 Diskussion des Vergleichs der USLE-Werte mit den gemessenen Werten

Dieser Überlegung wurde daher im nächsten Schritt nachgegangen. Man muss allerdings bedenken, dass die USLE in den USA entwickelt worden ist und es fraglich ist ob das Modell auch für europäische Böden gute Vorhersagen treffen kann. Des Weiteren ist die Tatsache wichtig, dass die USLE nicht kalibriert werden kann. Eine Anpassung an die lokalen Gegebenheiten ist daher nicht möglich. Das Ergebnis der Analyse zeigte wie erwartet ein ähnlich schlechtes Ergebnis wie beim Vergleich mit PESERA. Lediglich ein r^2 von 0,56 wurde erreicht, auch hier fand eine Überschätzung der USLE durch die gemessenen Werte statt. Gründe für die schlechten Prognosen könnten die oben genannten Faktoren sein aber auch, dass die USLE sich auf die Vorhersage von durchschnittlich jährlichen Raten spezialisiert und es sich hier um ein Einzelereignis handelt. Die Hypothese „*Der Modellansatz USLE prognostiziert die tatsächlichen gemessenen Bodenabträge genauer als PESERA*“ wird daher falsifiziert.

9.2.6 Diskussion des Vergleichs der MUSLE-Werte mit den gemessenen Werten

Um mit der USLE noch bessere Abtragsergebnisse zu erzielen wurde auch noch die MUSLE mit den Eingangsdaten kalkuliert. Die MUSLE stellt eine modifizierte, verbesserte Version der USLE dar. Der r-Faktor der empirischen Grundgleichung wurde verbessert indem man zur Berechnung das Abflussvolumen und die maximale Abflussmenge jeder einzelnen Berechnung hinzuzog. Daher konnten nun statt der sieben Datenpunkte (für jeden Standort einen) 88 in die Kalkulation mit einfließen. Das Ergebnis war dementsprechend besser. Ein r^2 von 0,75 wurde erzielt. Es wurde allerdings eine leichte Unterschätzung der MUSLE Werte durch die tatsächlich gemessenen Werte festgestellt. Die Annahme „*Das Erosionsmodell MUSLE, welches eine verbesserte Version der USLE darstellt, optimiert die von dem ursprünglichen Ansatz berechneten Abtragsmengen*“ wurde verifiziert.

Zusammenfassend zur Überprüfung des Modells kann man sagen, dass PESERA für einzelne Regensimulationen auf Plotgröße, wo brachliegendes Ackerland vorherrscht, nach eingehender Kalibrierung hervorragende Prognosen abliefert.

9.3 Mögliche Perspektiven

Die Zukunftsaussichten für das Modell PESERA sind vielfältig und optimistisch. Wie bereits in Kapitel 3.2.2 angesprochen soll das Modell im Rahmen der EU Bodenrahmenrichtlinie Eingang finden und für ganz Europa Prognosen sowie mögliche Klima- und Landnutzungsszenarien abgeben. Nur anhand ausreichender Validierungen in ganz Europa von einzelnen Plots über Staaten bis ganz Europa ist es möglich, das Modell zu verbessern und weiterzuentwickeln.

Laut Kirkby et al. (2000) liegt das größte Potential zur Verbesserung des Modells in genaueren Klimadaten, die bisher nur gegen Kosten von nationalen meteorologischen Archiven zu bekommen sind. Außerdem wären präzisere Angaben über Bodenparameter notwendig. Dieses Problem sehen Kirkby et al. (2000) zur Zeit allerdings als nicht lösbar. Derzeit wird das Modell daher nur mit einer Auflösung von einem Kilometer für ganz Europa angewendet. Man erhofft sich durch detailliertere Daten Ergebnisse mit einer Auflösung von 250 Metern oder genauer für bestimmte Gebiete zu erhalten.

Ein weiteres Augenmerk wird von Kirkby et al. (2004) anhand weltweit verfügbarer Datensätze auf eine globale Anwendbarkeit mit einer Auflösung von zehn Kilometern gelegt. In einer neuesten Entwicklung wurde PESERA auf Europas Nachbargebiete, zum Beispiel auf den südlichen und östlichen Mittelmeerraum, angewendet. Abbildung 9.1 zeigt die für jenen Raum geschätzten jährlichen Erosionsraten in Tonnen pro Hektar.

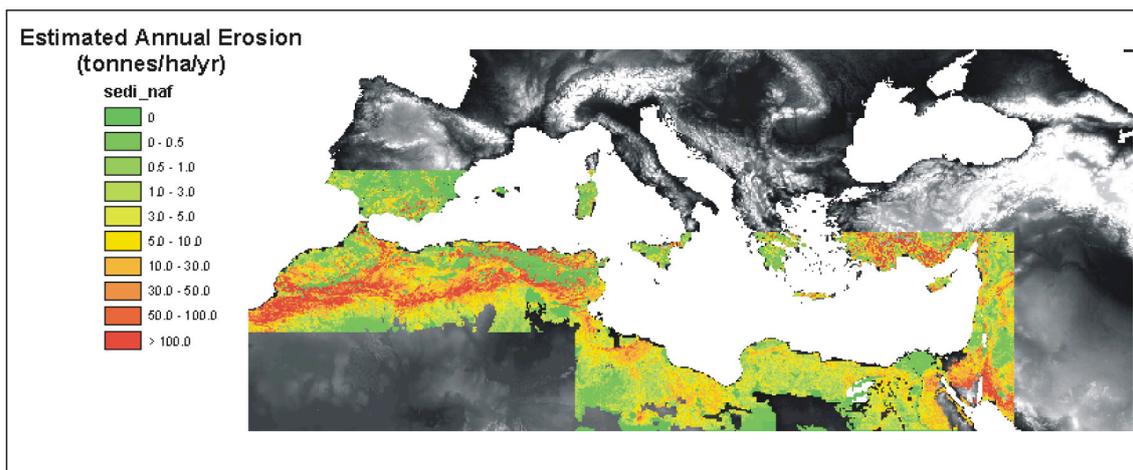


Abb. 9.1: Geschätzte jährliche Erosionsraten für den südlichen und östlichen Mittelmeerraum
Quelle: PESERA Map 2004

Neben umfangreichen Validierungen sollen auch die Kalibrierungen, sprich Anpassungen des Modells an lokale Gegebenheiten, verbessert werden. Eine intensive Kalibrierung über verschiedenste Parameter ist notwendig um herauszufinden, welche Faktoren für welche Standorte am besten geeignet sind. Dadurch können Bodenabträge noch genauer vorhergesagt werden.

Eine weitere Zukunftsperspektive wäre die Anwendung von PESERA für einzelne Niederschlagsereignisse. In jenem Fall würde Phase 3, die Integration der täglichen Erosionsraten mit täglichen Regenmengen über eine Häufigkeitsverteilung um langfristige durchschnittliche Erosionsraten zu erhalten, entfallen. Interessant wäre das vor allem für die sehr erosionsgefährdeten mediterranen Räume Europas. Es ergibt sich allerdings das Problem, dass PESERA entwickelt wurde um Bodenabtrag anhand von Rillen- und Interrillenerosion zu berechnen. Der dominante Abtragungsprozess in mediterranen Ländern stellt jedoch Gullyerosion dar.

Des Weiteren müsste die Berechnung im ArcGIS bzw. Microsoft Excel verändert werden, da dort nur Eingangsdaten auf monatlicher Basis eingetragen werden können.

10. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit analysiert das Bodenerosionsmodell PESERA hinsichtlich ihrer Prognose- und Anpassungsfähigkeiten. Erosionsmodelle sind im Zuge der heute vor allem in Europa sehr rasant zunehmenden Verstädterung nicht mehr wegzudenken. Gerade das in Europa 2004 von Kirkby et al. entwickelte prozessbasierte PESERA Modell wird hinsichtlich Klima- und Landnutzungsszenarien für große Gebiete als sehr zukunftssträftig erachtet. Im Rahmen jener Studie soll geklärt werden, ob der Ansatz zufriedenstellende Abtragsprognosen auf Plotgröße für einzelne Regensimulationen liefert, ob das Modell zuvor kalibriert werden muss und in welcher Hinsicht der Faktor Erodibilität in der Modellgleichung Einfluss hat. Des Weiteren wird PESERA mit den beiden empirischen Modellen USLE und MUSLE bezüglich Gesamtabträge und Erodibilitätswerte verglichen um herauszufinden, welcher der drei Ansätze die genauesten Erosionsraten kalkuliert.

Das heutige Ausmaß der antropogenen Bodenerosion ist Besorgnis erregend. Pimental et al. (1995) schätzen, dass Europa jährlich 17 Tonnen pro Hektar Bodenverlust in Kauf nehmen muss. Die Hauptfaktoren, die Bodenabtrag bedingen, sind Klima, Boden, Topographie und Landnutzung. Laut Toy et al. (2002) hat die Landnutzung mehr Effekt auf Erosion als jeder andere der drei Faktoren.

Die Vorgänge, die währenddessen stattfinden gliedert Morgan (2005) in einen 2-Phasen Prozess: Die Ablösung und den Transport. Die Deposition gehört für ihn nicht mehr zum unmittelbaren Erosionsprozess.

Um jene Vorgänge besser verstehen und deren Auswirkungen genauer abschätzen zu können begann man Bodenerosion zu modellieren. Ausgehend von den USA begannen Wissenschaftler zu Beginn der 1940er erste mathematische Gleichungen zu entwickeln um Bodenverlust darzustellen. Während der nachfolgenden Jahrzehnte entstanden zwei Hauptrichtungen: Die empirischen und die physikalisch basierenden Ansätze. Das in der Studie verwendete Erosionsmodell PESERA gliedert sich in die zweite Gruppe ein. Die Entscheidung, jenen Ansatz auszuwählen hing unter anderem von Faktoren wie Einfachheit in der Anwendung, verfügbare Eingangsdaten, Genauigkeit, Kosten und Anerkennung des Modells in der Wissenschaft, ab.

Das Konzept des prozessbasierten Modells PESERA, welches die Fähigkeit hat Bodenerhaltungsstrategien vorzuschlagen, gliedert sich in drei Phasen: Ein Speicher-grenzwertmodell, ein Potenzgesetz für den Sedimenttransport und eine Schätzung für langfristig durchschnittliche Erosionsraten. Für die Diplomarbeit war nur Phase 2 wichtig, da die im Rahmen des Projekts DESPRAL erhaltenen Datensätze von einmaligen Regen-

simulationen in drei EU-Mitgliedstaaten stammten, die auf zehn Quadratmeter großen Plots ohne Vegetation durchgeführt worden sind. Die Berechnung des Modells erfolgte daher nicht, wie von Irvine und Kosmas (2003) vorgeschlagen, im ArcGIS oder Microsoft Excel, sondern anhand der Statistiksoftware SPSS.

Jene Regensimulationen fanden in den alpinen Randgebieten von Österreich, Ungarn und Italien statt. Die Geologie der drei Standorte gestaltete sich recht einheitlich, alle befanden sich in der Molassezone. Die Böden der Versuchsflächen wiesen große Unterschiede auf. Am erosionsanfälligesten stellten sich die Bodentypen der beiden ungarischen Standorte heraus, die italienischen Böden entsprachen Fluvisole, welche aus fluviatilen, marinen oder lakrustinen Ablagerungen entstanden sind.

Den ersten der beiden praktischen Teile der Diplomarbeit stellte die Kalibrierung des Erosionsmodells dar. Nach eingehenden Analysen konnte festgestellt werden, dass der Parameter k , der die Erodibilität repräsentiert, sich am Besten zur Kalibrierung eignet. Des Weiteren wurde noch auf den Berechnungsfehler hingewiesen, der bei jeder Kalibrierung entsteht und es konnte festgestellt werden, dass er am größten war als der vom Modell vorgeschlagene Erodibilitätswert von 10 verwendet wurde.

Die eigentliche Überprüfung von PESERA erfolgte im Rahmen der Validierung. Dort wurde ein Vergleich der tatsächlich gemessenen und der prognostizierten Werte hergestellt. Die Analyse wies ein zufriedenstellendes Ergebnis mit einem Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,91 auf. Das bedeutet, dass 91 Prozent der gemessenen Werte richtig, im relativen Sinne, von PESERA vorhergesagt wurden. Anschließend wurde auf die Erodibilität k genauer eingegangen und man kam zu dem Schluss, dass jener Faktor auf Abfluss- und Abtragsraten keinen eindeutig in eine Richtung gehenden Effekt hat.

Im nächsten Schritt wurde ermittelt ob zwischen dem Erodibilitätsparameter von PESERA und dem der USLE ein Zusammenhang bestand. Diese Annahme konnte verifiziert werden. Abschließend erfolgte ein Vergleich ob die USLE bessere Abträge prognostiziert als PESERA und man kam zu dem Schluss, dass dies bei einem r^2 von 0,56, wahrscheinlich aufgrund der Entwicklung der USLE in den USA und den fehlenden Kalibrierungsmöglichkeiten, nicht der Fall war. Um zu untersuchen ob die USLE, die laufend weiterentwickelt wurde, Fortschritte gemacht hat, wurden auch noch Abträge mit einer modifizierten Version, nämlich der MUSLE, berechnet und es wurde festgestellt, dass sich das Ergebnis mit einem r^2 von 0,75 wesentlich verbessert hat.

Die abschließende Diskussion der Ergebnisse ergab sowohl verifizierte als auch falsifizierte Hypothesen. Bestätigt werden konnten die Annahmen, dass PESERA Erosionsraten auf Plotgröße prognostizieren kann, dass eine Kalibrierung eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse einbrachte und dass die MUSLE bessere Prognosen liefert als die USLE.

Falsifiziert wurden unter anderem die Hypothesen, dass der Parameter Erodibilität Abtrags- als auch Abflussraten beeinflusse und dass die USLE gleich gute Prognosen wie PESERA bietet.

Die Perspektiven für das Erosionsmodell PESERA sind vielfältig und optimistisch. Kirkby et al. (2004) wollen zukünftig den Ansatz global anwenden, die Auflösung wird dadurch zwar erniedrigt, der Informationsgewinn wäre jedoch enorm. Vor allem weitere Validierungen und präzisere Datensätze aus nationalen Archiven würden die Prognosequalität des Modells weiter steigern.

11. Summary

The indicted diploma theses analyses the soil erosion model PESERA with focus on prediction and calibration possibilities. Erosion models become more and more important because of the rapid urbanization in Europe these days. In 2004 the process-based PESERA model was developed by Kirkby et al. This model seems to be very prospective for wide areas concerning climate and land use scenarios. In this study hypotheses such as “does PESERA deliver satisfying erosion predictions for single rain simulations on plot scale” or “does a model calibration optimise the results” or “does the erodibility parameter influence model equation” will be verified or rather falsified. In addition PESERA is going to be compared to the two empirical models USLE and MUSLE.

Today's degree of man-made soil erosion is alarming. Pimental et al. (1995) estimates that in Europe annually 17 tons per hectare soil loss occur. The main factors which cause soil erosion are climate, soil, topography and land use. Toy et al. (2002) assume that land use has more effect to erosion than all the others have.

The procedure which occurs splits Morgan (2005) in a 2-stage process: Detachment and transport. For him deposition is not part of the erosion process.

For better understanding these processes and their impact soil erosion modelling developed in the 1940s. Science started to generate simple mathematical equations for representing soil erosion in the USA. During the next decades two trends occurred: The empirical and the physically-based models. PESERA is part of the latter. The decision which approach should be chosen for this study depended on factors like simplicity of application, availability of input parameters, accuracy, costs and further more.

The concept of PESERA is classified in three phases: A storage threshold model, a power law to estimate sediment transport and an estimation to calculate long-term average erosion rates. For the diploma thesis only phase 2 was important, because data was collected from bare and small plots where one single rain simulation was performed. Calculation of PESERA occurred therefore with the statistic software SPSS.

Rain simulations were arranged in the alpine borderland of Austria, Hungary and Italy. Geology of those three sites was uniform, all of them were located in the molasse zone. However the soil types of the locations were very different.

The first of the two practical parts of the diploma thesis describes calibration of the soil erosion model PESERA. Accurate analyses identified parameter k , which represents the

erodibility, fitting best for calibration. Furthermore a discussion of the calculation error, that arises when calibration is necessary, took place. Results showed that this error is biggest for the value which had been chosen from the model developers.

Afterwards validation of PESERA followed. A comparison of measured and predicted values proceeded. The result was that the coefficient of determination r^2 with a value of 0,91 presented a good model output. That means that 91 percent of the measured values were appropriate predicted. Thereafter the erodibility k was focused. No correlation between erodibility and runoff and erosion rates was detected.

The next step was to analyse if there is a correlation between the erodibility parameter of PESERA and USLE. This hypothesis could be verified.

In addition the study wanted to find out if the USLE calculates more precise erosion rates than PESERA. The determination coefficient r^2 showed a value of 0,56. This bad model output can possibly be explained because of the development of the model in USA and the missing calibration possibilities. But there had been many progresses to enhance the USLE. One of this progresses was the modified USLE, the so called MUSLE. The results of the modified version showed a much better prediction with a r^2 of 0,75.

The concluding discussion showed verified as well as falsified hypotheses. The assumptions that PESERA is able to predict erosion rates on plot scale, that a calibration is a great improvement and that MUSLE delivers better results than the USLE could be approved.

The hypotheses that the erodibility has influence on runoff and erosion rates and that the USLE calculates similar predictions like PESERA had to be falsified.

The perspectives for the erosion model PESERA are manifold and optimistic. Kirkby et al. (2004) force a global application of the approach in the future. Reduction of data resolution must be accepted, but an enormous amount of information would be gained. Further validations and more accurate datasets from national archives would enhance the prediction quality of the model.

Literaturverzeichnis

Al-Durrah, M.M. und J.M. Bradford (1981): New methods of studying soil detachment due to water drop impact. *Soil Science Society of America Journal* 45. 949-953.

Auerswald, K. (1998): Bodenerosion durch Wasser. In: Richter, G. (Hrsg.): *Bodenerosion. Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 33-42.

Bissonais, Y. und J. Daroussin (2003): Validation of the PESERA model for the normandy area (France). In: *PESERA. Validation of the PESERA model at the regional scale*. 2-10.

Bork, H.-R. et al (1998): *Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa. Wirkung des Menschen auf Landschaften*. Klett-Phertes. Gotha.

Cruse, R.M. und W.E. Larson (1977): Effect of soil shear strength on soil detachment due to raindrop impact. *Soil Science Society of America Journal* 41. 777-781.

Chapman, G. (1948): Size of raindrops and their striking force at the soil surface in a red pine plantation. *Transactions of the American Geophysical Union* 29. 664-670.

de Ploey, J., M.J. Kirkby und F. Ahnert (1991): Hillslope erosion by rainstorms - a magnitude-frequency analysis. In: *Earth Surface Processes & Landforms* 16. 399-409.

El-Swaify, S.A. (1994): State of the art for assessing soil and water conservation needs and technologies. In: Napier, T.L., Camboni, S.M. and El-Swaify, S.A. (Hg.): *Adopting conservation on the farm. An international perspective on the socioeconomics of soil and water conservation*. Soil and Water Conservation Society. Ankeny. 13-27.

Europäische Umweltagentur EUA (2002): *Auf dem Boden der Tatsachen: Bodendegradation und nachhaltige Entwicklung in Europa - Eine Herausforderung für das 21. Jahrhundert*. In: *Umweltthemen-Serie, Nr. 16*. Kopenhagen.

Forster, F. et al (1995): *Diercke Weltatlas Österreich*. Westermann. Wien.

Gregory, K.J. und D.E. Walling (1973): *Drainage basin form and process*. John Wiley & Sons. London.

Govers, G., J. Poesen (1986): A field-scale study of surface sealing and compaction of loam and sandy loam soils. Teil 1. Spatial variability of surface sealing and crusting. In: Callebaut, F., D. Gabriels and M. De Boodt (Hg.): *Assessment of soil surface sealing and crusting*. Gent. 171-182.

Hjulström, F. (1935): Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyries. *Bulletin of the Geological Institute. University of Uppsala* 25. 221-527.

Huang, C., J.M. Bradford und J.H. Cushman (1982): A numerical study of raindrop impact phenomena. The rigid case. *Soil Science Society of America Journal* 46. 14-19.

Irvine B. und C. Kosmas (2007): PESERA. Pesera Users Manual.

IUSS Working Group (2008): World Reference base for Soil Resources 2006. Ein Rahmen für internationale Klassifikation, Korrelation und Kommunikation. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover.

Jackson, W.L., K. Gebhardt und B.P. van Haveren (o.J): Use of the modified universal soil loss equation for average annual sediment yield estimates on small rangeland drainage basins.

Jones, R.J.A. et al. (2003): Work Package 2: Nature and extent of soil erosion in Europe.
Kirkby, M.J. und N.J. Cox (1995): A climatic index for soil erosion potential (CSEP) including seasonal and vegetation factors. In: Catena 25. 333-352.

Kirkby, M.J. und B. Irvine (2001): PESERA RDI model. In: Gobin, A. und G. Govers: PESERA. First Annual Report.

Kirkby, M.J. et al. (2004): The PESERA Map. In: European Research Bureau (Hg.): Research Report Nr. 16.

Klaghofer, E. (1987): Das Oberflächenabflussverhalten landwirtschaftlich genutzter Böden bei Starkregen. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 28. 102-108.

Kosmas, C., P. Kosmopoulou, M. Tsara (2003): Validation of the PESERA model for the island of Lesbos (Greece). In: PESERA. Validation of the PESERA model at the regional scale. 2-10.

Krenmayr et al. (1999): Rocky Austria. Eine bunte Erdgeschichte von Österreich. Geologische Bundesanstalt. Wien.

Laflen, J.M. und W.C. Moldenhauer (2003): Pioneering soil erosion prediction. The USLE story. World Association of Soil & Water Conservation. Special Publication Nr. 1.

Leopold, L.B., M.G. Wolman und J.P. Miller (1964): Fluvial processes in geomorphology. Freeman. San Francisco.

Meyer, L.D und W.H. Wischmeier (1969): Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Transactions American Society Agricultural Engineers 12. 754-758, 762.

Morgan, R.P.C. (1999): Bodenerosion und Bodenerhaltung. Enke. Stuttgart.

Morgan, R.P.C. (2005): Soil erosion and conservation. 3. Auflage. Blackwell Publishing. Cornwall.

Musgrave, G.W. (1947): The quantitative evaluation of factors in water erosion. A first approximation. In: Soil and Water Conservation Society (Hg.): Journal of Soil and Water Conservation 2: 133-138.

Oldeman, L.R. (1994): The global extent of land degradation. In: Greenland, D.J. and Szabolcs, I. (Hg.): Land Resilience and Sustainable Land Use. CABI. Wallingford. 99-118.

Pimental, D. et al. (1993): Soil erosion and agricultural productivity. In: Pimental, D. (Hg.): World's soil erosion and conservation. Cambridge University Press. Cambridge. 349.

Pimental, D. et al. (1995): Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. In: Science 267. 1117-1123.

Poesen, J. (1993): Gully topology and gully control measures in the European loess belt. In: Wicherek, S. (Hg.): Farmland erosion in temperate plains environment and hills. Elsevier. Amsterdam. 221-239.

Projekt DESPRAL (2000-2004): Excel Sheets der Datensätze.

Pudasaini, M.S. (2003): Erosion modelling under different land use management practices. Dipl.-Arb. Universität Westsydney.

Renard, K.G., L.D. Meyer und G.R. Foster (1996): Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Handbook Number 703. Washington.

Savat, J. (1982): Common and uncommon selectivity in the process of fluid transportation: field observations and laboratory experiments on bare surfaces. Catena Beiheft 1. 139-160.

Schwertmann, U., W. Vogl und M. Kainz (1987): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer. Stuttgart.

Strauss, P. et al. (2000): Rainfall simulation for outdoor experiments. In: Jamet, P. und J. Cornejo (Hg.): Current research methods to assess the environmental fate of pesticides. INRA Editions. 329-333.

Strauss, P. et al. (2007): Effect of repeated rainfall simulation on soil erosion, runoff and phosphorus transport. 5. International Congress of the European Society for Soil Conservation „Changing Soils in a Changing World: the Soils of Tomorrow“. 25.- 30.6.2007. Palermo.

Toy, T.J., G.R. Foster und K.G. Renard (2002): Soil Erosion. Processes, Prediction, Measurement, and Control. John Wiley & Sons, Inc. New York.

Van Rompaey, A.J. et al. (2003): PESERA. Model validation at the catchment scale.

Weischet W. und W. Endlicher (2000): Regionale Klimatologie. Die Alte Welt. Teubner. Stuttgart.

Wischmeier, W.H. und D.D. Smith (1978): Predicting rainfall erosion losses. In: USDA. Agricultural Research Service (Hg.): Agricultural handbook 537. Washington, DC.

Urulogie

Agriculture and Agri-Food Canada

http://sis.agr.gc.ca/cansis/taxa/landscape/slc_ontario.html [Zugriff: 18.03.2009]

Encyclopaedia Britannica

<http://www.britannica.com/EBchecked/topic-art/707510/19548/> [Zugriff: 17.03.2009]

Encyclopaedia Britannica

<http://www.britannica.com/EBchecked/topic-art/707616/19553/> [Zugriff: 18.03.2009]

European Soil Portal

http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/pesera/pesera_cd/sect_2_2.htm

[Zugriff: 15.05.2009]

Freie Universität Berlin

http://www.geo.fu-berlin.de/fb/e-learning/pg-net/themenbereiche/bodengeographie/bodentypen/terrestrische_boeden/rohboeden/index.html [Zugriff: 18.03.2009]

Google Maps

<http://maps.google.at/maps?hl=de&tab=wl> [Zugriff: 19.03.2009]

International Committee for Anthropogenic Soils

<http://clic.cses.vt.edu/icomanth/soil2.jpg> [Zugriff: 17.03.2009]

Iten, K.

<http://www.iten-online.ch/klima/europa/oesterreich/linz.htm> [Zugriff: 25.03.2009]

Mühr, B.

<http://www.klimadiagramme.de/Europa/turin.html> [Zugriff: 24.03.2009]

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)

<http://www.tll.de/verstola/content/home/modelle/modelltypen.html> [Zugriff: 18.01.2009]

United States Department of Agriculture (USDA)

<http://soils.usda.gov/technical/aids/investigations/texture/> [Zugriff: 23.04.2009]

Universität Freiburg

<http://www.geographie.uni-freiburg.de/ipg/forschung/ap1/bilder/acker.jpg> [Zugriff: 03.04.2009]

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Julia Kindlinger
Geb. Datum/Ort: 02.02.1984 / Wien
Familienstand: ledig
Wohnort: 1120 Wien, Arndtstraße 21-23/2/14
Staatsbürgerschaft: Österreich

Ausbildung:

1990 - 1994: Volksschule, Friesgasse 4, 1150 Wien
1994 - 2002: Realgymnasium, Friesgasse 4, 1150 Wien
Mai/Juni 2002: AHS Matura, Friesgasse 4, 1150 Wien
Okt. 2002 - Sept. 2004: 1. Studienabschnitt Diplomstudium Geographie und
Regionalforschung, Universität Wien, 1010 Wien
Okt. 2004 - Juni 2007: 2. Studienabschnitt, Diplomstudium Geographie und
Regionalforschung, Universität Wien, 1010 Wien
Studienzweig: Theoretische und Angewandte Geographie,
Schwerpunkt: Landschaftsökologie und Naturraumanalyse
März 2007 - April 2007: Praktikum an der ZAMG, Abteilung Klimatologie, 1190 Wien
Seit Sept. 2007: Arbeit an der Diplomarbeit zur Mag.^a rer. nat.
Thema: „Validierung des Erosionsmodells PESERA mittels
Ergebnissen aus Regensimulationen in drei EU-Mitgliedstaaten“
Sept. - Okt. 2008: Grafik und DTP Basislehrgang, Wifi Wien, 1190 Wien
Juni/Juli 2009: Voraussichtlicher Abschluss des Diplomstudiums

Ich versichere:

- dass ich die Diplomarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.
- dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Datum

Unterschrift