

Untersuchung der Wirkung
verschiedener Landnutzungen auf
Oberflächenabfluss und Bodenerosion mit
einem Simulationsmodell

Der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau
eingereichte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium

Dr. rer. nat.

vorgelegt

von Dipl.-Geoökologin Nicole Seidel
geboren am 31. Juli 1978 in Sebnitz

Freiberg, den 30. Juni 2008

VORWORT

Die vorliegende Arbeit begann im November 2004 mit dem vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie für 2 Jahre finanzierten Forschungsprojekt: „Landnutzung und Hochwasserschutz - Untersuchung der Wirkung verschiedener Landnutzungen auf den Oberflächenabfluss mit einem Simulationsmodell“, bei welchem zunächst nur der Abflussaspekt betrachtet wurde. Das für weitere 3 Monate gewährte Nachfolgeprojekt „Landnutzung und Wassererosion“ betrachtete dann zusätzlich den Landnutzungseinfluss auf die Erosion. Für die Betreuung der beiden Forschungsprojekte sowie der konstruktiven Diskussionen beim Anfertigen der Forschungsberichte möchte ich Herrn Dr. Bräunig herzlich danken.

Größter Dank gebührt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Jürgen Schmidt, der mir die Chance gegeben hat, diese Promotion „in anderen Umständen“ zu beginnen und diese dann mit kleinem Kind fortzusetzen, für mich jederzeit ein offenes Ohr hatte und mir beratend zu Seite stand.

Die umfangreichen Infiltrationsexperimente wurden in Zusammenarbeit mit sehr engagierten Studenten durchgeführt. Für diese Unterstützung danke ich Matthias Helbig, Stefan Bornkamp, Esther Diezel und Jiri. Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Matthias Helbig, dessen Diplomarbeit ich im Rahmen dieses Projektes betreute. Er leistete dabei einen großen Beitrag bei den Beregnungsversuchen, bei der Auswertung der Bodenprofile sowie der Durchführung der Laboranalysen.

Herrn Handschuh möchte ich ganz herzlich dafür danken, dass er für das letzte halbe Jahr für die Weiterfinanzierung meiner Doktorarbeit sorgte.

Herrn Dr. Michael von Werner danke ich für die ausgesprochen gute Zusammenarbeit bei den Forschungsprojekten, der vielen, vielen Arbeit bei der Weiterentwicklung des Modells EROSION 3D und der kritischen Durchsicht des Manuskripts.

Weiterhin danke ich...

Meinen MitdoktorandInnen Astrid Weigert, Constance Dörfel, Anne Schob und Marcus Schindewolf für die vielen konstruktiven Diskussionen,

Astrid Weigert, Constance Dörfel und Anne Schob für die Durchsicht des Manuskripts,

Monika Hahnewald für die Unterstützung bei den Laborarbeiten,

Meinem Sohn Bruno, der bei der Verfügbarkeit seiner Mama oft Abstriche machen musste und sich trotzdem zu einem liebenswerten, lebensfrohen und cleveren kleinen Jungen entwickelt hat,

Brunos Papa Jörg, Christine und Sabine, die sich immer liebevoll um Bruno kümmerten und mir damit Rücken frei gehalten haben,

Meinen Eltern für ihre Unterstützung in schweren Zeiten und vor allem, dass sie in der Endphase dieser Arbeit mit Bruno in den Urlaub gefahren sind,

Und ganz besonders meinem Vater, der mit mir die Befliegung der Untersuchungsgebiete durchgeführt hat, um Luftbilder für die Plausibilitätsprüfung des Modells EROSION 3D zu erstellen.

Freiberg, den 30.Juni 2008

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Historische Betrachtung	1
1.2	Motivation und Zielstellung	1
2	GRUNDLAGEN	5
2.1	Größen und Begriffe	5
2.1.1	Beschreibung von Starkregenereignissen	5
2.1.2	Niederschlagsüberschuss	5
2.1.3	Abfluss.....	5
2.1.4	Kumulativer Abfluss.....	6
2.1.5	Abflussbeiwert.....	6
2.1.6	Gebietsniederschlag.....	6
2.2	Prozesse und Ursachen von Abfluss und Erosion	7
2.2.1	Abfluss.....	7
2.2.2	Erosion.....	9
2.3	Einflussgrößen des Abflussgeschehens und der Bodenerosion.....	9
2.3.1	Allgemeine Einflussgrößen	9
2.3.2	Landnutzungsspezifische Einflussgrößen.....	12
3	MODELLE ZUR BERECHNUNG VON ABFLUSS UND EROSION	24
3.1	Überblick.....	24
3.2	Modellauswahl.....	28
3.3	Das Simulationsmodell EROSION 3D.....	29
3.3.1	Anwendungsbereiche.....	29
3.3.2	Aufbau	30
3.3.3	Erosionsmodell.....	31
3.3.4	Infiltrationsmodell	36
3.3.5	Ein- und Ausgabeparameter	43
3.3.6	Datenbankprozessor.....	46

4	UNTERSUCHUNGSGEBIETE	47
4.1	Lage und räumliche Ausdehnung.....	47
4.2	Naturräumliche Einordnung.....	47
4.3	Relief.....	48
4.4	Geologie	49
4.5	Klima.....	49
4.6	Böden	49
4.7	Landnutzung.....	50
5	METHODEN	52
5.1	Datengrundlagen	52
5.1.1	Basisdaten.....	52
5.1.2	Erstellung der Landnutzungskarten	58
5.1.3	Verschneidung der Bodenkarten.....	60
5.1.4	Erstellung der Elementarflächenkarten.....	61
5.2	Szenarien.....	62
5.2.1	Landnutzungsszenarien	63
5.2.2	Niederschlagsszenarien	64
5.2.3	Anfangsbodenfeuchten und Simulationszeitpunkte.....	65
5.2.4	Szenarienkombinationen der statistischen Extremereignisse	66
5.2.5	Szenarienkombinationen des realen Extremereignisses	66
5.3	Experimentelle Untersuchungen	66
5.3.1	Beregnungsversuche.....	67
5.3.2	Probenahme und Laboranalysen.....	70
5.3.3	Ableitung modellspezifischer Parameter aus den Experimenten.....	70
5.4	Parametrisierung der modellspezifischen Eingabegrößen.....	73
5.4.1	Datenquellen.....	73
5.4.2	Schichtenbezogene Parametrisierung	75
5.4.3	Konkrete Parameterwerte	77
5.4.4	Räumliche Verteilung der Parameter.....	79
5.4.5	Ausgabeoptionen zur Darstellung der Simulationsergebnisse.....	81
5.5	Verfahren zur Bestimmung der Abflusswirksamkeit eines Starkregenereignisses	83
5.6	Curve-Number-Verfahren	85

6	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	88
6.1	Experimentelle Ergebnisse.....	88
6.1.1	Infiltrationskurven.....	88
6.1.2	Skinfaktoren.....	89
6.1.3	Lagerungsdichten.....	91
6.1.4	C _{org} -Gehalte.....	92
6.2	Modellergebnisse.....	93
6.2.1	Statistische Niederschlagsereignisse.....	93
6.2.2	Reales Ereignis 2002.....	110
6.2.3	Vergleich der Ergebnisse zwischen Ein-Schicht und Mehr-Schichten-Ansatz von EROSION 3D...	115
6.2.4	Plausibilitätsbetrachtungen.....	116
6.2.5	Schlussfolgerungen.....	121
7	ZUSAMMENFASSUNG.....	125
8	ABSTRACT.....	131
9	SYMBOLE UND EINHEITEN.....	132
10	QUELLENVERZEICHNIS.....	135
	ANHANG.....	1
A 1	Profilaufnahmen der Beregnungsstandorte.....	152
A 2	Infiltrationskurven der Beregnungsstandorte.....	154
A 3	Bedeckungsgrade der Ackerkulturen.....	157
A 4	Parametrisierung UG Klatschbach.....	158
A 5	Beispieldatensatz Eingabeparameter EROSION 3D.....	159
A 6	Ergebnisse der Abfluss- und Erosionsprognosen.....	160
A 6.1	Modellergebnisse UG Klatschbach.....	160
A 6.2	Modellergebnisse UG Oberreichenbach.....	164

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1	Die Komponenten des Wasserkreislaufs (aus Strobel & Zunic 2006).....	7
Abb. 2	Abflusskomponenten (aus Strobel & Zunic 2006)	8
Abb. 3	Abhängigkeit der Erodierbarkeit von der Korngröße (aus Richter 1998).....	11
Abb. 4	Abflauschema der durch EROSION 3D erfassten Abfluss- und Abtragsprozesse. Die mit * bezeichneten Komponenten sind optional bzw. bei der Langfristsimulation (Niederschlagsreihe) anwendbar, grau: Hydrologie, braun: Erosion (Quelle: von Werner 2004).....	31
Abb. 5	Infiltrationskurve eines geschichteten Bodens unter Angabe der relevanten schichtenbezogenen Parameter.....	42
Abb. 6	Übersichtskarte der Untersuchungsgebiete Klatschbach und Oberreichenbach, eingeordnet in die Karte der Bodenregionen und -landschaften Sachsens (SLfUG 2005).	47
Abb. 7	Reliefdarstellungen der Untersuchungsgebiete auf Grundlage der mittels Laserscan erstellten Digitalen Geländemodelle (Fa. Milan 2004). Oberreichenbacher Bach (links) und Klatschbach (rechts).	48
Abb. 8	Verteilung der Bodentypen im UG Oberreichenbach nach BKKonz (SLfUG 2004a).	49
Abb. 9	Verteilung der Bodentypen im UG Klatschbach nach BKKonz (SLfUG 2004a)....	49
Abb. 10	Landnutzungs- und Ackerfruchtanteile [%] im UG Oberreichenbach, Prozentangaben auf Grundlage der digitalisierten Landnutzungskarten basierend auf ATKIS DLM (LVerMA 2004), InVeKos Feldblockdaten (SMUL 2004) und Orthophotos (LVerMA 2002).	50
Abb. 11	Landnutzungs- und Ackerfruchtanteile [%] im UG Klatschbach, Prozentangaben auf Grundlage der digitalisierten Landnutzungskarten basierend auf (LVerMA 2004), InVeKos Feldblockdaten (SMUL 2004) und Orthophotos (LVerMA 2002).	51
Abb. 12	Ausschnitt des Laserscanner DGM's UG Oberreichenbach (Fa. Milan 2004), Auflösung 1 m.....	53
Abb. 13	Ausschnitte des auf 5 m Auflösung umgerechneten und geglätteten DGM's, UG Oberreichenbach.....	53
Abb. 14	Subregionen Sachsens hinsichtlich des Starkniederschlages, Einordnung der Untersuchungsgebiete (blaue Pfeile) in Subregion 7, nördliches UG: Klatschbach, südliches UG: Oberreichenbacher Bach (verändert nach Michael 2000, Quelle Landnutzungsdaten: ATKIS DLM, LVerMA 2004).	54
Abb. 15	Bodenartenverteilung nach Reichsbodenschätzung (SLfUG 2004b) im UG Oberreichenbach.	55
Abb. 16	Bodenartenverteilung nach Bodenkonzeptkarte (SLfUG 2004a) im UG Oberreichenbach.	55
Abb. 17	Bodenartenverteilung nach Reichsbodenschätzung (SLfUG 2004b) im UG Klatschbach.	55
Abb. 18	Bodenartenverteilung nach Bodenkonzeptkarte (SLfUG 2004a) im UG Klatschbach.	55
Abb. 19	UG Oberreichenbach, Landnutzungsverteilung 2004.....	59

Abb. 20	UG Klatschbach, Landnutzungsverteilung 2004.....	59
Abb. 21	Verschnittene Bodenarten-Information der digitalen Reichsbodenschätzung (RBS, SLfUG 2004b) und der Konzeptbodenkarte (BKkonz, SLfUG 2004a) für die Untersuchungsgebiete Oberreichenbach (links) und Klatschbach (rechts).....	60
Abb. 22	Elementarflächenkarten der Realnutzungszustände 2004 der UG's Oberreichenbach (links) und Klatschbach (rechts), jede Farbe repräsentiert eine Kombination aus Boden- und Landnutzungsart.....	61
Abb. 23	Eingangsinformation und Zielparameter des Datenbankprozessors.....	62
Abb. 24	Intensitätsverläufe der statistischen Starkregenereignisse unterschiedlicher Jährlichkeiten (Michael et al. 1996).....	64
Abb. 25	Intensitätsverlauf des realen Ereignisses 2002. Niederschlagsmesstation Talsperre Saidenbach. Quelle: SLTV (2002).....	65
Abb. 26	Standorte der Beregnungsversuche in den Untersuchungsgebieten Oberreichenbach (links) und Klatschbach (rechts) basierend auf Orthophotos (LVermA 2002).....	67
Abb. 27	Aufbau der Kleinberegnungsanlage.....	69
Abb. 28	Beispielhafte Darstellung der Ableitung von horizontbezogenen Skinfaktoren auf Grundlage der experimentell gemessenen Infiltrationskurven (UG Klatschbach, Standort 18 Grünland).....	72
Abb. 29	Räumliche Verteilung der Parameter am Beispiel Oberreichenbach im Mai, konventionelle Bewirtschaftung, hohe Anfangsbodenfeuchte.....	80
Abb. 30	Räumlich differenzierte Darstellung des ereignisbezogenen Niederschlagsüberschusses zum Ende des 50 jährigen Starkregenereignisses (konventionelle Bewirtschaftung, hohe Anfangsbodenfeuchte, Mai, UG Oberreichenbach.....	82
Abb. 31	Räumlich differenzierte Darstellung des kumulativen Oberflächenabflusses für ein Gesamt ereignis (50 jähriges Niederschlagsereignis konventionelle Bewirtschaftung, hohe Anfangsbodenfeuchte, Mai, UG Oberreichenbach.....	82
Abb. 32	Überschreitungshäufigkeiten der Niederschlagsintensität am Beispiel des 50 jährigen Extremereignisses der Subregion 7 sowie Bestimmung des Flächeninhaltes F unterhalb der Kurve.....	83
Abb. 33	Darstellung der Abflusswirksamkeit in Abhängigkeit der Jährlichkeit für die vier ausgewählten Starkregenereignisse der Subregion 7.....	84
Abb. 34	Beispiele für typische Verläufe der Infiltrationskurven unter Laubwald (Standort 2), Nadelwald (Standort 8) und Grünland (Standort 4).....	88
Abb. 35	Skinfaktoren der A-Horizonte (unter Angabe der Spannweiten) beider Untersuchungsgebiete für Grünland (GL) Laubwald (LW) und Nadelwald (NW), ermittelt aus den Experimenten.....	89
Abb. 36	Skinfaktoren der B-/M-Horizonte (unter Angabe der Spannweiten) beider Untersuchungsgebiete für Grünland (GL) Laubwald (LW) und Nadelwald (NW), ermittelt aus den Experimenten.....	90
Abb. 37	Mittlere Lagerungsdichten der Grünland (GL), Laub - (LW) und Nadelwaldstandorte (NW), beider Untersuchungsgebiete.....	91
Abb. 38	Mittlere Corg-Gehalte der Grünland (GL), Laub- (LW) und Nadelwald- Standorte (NW) beider Untersuchungsgebiete.....	92

Abb. 39	Ergebnisse der Abflussprognoseberechnungen für die UG's Klatschbach (oben) und Oberreichenbach (unten) bei Unterstellung mittlerer (links) und hoher Anfangsbodenfeuchte (BF) (rechts).	93
Abb. 40	Abflussbeiwerte Klatschbach in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte.	95
Abb. 41	Abflussbeiwerte Klatschbach in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit bei hoher Anfangsbodenfeuchte.	95
Abb. 42	Abflussbeiwerte Oberreichenbach in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte.	95
Abb. 43	Abflussbeiwerte Oberreichenbach in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit bei hoher Anfangsbodenfeuchte.	95
Abb. 44	Einfluss der Anfangsbodenfeuchte auf den Abflussbeiwert in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit am Beispiel der konservierenden Bewirtschaftung, UG Klatschbach.	97
Abb. 45	Einfluss der Landnutzung auf den Abflussbeiwert in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit am Beispiel der konservierenden und konventionellen Bewirtschaftung, UG Klatschbach, mittlere Anfangsbodenfeuchte.	97
Abb. 46	Einfluss des Simulationszeitpunktes auf den Abflussbeiwert am Beispiel des 100- und des 5 jährigen Ereignisses im UG Klatschbach für die Szenarien konservierend (kons) und konventionell (konv) bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte.	98
Abb. 47	Räumliche Verteilung der Niederschlagsüberschüsse im UG Oberreichenbach, Grünland / Direktsaat 50 jähriges Ereignis, mittlere Anfangsbodenfeuchte.	99
Abb. 48	Räumliche Verteilung der Bodenarten im UG Oberreichenbach mit den Standorten P1, P2 und P3.	99
Abb. 49	Verteilung der Niederschlagsüberschüsse im UG Klatschbach, konventionelle Bewirtschaftung, Mai, hohe Anfangsbodenfeuchte unter Einbeziehung der Bodenkarte (verkleinerte Abbildung), 100 jähriges Extremereignis.	100
Abb. 50	Kumulierter Oberflächenabfluss im UG Klatschbach für das Szenario "konservierende Bewirtschaftung", 100 jähriges Ereignis, mittlere Anfangsbodenfeuchte.	101
Abb. 51	Ergebnisse der Erosionsberechnungen für die UG's Klatschbach (oben) und Oberreichenbach (unten) bei Unterstellung mittlerer (links) und hoher Anfangsbodenfeuchte BF (rechts).	102
Abb. 52	Bodenabtrag in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit, UG Klatschbach, bei mittlerer und hoher Anfangsbodenfeuchte (BF).	103
Abb. 53	Bodenabtrag in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit, UG Oberreichenbach, bei mittlerer und hoher Anfangsbodenfeuchte (BF).	103
Abb. 54	Erosionsprognosekarte für konventionelle Bewirtschaftung, UG Klatschbach, 100 jähriges Ereignis, Mai, mittlere Anfangsbodenfeuchte.	104
Abb. 55	Fehlender Pufferstreifen im Süden des UG Klatschbach, direkter Sedimenteintrag in den Vorfluter.	105
Abb. 56	Wirkung des Pufferstreifens im Norden des UG Klatschbach. Der schwarze Pfeil kennzeichnet die Depositionsflächen.	105

Abb. 57	Einfluss der Fruchtart im UG Klatschbach, Simulationszeitpunkt Mai, konservierende Bewirtschaftung, 100 jähriges Ereignis, mittlere Anfangsbodenfeuchte.....	106
Abb. 58	Einfluss der Fruchtart im UG Klatschbach, Simulationszeitpunkt August, konservierende Bewirtschaftung, 100 jähriges Ereignis, mittlere Anfangsbodenfeuchte.....	107
Abb. 59	Einfluss des Simulationszeitpunktes auf den Bodenabtrag bezogen auf das Gesamteinzugsgebiet am Beispiel des 100- und des 5 jährigen Ereignisses im UG Klatschbach für die Szenarien konservierend (kons) und konventionell (konv) bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte.....	107
Abb. 60	Sediment-Massenstrom in einer Erosionsrinne (Ausschnitt s. Abb. 57) am Beispiel des Szenarios konservierend 100 jähriges Ereignis, mittlere Feuchte, UG Klatschbach, Mai.....	108
Abb. 61	Erosionsprognosekarte Grünland / Direktsaat 100 jähriges Ereignis, mittlere Anfangsbodenfeuchte.....	109
Abb. 62	Reduzierung der Bodenerosion durch Umstellung der Bodenbearbeitung bzw. durch Landnutzungsänderungen am Beispiel des UG Klatschbach, 100 jähriges Extremereignis, hohe Anfangsbodenfeuchte.....	110
Abb. 63	Kumulierter Oberflächenabfluss im Vergleich zum Gebietsniederschlag unter Angabe der Abflussbeiwerte für das UG Klatschbach.....	111
Abb. 64	Kumulierter Oberflächenabfluss im Vergleich zum Gebietsniederschlag unter Angabe der Abflussbeiwerte für das UG Oberreichenbach.....	111
Abb. 65	Verlauf der Oberflächenabfluss- Ganglinien für die Szenarien „Konventionell“ und „Wald“ im Vergleich zur gefallen Gebietsniederschlagsmenge (Ausschnitt des Hochwasserereignisses 2002, Station Talsperre Saidenbach) UG Oberreichenbach.....	112
Abb. 66	Vergleich der Abflussbeiwerte des realen Ereignisses 2002 mit denen der statistischen Extremereignissen in Abhängigkeit der Nutzung für das UG Klatschbach.....	113
Abb. 67	Vergleich der Abflussbeiwerte des realen Ereignisses 2002 mit denen der statistischen Extremereignisse in Abhängigkeit der Nutzung für das UG Oberreichenbach.....	113
Abb. 68	Ergebnisse der Erosionsberechnungen für das reale Hochwassereignis 2002 in Abhängigkeit der Bewirtschaftungsweise für das UG Klatschbach (links) und das UG Oberreichenbach (rechts).....	114
Abb. 69	Vergleich der Abflussbeiwerte des 20 jährigen und des realen Ereignisses 2002 bei Anwendung des Ein-Schicht- und des Mehr-Schichten-Ansatzes von EROSION 3D für UG Oberreichenbach, konservierende Bewirtschaftung.....	115
Abb. 70	Vergleich der Bodenabträge des 20 jährigen und des realen Ereignisses 2002 bei Anwendung des Ein-Schicht- und des Mehr-Schichten-Ansatzes von EROSION 3D für UG Oberreichenbach, konservierende Bewirtschaftung.....	115
Abb. 71	UG Klatschbach: Gegenüberstellung der mit dem Curve Number Verfahren und EROSION 3D berechneten nutzungsabhängigen Abflussbeiwerte, bezogen auf drei verschiedene Starkregenereignisse.....	117

Abb. 72	UG Oberreichenbach: Gegenüberstellung der mit dem Curve Number Verfahren und EROSION 3D berechneten nutzungsabhängigen Abflussbeiwerte bezogen auf drei verschiedene Starkregenereignisse (Bodengruppe B)	118
Abb. 73	Ergebnis des Methodenvergleichs bei Zuordnung von Bodengruppe A.....	118
Abb. 74	Verifizierung der Erosionsprognosekarte durch Vergleich mit einem Luftbild. Übersichtskarte mit betreffendem Ausschnitt (oben). Gegenüberstellung Luftbild Erosionsprognosekarte, Szenario konventionell, Mai, mittlere Anfangsbodenfeuchte (unten). Foto: Seidel 2008.	120
Abb. 75	Vergrößerte Darstellung der Erosionserscheinungen im Südosten des UG Oberreichenbach. Foto: Seidel 2008.....	121
Abb. 76	Vergleich der gemessenen und angepassten Infiltrationskurve für einen durch Hydrophobizität gekennzeichneten Nadelwaldstandort (Standort 14 UG Klatschbach).....	122
Abb. 77	Vergleich der Abflussbeiwerte bei Unterstellung einer geringen Anfangsbodenfeuchte (\leq PWP) für UG Oberreichenbach, 50 jähriges Extremereignis.....	123

ANHANG

Abb. 78	Bodenprofile der Beregnungsstandorte im UG Oberreichenbach (Quelle: Helbig 2007)	152
Abb. 79	Bodenprofile der Beregnungsstandorte im UG Oberreichenbach (Quelle: Helbig 2007)	152
Abb. 80	Infiltrationskurven der Beregnungsstandorte auf Grünland (links: UG Oberreichenbach, rechts: UG Klatschbach)	154
Abb. 81	Infiltrationskurven der Beregnungsstandorte unter Laubwald (links UG Oberreichenbach, rechts: UG Klatschbach)	155
Abb. 82	Infiltrationskurven der Beregnungsstandorte unter Nadelwald (links: UG Oberreichenbach, rechts: UG Klatschbach)	156

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1	Überblick wichtiger* Erosionsmodelle (erweitert nach J. Schmidt 1996).....	24
Tab. 2	Ein- und Ausgabeparameter von EROSION 3D.....	43
Tab. 3	Abhängigkeiten der modellspezifischen Parameter von verschiedenen Einflussgrößen.....	44
Tab. 4	Kenndaten der im Rahmen des Vorhabens durch Beregnungsversuche untersuchten Wald- und Grünlandstandorte.....	68
Tab. 5	Datenquellen für die schichtbezogenen Parametrisierung der Modellgrößen in Abhängigkeit der Nutzung.....	76
Tab. 6	Wertebereiche der Bodenparameter in Abhängigkeit der Nutzung (UG Oberreichenbach).....	78
Tab. 7	Abflusswirksamkeiten verschiedener statistischer Starkregenereignisse (Subregion 7).....	84
Tab. 8	Auszug der CN-Werte in Abhängigkeit von Bodengruppe und Nutzung für Boden- feuchteklasse II (verändert nach Maniak 2005).....	86
Tab. 9	Einfluss der Bodenart auf den Niederschlagsüberschuss bei unterschiedlichen Nutzungen am Beispiel des 50 jährigen Extremereignisses (Abflusswirksamkeit 5.03 mm/min) und hoher Anfangsbodenfeuchte (UG Oberreichenbach).....	99
Tab. 10	Kurzcharakterisierung der Beregnungsstandorte.....	153

ANHANG

Tab. 11	Bedeckungsgrade der Ackerkulturen bei konventioneller Bewirtschaftung bezüglich der Simulationszeitpunkte (Quelle: Parameterkatalog Sachsen, Michael et al. 1996).....	157
Tab. 12	Wertebereiche der Parameter in Abhängigkeit der Nutzung (UG Klatschbach).....	158
Tab. 13	Beispiel eines Eingabeparameterdatensatzes für EROSION 3D.....	159
Tab. 14	Modellergebnisse Klatschbach, Mai, mittlere Anfangsbodenfeuchte.....	160
Tab. 15	Modellergebnisse Klatschbach, Mai, hohe Anfangsbodenfeuchte.....	161
Tab. 16	Modellergebnisse Klatschbach, August, mittlere Anfangsbodenfeuchte.....	162
Tab. 17	Modellergebnisse Klatschbach, August, hohe Anfangsbodenfeuchte.....	163
Tab. 18	Modellergebnisse Oberreichenbach, Mai, mittlere Anfangsbodenfeuchte.....	164
Tab. 19	Modellergebnisse Oberreichenbach, Mai, hohe Anfangsbodenfeuchte.....	165
Tab. 20	Modellergebnisse Oberreichenbach, August, mittlere Anfangsbodenfeuchte...	166
Tab. 21	Modellergebnisse Oberreichenbach, August, hohe Anfangsbodenfeuchte.....	167

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A	Direktabfluss
AG Boden	Arbeitsgemeinschaft der Geologischen Landesämter Deutschlands
ATKIS	Amtliches Topographisch- Kartographisches Informationssystem
BF	Anfangsbodenfeuchte
Bk _{konz}	Konzeptbodenkarte 1: 50.000
BTK	Biotoptypenkartierung
CIR	Coloured Infrared Karte
CN	Curve-Number
C _{org}	Organischer Kohlenstoffgehalt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOP	Digitales Orthophoto
DPKS	Digitaler Parameterkatalog Sachsen (Quelle hierfür ist der PKS)
DWD	Deutscher Wetterdienst
DVWK	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
EU WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
EZG	Einzugsgebiet
FKS	Forstliche Standortkartierung
GIS	Geoinformationssystem
GL	Grünland
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
Jh.	Jahrhundert
KA4 / KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung 4. bzw. 5. Auflage
KB	Klatschbach
K _f -Wert	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, bzw. Endinfiltrationsrate
Ld	Lagerungsdichte
LN	Landnutzung
LVermA	Landesvermessungsamt
LVerGeo	Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt
nFK	nutzbare Feldkapazität
M %	Masse %
MW	Mittelwert
N-A-Modell	Niederschlags-Abfluss-Modell
NS	Niederschlagsereignis bzw. Starkregenereignis
ORB	Oberreichenbach
P	Niederschlag

PKS	Parameterkatalog Sachsen
PNV	Potentiell natürliche Vegetation
SCS	Soil Conservation Service
SLfL	Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
SLfUG	Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
SLTV	Landestalsperrenverwaltung Sachsen
SMUL	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
UG	Untersuchungsgebiet
USLE	Universal Soil Equation
V %	Volumen %
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WW	Winterweizen

Modellbezeichnungen

AGNPS	AGricultural Non-Point Source pollution model
ANSWERS	Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response System
CATFLOW	Catchment Flow
CREAMS	Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems
dUSLE	Differentiated USLE
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator
EUROSEM	EUROpean Soil Erosion Model
LISEM	Limburg Soil Erosion Model
KINEROS	KINematic EROsion Simulation
MUSLE87	Modified USLE 1987
OPUS	Advanced simulation model for nonpoint source pollution transport
RUSLE	Revised USLE
SHE	Systeme Hydrologique Europeen
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
USLE	Universal Soil Equation
WEPP	Water Erosion Prediction Project

1 Einleitung

1.1 Historische Betrachtung

Die Problematik von Hochwasser- und Erosionsereignissen ist seit Menschengedenken bekannt. Die Rekonstruktion solcher Ereignisse in historischer Zeit zeigt, dass entsprechende Katastrophen verstärkt einsetzten, nachdem der Mensch etwa im 7. Jhd. mit umfangreichen Waldrodungen begonnen hatte, um den Anteil landwirtschaftlich nutzbarer Flächen zu erhöhen. (*KARL 1981, BORK 1988, WITTE ET AL. 1996, BORK ET AL. 1998, BREBURDA & RICHTER 1998*). Diese Maßnahmen führten tendenziell zu einem signifikanten Anstieg in der Häufigkeit und dem Ausmaß von Hochwasser- und Bodenerosionsereignissen, wobei sich die katastrophalsten Ereignisse wahrscheinlich im frühen 14. Jh. ereigneten. Der Waldanteil betrug zu dieser Zeit nur noch etwa 15 %.

VOGT (1958) gibt einen Überblick über die seit Mitte des 17. Jh. existierenden Quellen zur historischen Bodenerosion in Sachsen und Thüringen, in denen die verheerenden Ausmaße beschrieben werden. So wird zum Teil von Abträgen des Bodens bis Pflugtiefe berichtet. Ebenso von Wasserrissen, die so breit waren, dass man sie nicht übersteigen konnte. Insgesamt hat der durch den Menschen bedingte Landnutzungswandel von den frühmittelalterlichen walddominierten Landschaften über die ausgeräumten waldarmen Agrarlandschaften des 14. Jh. bis hin zu den heutigen, mäßig bewaldeten Agrarlandschaften den Wasserhaushalt Mitteleuropas nachhaltig verändert und mit zunehmendem landwirtschaftlichen Flächenanteil zu tendenziell mehr Abfluss geführt (*BORK 1988*).

1.2 Motivation und Zielstellung

In den letzten Jahrzehnten kam es in Mitteleuropa verstärkt zu Hochwasser- und Erosionsereignissen. Insbesondere das Augusthochwasser 2002 in Sachsen führte vor Augen, welches immense Schadensausmaß eine solche Naturkatastrophe anrichten kann, der auch Menschenleben zum Opfer fielen. Die Gesamtschadenssumme des Hochwassers wird mit über 1 Mrd € beziffert (*SLFUG 2004*). Die Schäden wurden dabei durch das Wasser selbst sowie durch die mitgeführten Schlamm Massen, welche auf Erosionsprozesse in den Einzugsgebieten zurückzuführen sind, verursacht.

Aber nicht nur Ereignisse im Katastrophenmaßstab, sondern auch kleinere, häufig wiederkehrende Starkregenereignisse ziehen erhebliche Schäden nach sich. Hier sind insbesondere infolge von Erosionsprozessen verursachte Schäden, die sich in „Onsite“- und

„Offsite“-Schäden differenzieren lassen, zu nennen (J. SCHMIDT 1996, CRAMER 2000, FRIELINGHAUS ET AL. 2000, RICHTER 1998). Bei den so genannten „Onsite“-Schäden handelt es sich vor allem um die Reduzierung der Ertragsfähigkeit, aufgrund des ständigen Verlustes an Boden und Humus und der Verringerung der Wasserspeicherkapazität. Bezüglich der Offsite-Schäden ist vor allem der Eintrag partikelgebundener Nähr- und Schadstoffe in Oberflächengewässer, die maßgeblich zur Eutrophierung und Toxifizierung dieser Gewässer beitragen, von Bedeutung. Ferner entstehen hohe Aufwendungen zur Freihaltung von Gerinnen und wasserbaulichen Anlagen.

Wie aus der historischen Betrachtung (Kapitel 1.1) hervorgeht, steht das Ausmaß der durch Hochwasser- und Erosion ausgelöster Schäden in einem engen Zusammenhang mit der jeweiligen Nutzung und Bewirtschaftung der Einzugsgebiete.

Um diesen Zusammenhang genauer untersuchen zu können, werden bereits seit längerer Zeit Abfluss- und Abtragsmessungen auf Einzugsgebiets- oder Testparzellenebene durchgeführt (s. Kapitel 2.3.2). Dies ist jedoch nur begrenzt möglich, da Starkregenereignisse momentan noch vergleichsweise selten auftreten und die Erfassung der Wasser- und Stoffflüsse mit einem sehr hohen messtechnischen Aufwand verbunden ist. Die andere Möglichkeit besteht darin, Modelle einzusetzen, welche die genannten Prozesse, insbesondere in Abhängigkeit von Landnutzung und Bewirtschaftungsverfahren, abbilden und quantifizieren können.

Die vorliegende Arbeit basiert auf der Anwendung des Modells EROSION 3D auf zwei unbeobachtete Teileinzugsgebiete der Striegis in Sachsen. Erstmals eingesetzt wurde dabei die Mehr-Schichten-Version des Modells, welche die Quantifizierung des Einflusses unterschiedlicher Landnutzungszustände (konventionelle bzw. konservierende Bewirtschaftung, Direktsaat, Grünland und Wald) auf den oberflächlichen Abfluss und den damit verbundenen Bodenabtrag bei variierbarer Niederschlagsintensität, -dauer und Anfangsbodenfeuchte erlaubt.

Konkret sollen mit Hilfe des Modells folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Kann durch eine veränderte Landnutzung Einfluss auf Oberflächenabfluss und Erosion genommen werden?
- In welchem Maße wirken sich Nutzungsänderungen bei sonst gleichen Ausgangsbedingungen aus?
- In wieweit trägt konservierende Bewirtschaftung bzw. Direktsaat im Vergleich zur konventionellen Bewirtschaftung zur Abfluss- und Erosionsminderung bei?
- In welchem Bereich variieren diese Unterschiede in Abhängigkeit von Niederschlagsintensität und -dauer sowie Anfangsbodenfeuchte?
- Welchen Einfluss besitzt dabei die Bodenart?

Wesentliches Anliegen der vorliegenden Arbeit ist es darüber hinaus, die für den vorbeugenden Hochwasser- und Erosionsschutz (entsprechend EU Wasserrahmenrichtlinie, Wasserhaushaltsgesetz und Cross Compliance Regelungen) notwendigen Informationsgrundlagen, hier für zwei ausgewählte Einzugsgebiete, zu verbessern.

Ein wesentlicher Aspekt liegt dabei auf der Erhöhung des flächenhaften Niederschlags-Rückhaltes. Dies bedeutet, dass der Entstehung von Hochwässern bereits an ihrem Entstehungsort entgegengewirkt wird, in dem man die Landnutzung so ausrichtet, dass ein möglichst hohes Wasservolumen in den Boden infiltriert. Aufgrund des hohen Anteils land- und forstwirtschaftlichen Flächen in Deutschland, kommt diesen bei der Erhöhung der Niederschlagsretention eine Schlüsselrolle zu. Nachfolgend sind einige konkrete Maßnahmen des dezentralen Hochwasser- und Erosionsschutzes genannt (*SLFL 2006*).

Maßnahmen der Forstwirtschaft

- Erhaltung und Pflege vorhandener Wälder,
- Aufforstung und Wiederbewaldung mit standortgerechten Gehölzen in Hochwasserentstehungsgebieten,
- Umbau unzureichend strukturierter Forstflächen hin zu standortgerechten Wäldern mit vielschichtigen Baumarten und Alterstrukturen,
- Wiederherstellung von Auenwäldern.

Maßnahmen der Landwirtschaft

- Umstellung der Bewirtschaftung auf konservierende Anbauverfahren bzw. Direktsaat,
- Umnutzung besonders abflusswirksamer bzw. erosionsanfälliger Ackerflächen in Grünland- oder Waldflächen,
- Gliederung der Landschaft durch abflusshemmende Strukturelemente, z.B. begrünte Tiefenlinien.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich hinsichtlich der genannten Hochwasser- und Erosionsschutzmaßnahmen auf folgende Schwerpunkte:

- Wiederbewaldung (Szenario Wald).
- Umstellung der Bewirtschaftung auf konservierende Bewirtschaftung (Szenario „konservierend“).
- Umstellung der Bewirtschaftung auf Direktsaat bzw. Umwidmung der Ackerflächen in Grünland (Szenario Grünland / Direktsaat).

Ziel der Arbeit ist es darüber hinaus, die neu entwickelte Mehr-Schichten-Version des Infiltrationsmodells von EROSION 3D unter Praxisbedingungen zu testen, mögliche Fehler

zu identifizieren und so zusammen mit den Modellentwicklern (J. Schmidt und M. von Werner) zur Verbesserung und Fehlerbereinigung des Modells beizutragen.

Hierbei soll auch getestet werden, ob der Mehr-Schichten-Ansatz in Anbetracht des hohen Parametrisierungsaufwandes unter Praxisbedingungen sinnvoll eingesetzt werden kann und inwieweit es dabei möglich ist, mit vorhandenen und experimentell gewonnenen Daten die schichtenbezogene Parametrisierung durchzuführen. Hierfür wurden in Ergänzung zum Parameterkatalog Sachsen (*MICHAEL ET AL. 1996*) experimentelle Untersuchungen in den Untersuchungsgebieten durchgeführt.

2 Grundlagen

2.1 Größen und Begriffe

Da die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe und Größen nicht immer konsistent zum hydrologischen Sprachgebrauch sind, werden diese, um Missverständnissen vorzubeugen, nachfolgend erläutert.

2.1.1 Beschreibung von Starkregenereignissen

Die Beschreibung von Starkregenereignissen erfolgt gewöhnlich mit Hilfe der Parameter *Niederschlagssumme* (Niederschlagshöhe), *Dauer* (Zeit, die das Niederschlagsereignis bis zur nächsten Unterbrechung andauert) und *maximale Niederschlagsintensität*.

In der Hydrologie werden Starkregenereignisse häufig durch die *Wiederkehrwahrscheinlichkeit* (Jährlichkeit) charakterisiert. Dies ist die mittlere Zeitspanne in Jahren, in der die angegebene Starkniederschlagshöhe einmal erreicht wird (*DVWK 1991*).

2.1.2 Niederschlagsüberschuss

Der in vorliegender Arbeit verwendete Begriff Niederschlagsüberschuss [mm] bezeichnet den Anteil des Niederschlages einer Elementarfläche (bezogen auf das entsprechende Starkregenereignis), der nicht in den Boden infiltriert, sondern zum Oberflächenabfluss beiträgt. Dies kann infolge von Infiltrationsüberschuss, bei welchem die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate des Bodens überschreitet und Sättigungsüberschuss, welcher aufgrund der ausgeschöpften Speicherkapazität des Bodens resultiert, geschehen.

2.1.3 Abfluss

Unter Abfluss wird in der vorliegenden Arbeit, soweit nicht ausdrücklich anders definiert, immer der Oberflächenabfluss verstanden, da sich die Abflussberechnungen von EROSION 3D ausschließlich auf diese Abflusskomponente beziehen.

2.1.4 Kumulativer Abfluss

Als kumulativer Abfluss wird in dieser Arbeit das Wasservolumen [m³] bezeichnet, welches im Laufe des Ereignisses eine bestimmte Rasterzelle überströmt hat.

2.1.5 Abflussbeiwert

Der Abflussbeiwert [%] ist der Niederschlagsanteil des Gebietsniederschlags, welcher nicht im Einzugsgebiet zurückgehalten wurde. In der vorliegenden Arbeit bezieht sich dieser Wert im Zusammenhang mit EROSION 3D allein auf die Oberflächenabfluss-Komponente.

2.1.6 Gebietsniederschlag

Der Gebietsniederschlag [m³] ist die auf die Fläche des Einzugsgebietes bezogene Niederschlagsmenge.

2.2 Prozesse und Ursachen von Abfluss und Erosion

2.2.1 Abfluss

In Abb. 1 sind die Kenngrößen des Wasserhaushaltes dargestellt. Wie groß der Anteil des Niederschlages, der oberflächlich abfließt, ist, hängt nach Abzug der Anfangsverluste allein von der Infiltration ab. Diese ist ihrerseits abhängig von meteorologischen Einflussgrößen (insbesondere Niederschlagsintensität, -menge und -dauer), den Bodenkennwerten (Porenvolumen, Bodenstruktur und -feuchte), der Geländeneigung sowie landnutzungsspezifischer Einflussgrößen (Art des Bewuchses, Bodenbearbeitungsintensität)

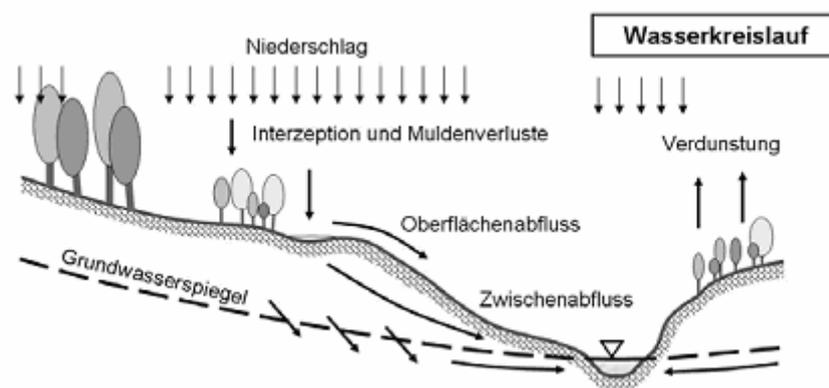


Abb. 1 Die Komponenten des Wasserkreislaufs (aus STROBEL & ZUNIC 2006).

Mit dem Einsetzen des Regenereignisses kommt es dann zur **Abflussbildung**, wenn der Interzeptions- und Muldenspeicher gefüllt ist und die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate des Bodens übersteigt. Bei weiterem Andauern des Regenereignisses füllt sich der Bodenspeicher allmählich auf und die Infiltrationsrate erreicht ihr Minimum (Endinfiltrationsrate). Ist der Bodenspeicher vollständig gefüllt, ist die Infiltrationsrate nur noch eine Funktion der Leitfähigkeit des Grundwasserabstromes. Wird diese weiterhin von der Niederschlagsintensität überschritten, kommt es zu Sättigungsflächenabfluss.

Abfluss bildet sich dann, wenn die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate des Bodens übersteigt (Infiltrationsüberschuss, HORTON 1933) oder wenn der Boden infolge von Sättigung nicht mehr in der Lage ist, Wasser aufzunehmen (Sättigungsflächenabfluss, HEWLETT & HIBBERT 1967, DUNNE & BLACK 1970).

Bei dem Prozess der **Abflusskonzentration** wird der zunächst flächenmäßig verteilte, abflusswirksame Niederschlag aufgrund von lateralen Fließvorgängen, welche auf der Landoberfläche oder im Boden stattfinden, zum nächsten Vorfluter geleitet (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996). Dabei fließt das Wasser auf der Landoberfläche als Oberflächenabfluss, in

der ungesättigten Bodenzone als Zwischenabfluss und im Bereich der gesättigten Bodenzone als Grundwasserabfluss (bzw. Basisabfluss) ab.

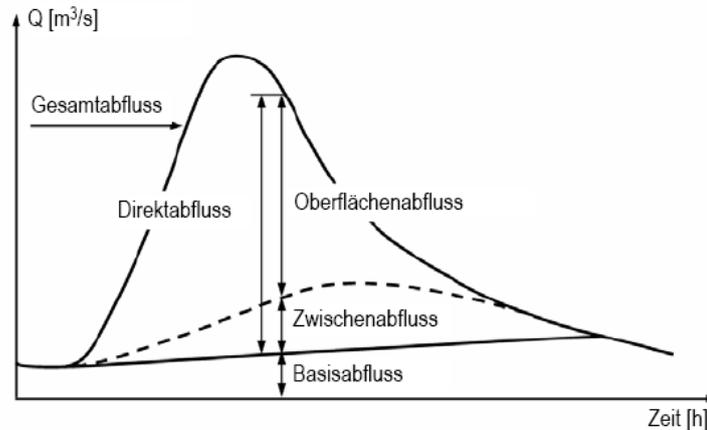


Abb. 2 Abflusskomponenten (aus STROBEL & ZUNIC 2006).

In Abb. 2 sind die Komponenten einer Abflussganglinie im Hochwasserfall dargestellt. Der Gesamtabfluss setzt sich aus Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss zusammen. Der Direktabfluss besteht aus Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss.

Unter **Oberflächenabfluss** wird der Anteil des Wassers verstanden, welcher flächenhaft auf den Landoberflächen abfließt (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996). Er spielt eine Schlüsselrolle bei der Entstehung von Hochwasser, da er den Oberflächengewässern unmittelbar (geringe Verzögerungszeit) über die Landoberfläche zufließt (STROBEL & ZUNIC 2006).

Als **Zwischenabfluss**, hypodermischer Abfluss bzw. Interflow wird der laterale Wassertransport in der ungesättigten Zone bezeichnet. Er kann sowohl durch laterale Flüsse des Makroporensystems, als auch als Mikroporendurchfluss entstehen. Die Fließprozesse des Makroporensystems zeigen im Vergleich zum Mikroporensystem oft sehr kurze Fließzeiten und können daher direkt im Anschluss von Niederschlägen zum Gerinneabfluss beitragen, jedoch mit deutlicher Verzögerung zum Oberflächenabfluss (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996). Nach STROBL & ZUNIC (2006) erreicht dieser Teil des Niederschlages den Vorfluter meist noch bevor das Hochwasser abgeklungen ist. Die Voraussetzungen für die Bildung von Zwischenabfluss sind erst dann gegeben, wenn die Feldkapazität überschritten wird. Zwischenabfluss findet vorwiegend oberflächennah im Bereich von Berghängen statt (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996). Besonders schnell und bedeutend ist dieser Abfluss, wenn ein Boden hoher Durchlässigkeit (skelettreich, Makroporen) über einer gering durchlässigen Schicht lagert (ZUIDEMA 1985).

2.2.2 Erosion

Unter Erosion wird in der vorliegenden Arbeit die Bodenerosion durch Wasser verstanden. Erosion lässt sich in zwei Teilprozesse, Ablösung und Transport, unterteilen.

Zusammengefasst nach *BREBURDA & RICHTER (1998)* lassen sich diese Prozesse wie folgt beschreiben. Bei trockenem Bodenzustand dominiert mit Einsetzen des Niederschlages die Aggregatzerstörung infolge von Luftsprengung. Mit zunehmender Befeuchtung der Bodenoberfläche verliert dieser Aspekt an Bedeutung und die Zerstörung von Aggregaten setzt sich durch das Aufprallen von Regentropfen (Splash Effekt) weiter fort. Die so abgelösten Bodenpartikel werden mit dem Oberflächenabfluss in Bodenporen geschwemmt und verstopfen diese, so dass es zur Verschlammung der Bodenoberfläche kommt. Mit einher geht eine Verringerung der Infiltration, womit sich der oberflächlich abfließende Niederschlagsanteil erhöht. Mit zunehmender Schichtdicke des Oberflächenabflusses nimmt die Wirkung des Splash Effektes ab.

Den Transport der abgelösten Bodenpartikel übernimmt der Oberflächenabfluss. Mit sinkender Transportkapazität, z.B. infolge eines Nutzungswechsels (Rauheitsanstieg) und Verringerung der Abflussgeschwindigkeit kommt es zur Sedimentation der mitgeführten Partikel, wobei zunächst die größten Bodenpartikel (Kiese, Sande) zur Deposition kommen, während die kleinsten Partikel (Tonpartikel) am weitesten transportiert werden und damit als letztes zur Sedimentation gelangen.

2.3 Einflussgrößen des Abflussgeschehens und der Bodenerosion

Da Bodenerosion nur dann entstehen kann, wenn es zur Bildung von Oberflächenabfluss kommt, stehen beide Prozesse in engem Zusammenhang. Entsprechend werden sie von den gleichen Faktoren beeinflusst. Diese lassen sich in allgemeine und landnutzungsspezifische Einflussgrößen unterteilen und werden nachfolgend erläutert.

2.3.1 Allgemeine Einflussgrößen

2.3.1.1 Geologie

Die geologischen Bedingungen eines Einzugsgebietes beeinflussen vor allem das Abflussverhalten des unterirdischen Wassers. Insbesondere die Mächtigkeit der Deckschichten sowie die Art des Grundwasserleiters (Poren-, Kluft- und Karstgrundwasserleiter, nach *HÖLTING 1996*) sind ausschlaggebend für den Abfluss.

Während Kluft –bzw. Karstgrundwasserleiter im Zusammenhang mit geringen Deckschichten zu einer Verschärfung der Hochwassersituation führen, wirken sich Porengrundwasserleiter in Verbindung mit mächtigen Deckschichten dämpfend auf die Abflussbildung aus (*SRU 1998*).

2.3.1.2 Relief

Der Einfluss des Reliefs hinsichtlich des Abflusses besteht darin, dass mit zunehmender Hanglänge der kumulative Abfluss und mit zunehmender Hangneigung die Geschwindigkeit des Abflusses steigt.

Der Erosionsprozess setzt bereits bei geringen Neigungen ein, steigt mit zunehmender Hangneigung deutlich an (*J. SCHMIDT 1996*). Die ausgeprägtesten Erosionserscheinungen findet man dort, wo hohe Abflussmengen mit steilem Gefälle zusammentreffen. Dies ist besonders im unteren Bereich konvexer Hänge der Fall (*RICHTER 1998*).

2.3.1.3 Bodenart

Das Infiltrationsvermögen der Böden wird maßgeblich von der Durchlässigkeit und der Speicherfähigkeit bestimmt, die ihrerseits vor allem von der Bodenart abhängig ist. Dabei besitzen besonders Ton und Schluffböden eine deutlich geringere Durchlässigkeit und damit generell auch ein geringeres Infiltrationsvermögen als sandige Böden. Bei diesen Böden kann sich jedoch das Infiltrationsvermögen durch sekundäre Poren (Schrumpfrisse, Regenwurm- und Wurzelgänge) temporär erhöhen (*SCHACHTSCHABEL ET AL. 1998*).

Auf landwirtschaftlichen Flächen führt eine hohe Verschlammungsneigung (Schluffböden) zu herabgesetzten Infiltrationsraten. Das gleiche gilt für Verdichtungen infolge von Feldbefahrungen mit schweren Maschinen, bei gleichzeitig geringer Strukturstabilität der Böden.

In Bezug auf die Erosion spielt vor allem die Korngrößenverteilung eine entscheidende Rolle. Abb. 3 verdeutlicht dabei den Zusammenhang zwischen Korngröße, Ablösbarkeit und Transportierbarkeit der Bodenpartikel. Daraus geht hervor, dass Feinsand und Grobschluff besonders erosionsanfällig, da diese infolge ihrer geringen Strukturstabilität leicht ablösbar und gleichzeitig aufgrund ihrer geringen Größe gut transportierbar sind.

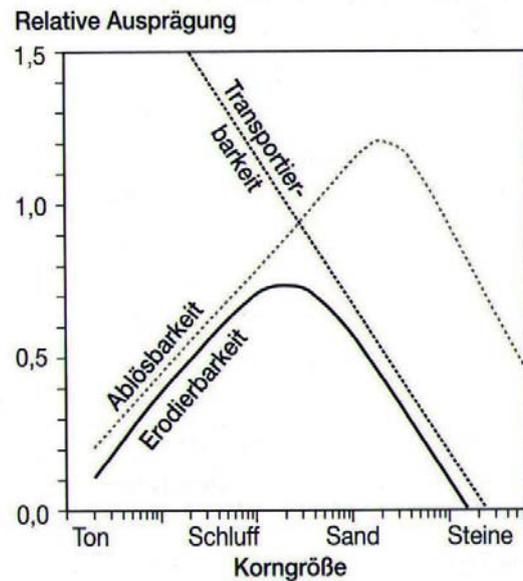


Abb. 3 Abhängigkeit der Erodierbarkeit von der Korngröße (aus *RICHTER 1998*).

2.3.1.4 Porengrößen, Porenverteilung und Porenkontinuität

Für die Abflussbildung infolge von Starkniederschlagsereignissen besitzen im Allgemeinen die Porengrößenverteilung, das Porenvolumen sowie die Kontinuität der Poren einen entscheidenden Einfluss. Während sich die Primärporen vorrangig aus der Korngrößenzusammensetzung ergeben, entstehen Sekundärporen im Wesentlichen durch biologische Aktivität (z.B. Wurzelröhren, Regenwurmrohre, Grabgänge von Kleinsäugern) sowie durch Schrumpfrisse.

Der Anteil von Sekundärporen kann nach *SCHIFFLER (1992)* und *BRONSTERT (1994)* bis zu 3 V % des Gesamtbodens betragen. Wichtiger als das von den Sekundärporen eingenommene Volumen ist jedoch deren Kontinuität (*TEIWES 1988*). Wesentlich für den Infiltrationsbeitrag der Sekundärporen ist deren Anschluss an die Bodenoberfläche (*NIEHOFF 2002*).

2.3.1.5 Niederschlagsintensität, -menge und -dauer

Wenn die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate eines Bodens überschreitet kommt es zur Bildung von Oberflächenabfluss infolge von Infiltrationsüberschuss (*HORTON 1933*).

In der Erosionsforschung wird neben der Intensität auch die kinetische Energie der Regentropfen betrachtet, da die Verschlammung und damit das Infiltrationsvermögen von Ackerböden maßgeblich durch diese Größe gesteuert werden (*FOHRER 1995, SCHRÖDER 1998*).

Die Niederschlagshöhe eines Starkregenereignisses bestimmt maßgeblich das Abflussvolumen (*BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996*). So wurde beispielsweise das

katastrophale Hochwasserereignis im August 2002 in Sachsen, aufgrund sehr hoher Niederschlagsmengen (Station Dresden Klotzsche mit 181.7 mm, Zinnwald-Georgenfeld mit 406.2 mm) ausgelöst. Verschärfend wirkten zusätzlich hohe Vorfeuchten (*SLFUG 2004*), so dass der Bodenspeicher schnell ausgeschöpft war und es insbesondere zu Oberflächenabfluss infolge gesättigter Böden kam (Sättigungsflächenabfluss).

Da mit zunehmender Niederschlagsdauer auch die Niederschlagsmenge steigt, gelten die Aussagen zur Niederschlagshöhe entsprechend (*BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996*).

2.3.2 Landnutzungsspezifische Einflussgrößen

In Bezug auf den Erosions- und Hochwasserschutz ist von entscheidender Bedeutung, welcher Anteil des Niederschlages bei der jeweiligen Nutzungsvariante oberflächlich abfließt bzw. wie durch eine Nutzungsänderung der Abflussanteil (Oberflächenabfluss) minimiert werden kann. Bekannt ist, dass bei gleichen Standortbedingungen dieser Anteil mit zunehmender Nutzungsintensität von Wald über Grünland bis zu Ackerland zunimmt. Im Allgemeinen ist daher in überwiegend ackerbaulich genutzten Einzugsgebieten mit einem hohen oberflächlich abfließenden Niederschlagsanteil zu rechnen, in einem durch Wald und Grünland dominierten Einzugsgebiet hingegen mit einem geringen Anteil. Zu den Themen des Landnutzungs- und Bewirtschaftungseinflusses auf Erosion und Abfluss liegen zahlreiche Arbeiten vor, z.B. *BEISECKER 1994, BORK 1988, HAMPL 1995, HORN 1998, KAINZ 1991, LAWA 1995, MENDEL ET AL. 1997, PREUSCHEN 1994*.

2.3.2.1 Forstwirtschaftlich genutzte Flächen

Zur Thematik der Abflussbildung unter Wald existieren umfassende Studien. Die wichtigsten Größen, welche die vergleichsweise geringe Abflussbildung unter Wald bedingen, sind:

- Interzeption,
- Transpiration und Evaporation sowie
- Infiltrationsvermögen.

Interzeption

Unter Interzeption versteht man das vorübergehende Speichern von Niederschlag an Pflanzenoberflächen. Zusätzlich kann auch das Speichern von Niederschlag in der Streuschicht als Interzeption betrachtet werden. Die Interzeptionsleistung eines Waldbestandes ist dabei vorwiegend abhängig von Dichte und Alter des Bestandes sowie den vorliegenden Baumarten. So ist die Interzeption der Nadelwälder im Winter größer als diejenige der Laubwälder aufgrund des Laubabwurfs im Herbst. Der Bestandsniederschlag unterscheidet sich dabei um den Betrag der Interzeption vom Freilandniederschlag. In der

Literatur existieren zahlreiche Untersuchungen zur Bestimmung der Interzeption z.B. *BENECKE & VAN DER PLOEG (1978)*, *WEIHE (1968, 1979)*, *PLATE ET AL. (1986)*, *LAWA (1995)*, *INTERNATIONALEN KOMMISSION ZUM SCHUTZE DES RHEINS (1999)*, *MÄGDEFRAU & WUTZ (1951)* *BRECHTEL (1978)* sowie *BALAZS (1983)*. Demnach werden Interzeptionsspeicherleistungen von bis zu 5 mm angegeben. Die gleiche Größenordnung gilt auch für die Bodenstreu. Da es sich bei der Interzeption um einen Anfangsverlust handelt, sinkt dessen Bedeutung mit zunehmender Niederschlagsmenge.

Transpiration

Unter Transpiration versteht man die physiologisch gesteuerte Abgabe von Wasserdampf durch oberirdische Pflanzenorgane (*DYCK & PESCHKE 1995*). Dieser Prozess hat aufgrund der hohen Blattfläche von Waldbeständen große Bedeutung für den Wasserhaushalt. So findet man unter Wäldern infolge des hohen Wurzelentzuges häufig geringere Anfangsbodenfeuchten als im Freiland. Daraus ergibt sich, dass Waldböden im Vergleich zu landwirtschaftlichen Flächen eine deutlich höhere Speicherkapazität des Bodens besitzen (*MENDEL 2000*).

Die Transpiration eines Waldbestandes ist u. a. abhängig von der jeweiligen Baumart *POLSTER (1950)*, Witterungsverhältnissen (*LADEFOGED 1963*) und Grundwasserabstand *BENECKE & FLÜGGEN (1989)*. In *KÜNSTLE & MITSCHERLICH (1977)* findet man Angaben zur Interzeptionsspeicherleistung verschiedener Baumarten. Bezogen auf ein einzelnes Starkregenereignisses ist die Transpiration vergleichsweise klein und wird daher in der vorliegenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

Evaporation

Unter diesem Begriff versteht man die Verdunstung der unbewachsenen Erdoberfläche, des auf Pflanzenoberflächen zurückgehaltenen Wassers sowie die Verdunstung von freien Wasseroberflächen (*DYCK & PESCHKE 1995*). Unter Waldbeständen ist dieser Prozess eher unbedeutend, da der kapillare Aufstieg des Bodenwassers durch die darauf befindliche Humusaufgabe unterbrochen wird. Sie beschränkt sich demnach auf die im Interzeptionsspeicher (Pflanzenoberflächen und Streuschicht) befindliche Wassermenge (*BENECKE & VAN DER PLOEG 1978*). *VORONKOV ET AL. (1976)* geben Werte für die tägliche Evaporation im Frühling an. Demnach beträgt diese im Wald < 1.2 mm, während im Freiland 2.5 - 3 mm zu erwarten sind.

Für die Betrachtung von Starkregenereignissen ist die Evaporation von vernachlässigbar geringer Bedeutung und wird, wie die Transpiration, im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Infiltrationsvermögen und Abflussbildung

Das hohe Infiltrationsvermögen von Waldbeständen wird vor allem mit der intensiven Durchwurzelung begründet (*MENDEL 2000, RAKMANOV 1966*). *HEWLETT (1982)* nennt neben der tiefen Durchwurzelung den gegenüber Ackerflächen fehlenden Bearbeitungseinfluss, was eine höhere Bioaktivität nach sich zieht. Das hohe Infiltrationsvermögen von Waldbeständen wird durch zahlreiche Untersuchungen, von denen einige nachfolgend aufgeführt werden, bestätigt.

So wurden in der Schweiz und den USA bereits in den zwanziger Jahren erste forsthydrologische Experimente zur Abflussbildung im Wald durchgeführt (*BATES & HENRY 1928*), *BURGER (1922, 1937)*, *ENGLER (1919)*. Basierend auf einfachen Ringinfiltrationsmessungen zeigten die Untersuchungen von *ENGLER (1919)* und *BURGER (1922)*, dass ungestörte Waldböden im Vergleich zum Freiland eine 10- bis 100- fach höhere Infiltrationsleistung besitzen.

Weitere experimentelle Ergebnisse wurden in der Folge veröffentlicht, u. a. von *RUTKOVSKI (1948)*, *MASUCH (1961)*, *TOLDRIAN (1974)*, *KARL (1979)*, *SCHWARZ (1985, 1986)*, *LEHNHARDT (1985)*, *HERRMANN ET AL. (1989)* und *BORK ET AL. (1998)*. Die genannten Autoren kommen übereinstimmend zu dem Schluss, dass Wälder erst bei extremen Niederschlagsmengen mit Oberflächenabfluss reagieren.

Bereits *TOLDRIAN (1974)* und *SCHWARZ (1985, 1986)* führten auf Waldstandorten Beregnungsversuche durch und kamen zu dem Schluss, dass Wälder sehr hohe Niederschlagsmengen verkraften ehe sie mit Oberflächenabfluss reagieren. *TOLDRIAN (1974)* gibt für Waldböden geringer Anfangsbodenfeuchte einen Mindestwert von 159 mm Niederschlag an. Auf einer Pseudogley-Braunerde wurde sogar ein Maximalwert von 207 mm gemessen. Die Endinfiltrationsraten der Versuche beider Autoren lagen im Mittel zwischen 50 – 90 mm/h. Zwischen Laub-, Nadel-, und Mischwald wurden bei Ausschaltung der unterschiedlichen Interzeptionskapazitäten keine Unterschiede in der Abflussbildung beobachtet.

Die Beregnungsversuche von *HERRMANN ET AL. (1989)* im Harz ergaben selbst bei neunstündiger Beregnung und Intensitäten von 90 mm/h keinen Oberflächenabfluss, woraus geschlossen werden kann, dass die Infiltrationsrate die Beregnungsintensität überstieg.

BORK (1998) nennt Umstände, unter denen im Wald trotz hoher Infiltrationskapazität Abfluss entsteht:

- Durch Befahren von Forstwegen oder Rücken von Baumstämmen ist es zu lokalen Verdichtungen gekommen,
- Es wurden Forstwege mit verdichteter Oberfläche oder fester Decke angelegt oder
- Wasser aus oberhalb liegenden Acker- oder Grünlandflächen wurde eingeleitet.

Mitteleuropäische Wälder stocken häufig auf kargen Böden geringer Mächtigkeit (*ABELE ET AL. 1995, WITTE ET AL. 1996, BORK 1988, BORK ET AL. 1998*). In Kombination mit wenig oder nicht durchlässigen Untergrundgesteinen ist unter solchen Bedingungen mit einer verminderten Speicherfähigkeit der Böden zu rechnen, was entgegen dem generellen Trend auch unter Wald zu maßgeblichen Abflüssen führen kann. Somit ergibt sich ein Engpass bei der Hochwasservorsorge, wenn Wald auf flachgründigen Böden stockt (*SYMADER 1995*).

Modellrechnungen von *FOHRER ET AL. (2005)* mit dem Modell SWAT im Einzugsgebiet der Aar kamen zu dem Ergebnis, dass durch eine Verringerung des Waldanteils von 90 % auf 0 %, der Abfluss des Einzugsgebietes deutlich zunimmt. Die räumliche Verteilung der Abflüsse im Einzugsgebiet zeigt, dass insbesondere die Entwaldung steiler Hänge zu einer deutlichen Zunahme von Oberflächenabfluss und schnellem Zwischenabfluss führt.

Zusammenfassend zeigt die Auswertung der Literatur, dass es auf Waldstandorten auch bei sehr hohen Niederschlagssummen und -intensitäten nur in seltenen Fällen zu Oberflächenabfluss kommt. Dies lässt sich zurückzuführen auf die hohe Speicherkapazität und Durchlässigkeit der Waldböden sowie auf die Interzeption.

2.3.2.2 Landwirtschaftlich genutzte Flächen

Nach *MENDEL (2000)* unterscheiden sich die abflussrelevanten Größen landwirtschaftlicher Untersuchungsgebiete erheblich von bewaldeten. Entscheidend sind hier Einflüsse der Bodenbewirtschaftung, die sich u. a. in Verdichtung und Verschlämmung der Böden äußern.

Die Art der Bewirtschaftung besitzt einen entscheidenden Einfluss auf diese Größen. Von vielen Autoren z.B. *ZIMMERLING (2002), W. SCHMIDT ET AL. (2001), J. SCHMIDT ET AL. (1999), KTBL (1998)* sowie *GRUNDWÜRMER (1991)* wird eine Unterteilung in konventionelle Bodenbearbeitung, konservierende Bearbeitung und Direktsaat vorgenommen.

Unter *konventioneller Bodenbearbeitung* versteht man die mittels Pflug jährlich wiederkehrende, krumentiefe Wendung und Lockerung des Bodens. Die damit einhergehende Belüftung führt zu Humusverlust und damit zur Abnahme der Aggregatstabilität. Zurück bleibt eine vegetationsfreie Oberfläche, die sehr verschlammungsanfällig ist.

Die *konservierende Bodenbearbeitung* unterscheidet sich von der konventionellen dadurch, dass auf den Pflug als wendendes Bearbeitungsgerät verzichtet wird und die Bodenbearbeitungsintensität gegenüber der konventionellen Variante reduziert ist (W. SCHMIDT 2008). Deshalb wird in diesem Zusammenhang auch der Begriff „reduzierte Bodenbearbeitung“ verwendet (EICHHORN ET AL. 1991, TEBRÜGGE & EICHHORN 1992). Der Boden wird weitgehend in seinem Aufbau belassen. Eine ganzjährige Bodenbedeckung wird durch das Mulchsaatverfahren erreicht. Darunter versteht man die Bestellung der Hauptfrucht in die Pflanzenreste der Vorfrucht, in aufgelaufene Unkräuter oder in abgestorbene Zwischenfrüchte. Durch die ständige Bodenbedeckung werden Verschlammung und Loslösung von Bodenteilchen weitgehend verhindert. Entstehender Oberflächenabfluss, welcher durch die Rauigkeit der Mulchauflage gebremst wird, kann schadlos abfließen.

Beim Bearbeitungssystem *Direktsaat* wird abgesehen von der Erstellung eines Säschlitzes auf jegliche flächige Bodenbearbeitung verzichtet. Somit ist eine ganzjährige Bodenbedeckung durch Pflanzenmaterial gegeben (W. SCHMIDT 2008).

Verdichtung

Nach HAMPL (1995) und PREUSCHEN (1994) liegt eine der wesentlichsten Ursachen für dramatische Hochwasserkatastrophen in der zunehmenden Verdichtung landwirtschaftlicher Böden, wodurch weniger Wasser in den Boden infiltriert und dort gespeichert werden kann.

Als Hauptursachen der Verdichtung gelten nach HAMPL (1995), PREUSCHEN (1994), PETELKAU (1983) und BORCHERT (1988) die Befahrung mit schweren landwirtschaftlichen Maschinen und sämtliche Eingriffe, die zu einem Rückgang des Bodenlebens führen. Vor allem die mittels Pflug jährlich wiederkehrende, krumentiefe Wendung und Lockerung des Bodens (Primärbodenbearbeitung), bei welcher der Schlepper in der Pflugfurche fährt, führt zu Pflugsohlenbildung und Unterbodenverdichtung (W. SCHMIDT & STAHL 1996). Diese kann bei langjährigem Pflugeinsatz hinsichtlich der Infiltration als Sperrschicht wirken (NIEHOFF 2002).

Bei konservierender Bearbeitung entfällt das mit dem Pflügen i. d. R. verbundene Fahren des Schleppers in der Pflugfurche, daraus folgende Pflugsohlenbildung sowie Unterbodenverdichtung (W. SCHMIDT & STAHL 1996). Gleichzeitig vermindert die höhere

Tragfähigkeit konservierend bewirtschafteter Böden tendenziell die Gefahr von Bodenschadverdichtungen bei Überfahung mit Landmaschinen.

Nach *PREUSCHEN (1994)* kann diese Verdichtung durch eine angepasste Bewirtschaftung weitgehend aufgehoben und die natürliche Wasserspeicherfunktion des Bodens wiederhergestellt werden.

SCHOEBL ET AL. (1999) erarbeiteten einen Maßnahmenkatalog zur Minderung anthropogener Verdichtungen und zur Verbesserung der Bodenstruktur. Die wesentlichen Maßnahmen sind:

- Reduzierte Bodenbearbeitung,
- Reduzierte Druckbelastung,
- Bearbeitungsverzicht nasser Böden,
- Weniger Hackfrüchte,
- Zwischenbegrünung mit Tiefwurzlern,
- Humusdüngung, Förderung des Bodenlebens sowie
- Tiefenlockerung verdichteter Böden.

Die Arbeit von *BEISECKER (1994)* zeigt hingegen, dass ein langjähriges Unterlassen sämtlicher Bodenbearbeitungsmaßnahmen (Direktsaat) auf Sand und Lössboden zu höheren Lagerungsdichten und damit zu einer geringeren Speicherkapazität des Oberbodens führt. Unterhalb der Bearbeitungstiefe > 30 cm zeigt demgegenüber die konventionelle Variante höhere Lagerungsdichten, was auf eine Pflugsohlenverdichtung hinweist.

Eine Erhöhung der Lagerungsdichten nach 10 Jahren Direktsaatbewirtschaftung gegenüber der konventionellen Variante stellen auch *CHANG & LINDWALL (1989, 1990)*, *HORNE ET AL. (1992)*, *COMIA ET AL. (1994)*, *ALEGRE ET AL. (1991)* und *PIERCE ET AL. (1994)* fest.

Auch die Untersuchungen von *W. SCHMIDT (2006B)* belegen, dass im Vergleich zur konventionellen Bewirtschaftung bereits die mehrjährig konservierende Bodenbearbeitung zu einer signifikanten Erhöhung der Lagerungsdichte führt. Die tendenzielle Zunahme der Lagerungsdichte durch Unterlassen der Bearbeitung wird durch weitere Autoren belegt z.B. *DOUGLAS ET AL. (1981, 1986)*, *MIELKE ET AL. (1986)*, *BORCHERT (1988)* sowie *TEIWES (1988)*.

Trotz meist geringerer Lagerungsdichte in der Bodenkrume weisen konventionell bearbeitete Standorte zumeist ein geringeres Infiltrationsvermögen im Vergleich zu konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat auf. Ursachen dafür liegen vor allem in der Verschlammung der Bodenoberfläche sowie der Zerstörung der Porenkontinuität (insbesondere der Makroporen) infolge des wendenden Eingriffs des Pfluges.

Verschlämmung

Verschlämmungserscheinungen entstehen durch die Zerstörung von Bodenaggregaten infolge des Aufpralls von Regentropfen. Die dann im Spritzwasser befindlichen Bodenteilchen werden in die Bodenporen eingeschwemmt, was wiederum zu einer Abdichtung der Bodenoberfläche und damit zu verstärktem Oberflächenabfluss führt (MENDEL 2000). Besonders verschlammungsanfällig sind unbedeckte Böden geringerer Aggregatstabilität mit hohem Schluffanteil (Lössregionen). Diese Bedingungen treten vor allem auf konventionell bewirtschafteten Ackerböden der Lössregionen auf, wenn sich die bestellte Fruchtart noch in einem Stadium geringer Bodenbedeckung befindet.

Deutlich weniger verschlammungsanfällig sind Böden, welche konservierend bzw. als Direktsaatfläche bewirtschaftet werden. Durch Mulchsaat wird eine ständige Bodenbedeckung gewährleistet. Die beim Aufprall der Regentropfen auf die Bodenoberfläche übertragene kinetische Energie wird durch die permanente Bedeckung drastisch reduziert, so dass Verschlammung und Loslösung von Bodenteilchen weitgehend verhindert werden (FRIELINGHAUS & BARKUSKY 1989, AUERSWALD 1993, W. SCHMIDT ET AL. 1999, BRANDT & WILDHAGEN 1997, HELMING ET AL. 1994).

Porengrößen, Porenverteilung und Porenkontinuität

Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungsverfahren auf das Porenvolumen haben gezeigt, dass bei der konventionellen Variante die Porosität oberhalb der Pflugsohle höher, unterhalb jedoch geringer als bei konservierender Bewirtschaftung bzw. bei Direktsaat ist (BEISECKER 1994, FREDE ET AL. 1992, SEMMEL & HORN 1995). Des Weiteren wird bei konventioneller Bewirtschaftung durch die wendende Wirkung des Pfluges die Kontinuität der Poren unterbrochen, so dass das aufgenommene Niederschlagswasser nur über Matrixfluß (Primärporen) in den Unterboden transportiert werden kann.

Hinsichtlich der Makroporen ist bei den Bearbeitungssystemen „Konservierend“ und „Direktsaat“ hervorzuheben, dass die Regenwurmpopulation bereits wenige Jahre nach der Umstellung von Pflugbewirtschaftung auf Direktsaat deutlich ansteigt (DIEPENBROCK ET AL. 2005). Untersuchungen von TEBRÜGGE & ABELSOVA (1998) ergaben einen Anstieg um das 10 fache der Individuenzahl. Aufgrund ihrer grabenden und wühlenden Tätigkeit hinterlassen Regenwürmer (insbesondere die tiefgrabenden, anözischen Arten) ein tiefreichend kontinuierliches, gut dränendes Röhrensystem, welches aufgrund der fehlenden Bodenbearbeitung erhalten bleibt (W. SCHMIDT ET AL. 1999, KAINZ 1991).

BEISECKER (1994) stellte in seinem Vergleich unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme fest, dass die Varianten Pflug und Flügelscharrgrubber im Oberboden, aufgrund des durch die Bearbeitung induzierten höheren Grobporenvolumens, höhere k_f -Werte als die

Direktsaatvariante besitzen. An der Krumbasis kehren sich diese Verhältnisse jedoch zu Gunsten der Direktsaatvariante um. Dies liegt in der höheren biologischen Aktivität der Direktsaatstandorte begründet. Auch hier konnte eine signifikant höhere Regenwurmabundanz nachgewiesen werden.

Auch *ZIMMERLING (2004)* kommt zu dem Schluss, dass u. a. aufgrund des Zuwachses an Makroporen die Wasseraufnahmefähigkeit konservierend bestellter Ackerflächen verbessert wird.

Dies belegen ebenfalls Tracerversuche sowie Experimente zur Bromidverlagerung von *BEISECKER (1994)*. Während unter Direktsaatflächen ca. 80 cm tiefe kontinuierliche mit Rhodamin gefärbte Bioporen nachgewiesen wurden, zeigten sich unter Pflugflächen überhaupt keine gefärbten Bioporen.

Auch *WAHL ET AL. (2004)* stellten mit Hilfe von Tracern fest, dass sich unter konservierend bewirtschafteten Flächen bis zu 120 cm tiefe, kontinuierliche Poren ausbilden, während bei konventioneller Bewirtschaftung diese nur bis in 50 cm Tiefe reichen. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Poren unter konservierender Bearbeitung eine höhere Kontinuität besitzen.

Die Untersuchungen von *DREES ET AL. (1994)* ergaben, dass die durchschnittliche Porengröße unter Direktsaat höher war als unter konventioneller Bewirtschaftung und dass zahlreiche Regenwurmgänge vorlagen. Bei der konventionellen Variante wurden keine Regenwurmröhren festgestellt.

Ähnliche Ergebnisse zeigen Tracerversuche von *W. SCHMIDT (2006A)*. Diese ergaben, dass bei Anwendung einer mehrjährig konservierenden Bodenbearbeitung das Wasser in deutlich tiefere Regionen als bei der Pflugvariante eindringt. Dies lässt sich ebenfalls auf kontinuierliche, vertikal verlaufende Makroporen zurückführen.

Zu gegenteiligen Aussagen kommen *LIPIEC ET AL. (2006)*. Ihre Untersuchungen ergaben, dass die konventionelle Bewirtschaftung gegenüber der Direktsaat einen höheren Anteil von Poren, welche aktiv am Wassertransport beteiligt sind, aufweist und eine höhere Infiltration zeigt.

Den Einfluss von Makroporen auf das Abführen von Niederschlagswasser in den Untergrund verdeutlicht ein Experiment von *GERLINGER (1997)*. Demnach erreichte eine Feuchtefront den über 1,8 m tiefen Grundwasserleiter über Makroporen bereits nach 45 min, während die Feuchtefront der Matrix über 9 h dafür benötigte. Die Versuche von *GERMANN (1990)* zeigten ebenfalls, dass im Falle von Starkniederschlägen in grobporösen Böden das Wasser bevorzugt über Makroporen in tiefere Schichten gelangt.

Fruchtart / Bedeckungsgrad

Die Auswertung der Literatur zeigt, dass spätdeckende Fruchtarten, wie Mais und Zuckerrübe, wegen der deutlich intensiveren Oberflächenverschlämmung, die Infiltration stärker reduzieren als Getreide. Der Bedeckungsgrad der jeweiligen Fruchtart ist damit entscheidend für die Infiltration (*HAYS ET AL. 1949, BROWNING ET AL. 1948, BORST ET AL. 1945, MÜLLER ET AL. 1984*). So stellte *DIKAU (1986, 1988)* fest, dass mit zunehmendem Bedeckungsgrad der Nutzpflanzen eine Abnahme des Oberflächenabflusses zu verzeichnen war. Die größten Abflusshöhen wurden dabei auf Mais und Zuckerrübenfeldern gemessen. Ab einem Bedeckungsgrad von 80 % war ein deutlicher Rückgang des Oberflächenabflusses zu erkennen. Auch *MOSTAGHIMI ET AL. (1987)* kommen zu dem Ergebnis, dass der Oberflächenabfluss mit steigendem Bedeckungsgrad abnimmt.

KARL UND PORZELT (1976) stellten in ihren in den Jahren 1971-1975 durchgeführten Beregnungsversuchen ebenfalls auf Maisflächen die höchsten Abflüsse fest. Bei Wintergetreide ergab sich kein messbarer Oberflächenabfluss.

2.3.2.3 Untersuchungen zum Einfluss der Bewirtschaftung

Zum Einfluss der Bewirtschaftung auf Oberflächenabfluss und Erosion liegen umfassende Studien vor. Nach Unterteilung der Bewirtschaftungssysteme in konventionell, konservierend und Direktsaat besteht hinsichtlich der Erosion zwischen sämtlichen Autoren Konsens darüber, dass die konservierende Bewirtschaftung bzw. Direktsaat aufgrund der höheren Aggregatstabilität, des höheren Bodenbedeckungsgrades und der höheren Oberflächenrauigkeit die Erosion im Vergleich zur konventionellen Variante deutlich reduziert (*MOSTAGHIMI ET AL. 1987, AUERSWALD 1993, ROTH & HELMING 1994, MARKART & KOHL 1995, BRANDT & WILDHAGEN 1997, MICHAEL 2000, W. SCHMIDT ET AL. 2001*).

Die Wirkung auf den Oberflächenabfluss wird hingegen konträr diskutiert (*STRUDLEY ET AL. 2008*).

Zu dem Ergebnis, dass die Bewirtschaftung keinen Einfluss auf den Oberflächenabfluss hat kommen beispielsweise *MOSTAGHIMI ET AL. (1987)*. Deren Ergebnisse zeigen, dass der Oberflächenabfluss mit steigendem Bestockungsgrad abnimmt, unabhängig von den Bearbeitungsmethoden. Auch *SIDIRAS ET AL. (1988)*, die den Einfluss von Pflugbearbeitung und Fräse auf den Oberflächenabfluss untersuchten, stellen keinen signifikanten Unterschied zwischen beiden Bewirtschaftungsmethoden fest.

Die meisten Autoren kommen allerdings zu dem Schluss, dass die nichtwendende (konservierende) Bodenbearbeitung im Allgemeinen infiltrationsfördernd wirkt, da Aggregatstabilität und Grobporensystem nicht gestört werden (z.B. *LAMBERT 1998, POTTER 1991, HELMING ET AL. 1994*).

Die Parallel-Beregnungsversuche von *LAMBERT (1998)* lieferten auf einer gemulchten Fläche über eine Dauer von mehr als 2 Stunden fast keinen Oberflächenabfluss, während auf einer gepflügten Fläche bereits nach 35 min Oberflächenabfluss einsetzte.

RÜTTIMANN ET AL. (1995) führten auf verschiedenen Ackerflächen in der Schweiz Abfluss- und Erosionsmessungen durch und stellten dabei signifikante Unterschiede zwischen konventionellem Ackerbau und dem Anbau von Zwischenfrüchten fest, wobei der Anbau von Zwischenfrüchten deutlich geringere Abflüsse lieferte.

Die Ergebnisse von *WENDT ET AL. (1985)* zeigen, dass der höchste Oberflächenabfluss bei einfacher Bewirtschaftung ohne Zwischenfruchtanbau entsteht. Ursache ist die Verschlämmung der brach liegenden Bodenoberfläche, welche die Infiltration hemmt. Durch Anbau von Zwischenfrüchten kann der Verschlämmung wirksam entgegengesteuert werden.

Aus experimentellen Arbeiten von *W. SCHMIDT ET AL. (2001)* geht hervor, dass mit abnehmender Bewirtschaftungsintensität eine deutliche Zunahme der Infiltration verbunden mit einer enormen Senkung des Bodenabtrages einhergeht. Nach *W. SCHMIDT (2006A)* sind diese Effekte allerdings erst mehrere Jahre nach einer Bewirtschaftungsumstellung zu beobachten. Dies zeigen Vergleichsuntersuchungen zwischen ein- und mehrjähriger konservierender Bodenbearbeitung. Aus diesen Untersuchungen lässt sich ableiten, dass für eine Erhöhung der Infiltrationsleistung sowie der Verringerung der Erosion nicht allein eine hohe Bodenbedeckung ausreichend ist. Erst wenn sich die Aggregatstabilität erhöht und sich die Makroporenkontinuität entsprechend ausgebildet hat, ergeben sich die erwünschten positiven Wirkungen.

Zum gegenteiligen Ergebnis, dass sich Direktsaat und konservierende Bewirtschaftung gegenüber konventioneller Pflugbewirtschaftung nachteilig auf das Infiltrationsvermögen auswirken, kommen z.B. *WENDT & BURWELL (1985)* sowie *MÜLLER ET AL. (1984)*. Diese zeigen, dass gerade auf tiefgepflügten Flächen höhere Infiltrationsraten auftreten. Eine Verringerung der Infiltration bei Direktsaat gegenüber der konventionellen Bewirtschaftung stellen auch *LIPIEC ET AL. (2006)*, *HORNE ET AL. (1992)*, *AZOOZ (1996)* sowie *ALEGRE ET AL. (1991)* fest.

Aus dem Literaturüberblick geht hervor, dass im Wesentlichen die Verdichtung und Verschlämmung von Ackerböden zur Erhöhung von Abfluss und Erosion führen. Positiv wirkt sich hingegen ein hoher Bedeckungsgrad der Bodenoberfläche aus. Insbesondere bei der konventionellen Bewirtschaftung sind Verschlämmungen besonders stark ausgeprägt. Durch eine konservierende Bewirtschaftung bzw. Direktsaat wird diesem Prozess aufgrund der ganzjährig bedeckten Bodenoberfläche und der höheren Aggregatstabilität entgegengewirkt, und damit die Erosion maßgeblich verringert. Eine Reduzierung der Oberflächenabflussmenge wurde ebenfalls in den meisten Fällen beobachtet. Aufgrund der

höheren Lagerungsdichte bei konservierender Bewirtschaftung und Direktsaat kann es jedoch auch zu gegenläufigen Effekten kommen.

2.3.2.4 Vergleich unterschiedlicher Landnutzungsvarianten

Das Verhalten des Oberflächenabflusses bei Nutzungswandel wurde u. a. von *DILS (1953)* untersucht. Die Untersuchungen ergaben, dass die Infiltrationskapazität bei einem Landnutzungswechsel von Wald zu Ackerland deutlich abnimmt. Nach 6 Jahren landwirtschaftlicher Nutzung (Maisanbau) ging die die Infiltrationsrate auf der vormals als Wald genutzten Fläche um 90 % zurück.

SOKOLLEK (1978, 1983) führte Untersuchungen über den Einfluss von Landnutzung auf den Oberflächenabfluss und die Infiltration durch. Es wurden beispielsweise 5 Parzellen verschiedener Landnutzungen (Acker-Stoppel, Weide, Buche, Fichte und Kahlschlag) mit 50 mm Niederschlag in 60 min mittels Beregnungsanlage künstlich beregnet und die Abflussbeiwerte verglichen. Die Abflussbeiwerte ergaben folgende Werte: Acker-Stoppel: 52.6 %, Weide: 16.4 %, Buche: 0.0 %, Fichte: 0.0 % und Kahlschlag: 0.14 %. Auf den beiden Waldflächen trat kein Oberflächenabfluss auf. Das führt der Autor auf die mächtige Streuauflage zurück, welche ein großes Wasserspeichervolumen besitzt und das gespeicherte Wasser verzögert an den Boden abgibt. Außerdem wird darauf verwiesen, dass im Vergleich zu anderen Landnutzungen unter Wald ein geringerer Bodenwassergehalt infolge hoher Interzeption und Transpiration vorlag.

FOHRER ET AL. (2001) simulierten die hydrologischen Auswirkungen der Landnutzungen Acker (Gerste), Grünland und Wald mit dem Modell SWAT nach entsprechender Kalibration an gemessenen Werten. Bei fast unbedeckter Bodenoberfläche nach Einsaat bzw. Ernte von Gerste stieg der Oberflächenabfluss im Vergleich zu Wald um 180 % an. Grünland lieferte nur geringfügig höhere Abflüsse als Wald aufgrund der deutlich geringeren Interzeption.

Vergleich Acker zu Grünland

Grünlandflächen unterliegen im Vergleich zu Ackerböden keinerlei direkten Bearbeitungseingriffen. Eine abflussmindernde Wirkung von Grünland gegenüber Ackerflächen konnte dennoch nicht immer bestätigt werden.

So ergaben z.B. Untersuchungen von *KLAGHOFER (1985)*, welcher das Abflussverhalten bei künstlicher Beregnung zweier Maisflächen einer Mähwiese gegenüberstellte, dass sich die Infiltrationsraten 30 min nach Regenbeginn unabhängig vom Bewuchs verhalten und dass auf der Wiesenfläche nahezu gleiche Oberflächenabflussmengen wie auf den beiden Maisflächen gemessen wurden.

Hingegen zeigten die Beregnungsversuche von *MOLLENHAUER ET AL. (1985)* dass auf Grünlandflächen deutlich geringere Abflüsse auftraten als auf den vergleichend untersuchten Ackerstandorten.

Eine Zunahme der oberflächlichen Abflüsse bei sinkendem Waldanteil und gleichzeitig wachsendem Grünlandanteil bestätigten auch die Untersuchungen von *FOHRER ET AL. (2001)*.

Zusammenfassend zeigt die Auswertung der Literatur, dass Waldflächen im Vergleich zu Ackerflächen deutlich geringere Abflüsse liefern. Oft zeigte sich auch überhaupt kein Abfluss unter Wald. Konträre Meinungen gibt es hinsichtlich der abflussmindernden Wirkung von Grünland. In Abhängigkeit der jeweiligen Standorteigenschaften lieferten diese weniger, aber zum Teil auch vergleichbar hohe Abflüsse wie die Ackerstandorte. Erosionserscheinungen wurden unter Wald und auf Grünlandflächen nur in Ausnahmefällen (Viehtritt, Waldwege etc.) beobachtet.

3 Modelle zur Berechnung von Abfluss und Erosion

3.1 Überblick

In der Literatur existiert eine Vielzahl von Modellen zur Abfluss- und Erosionsberechnung. Da für die vorliegende Arbeit beide Prozesse quantifiziert werden sollen, scheiden klassische Niederschlags-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle) von vornherein aus, da hier nur die Abflusskomponente betrachtet wird. Eine Kopplung von Erosions- und Abflussmodellen ist zwar denkbar, allerdings müsste dann der zeitaufwändigste Arbeitsschritt der Parametrisierung doppelt erfolgen, so dass von dieser Option abgesehen wurde. Da Erosionsmodelle sowohl Abfluss als auch Erosion abbilden, erscheint es an dieser Stelle sinnvoll, auf ein geeignetes Erosionsmodell zurückzugreifen. Einen Überblick der bekanntesten Erosionsmodelle unter Angabe der wesentlichen Klassifikationsmerkmale gibt Tab. 1. Erosionsmodelle lassen sich demnach bezüglich der Prozessbeschreibung sowie der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung klassifizieren (Tab. 1). Darauf sollen im Folgenden näher eingegangen werden.

Tab. 1 Überblick wichtiger* Erosionsmodelle (erweitert nach J. Schmidt 1996)

Kürzel	Referenz	Räumlicher Bezug	Zeitlicher Bezug
rein empirische Ansätze			
USLE	Wischmeier & Smith 1978	Hang (ungegliedert)	langjähriges Mittel
RUSLE	Renard & Ferreira 1993	Hang	langjähriges Mittel
MUSLE87	Hensel & Bork 1988	Einzugsgebiet (gegliedert)	langjähriges Mittel
dUSLE	Flacke et al. 1990	Einzugsgebiet (gegliedert)	langjähriges Mittel
AGNPS	Young et al. 1987	Einzugsgebiet (gegliedert, Raster)	Einzelereignis
SEDEM/WATEM	Van Oost et al. 2000, Van Rompaey et al. 2001 Jordan et al. 2005	Einzugsgebiet (gegliedert, Raster)	langjähriges Mittel

Kürzel	Referenz	Räumlicher Bezug	Zeitlicher Bezug
physikalisch begründete Ansätze			
CREAMS	Knisel 1980	Hang (gegliedert)	Einzelereignis
EPIC	Williams 1985	Hang (gegliedert)	langjähriges Mittel
ANSWERS	Beasley & Huggins 1982 Deinlein & Böhm 2000	Einzugsgebiet (gegliedert, Raster)	Einzelereignis
WEPP	Flanagan & Nearing 1995	Einzugsgebiet (gegliedert)	Einzelereignis/ langjähriges Mittel
OPUS	Smith 1992 Deinlein & Böhm 2000	Hang (gegliedert)	Einzelereignis/ langjähriges Mittel
EROSION 2D	J. Schmidt 1991	Hangprofil (gegliedert)	Einzelereignis
EROSION 3D	Von Werner 1995, J. Schmidt 1996	Einzugsgebiet (gegliedert Raster)	Einzelereignis
KINEROS	Woolhiser et al. 1990	Einzugsgebiet (gegliedert)	Einzelereignis
EUROSEM	Morgan et al. 1992, 1993	Einzugsgebiet (gegliedert)	Einzelereignis
LISEM	De Roo et al. 1994	Einzugsgebiet (gegliedert Raster)	Einzelereignis
SHE/ SHE SED/ MIKE SHE	Abbott et 1986, Bathurst et al. 1995, Refsgaard & Storm 1995	Einzugsgebiet (gegliedert Raster)	Einzelereignis / langjähriges Mittel
SWAT	Arnold et al. 1998, Eckardt et al. 2002, Neitsch et al. 2002, Lehnhardt et al. 2003	Einzugsgebiet (gegliedert)	langjähriges Mittel
CATFLOW	Maurer 1997	Einzugsgebiet	Einzelereignis / langjähriges Mittel

* Tab. 1 erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit

Erosionsmodelle lassen sich demnach bezüglich der Prozessbeschreibung sowie der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung klassifizieren (Tab. 1). Darauf sollen im Folgenden näher eingegangen werden.

Prozessbeschreibung

Hierbei wird im Wesentlichen zwischen empirischen und physikalisch basierten Modellen unterschieden.

Typischer Vertreter einer rein empirischen Prozessbeschreibung ist die Universal Soil Loss Equation (USLE). Diese wurde basierend auf standardisierten Testflächenmessungen von

WISCHMEIER & SMITH (1965) entwickelt. Der mittlere jährliche Abtrag berechnet sich aus der multiplikativen Verknüpfung von 6 korrelativ ermittelten Faktoren.

$$(1) \quad A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

A	mittlerer jährlicher Bodenabtrag [t/(ha*a)]
R	Niederschlagsfaktor [-]
K	Bodenerodierbarkeitsfaktor [-]
L	Hanglängenfaktor [-]
S	Hangneigungsfaktor [-]
C	Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor [-]
P	Erosionsschutzfaktor [-]

Die ursprünglich für den mittleren Westen der USA konzipierte Gleichung wurde durch AUERSWALD und SCHWERTMANN, als so genannte Allgemeine Bodenabtragungsgleichung „ABAG“, für die Verhältnisse in Deutschland angepasst (SCHWERTMANN 1981, SCHWERTMANN ET AL. 1987 und AUERSWALD 1987).

Ebenfalls zur Gruppe der empirischen Modelle zählen die auf der USLE aufbauenden bzw. modifizierten Modelle MUSLE87 (HENSEL UND BORK 1988), DUSLE (FLACKE ET AL. 1990, AUERSWALD ET AL. 1988), RUSLE (RENARD ET AL. 1991), AGNPS (YOUNG ET AL. 1987) und ANSWERS (BEASLE & HUGGINS 1982). Der Vorteil dieser Modelle liegt in der einfachen Anwendbarkeit. Der Nachteil besteht in der fehlenden bzw. nur mit Hilfe aufwändiger Kalibrierungen möglichen Übertragbarkeit auf andere Standorte sowie der geringen zeitlichen und räumlichen Auflösung.

Typische Vertreter physikalisch basierter Erosionsmodelle sind CATFLOW (MAURER 1997), EROSION 2D/3D (J. SCHMIDT 1991, 1996, VON WERNER 1995), LISEM (DE ROO ET AL. 1994) und EUROSEM (MORGAN ET AL. 1996). Im Gegensatz zu den zuvor genannten empirischen Modellen bilden physikalisch begründete Modelle die einzelnen Prozesse basierend auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten ab. Der Vorteil liegt in ihrer Übertragbarkeit auf andere Standorte und in der größeren zeitlichen (ereignisbezogen) und räumlichen Auflösung.

Räumliche Differenzierung

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist das räumliche Auflösungsvermögen der Modelle. Entsprechend der jeweiligen Fragestellung kann auf Modelle, welche einzelne Hänge abbilden, wie EROSION 2D (J. SCHMIDT 1991), OPUS (SMITH 1988) oder Modelle, welche ganze Einzugsgebiete beschreiben können, wie EROSION 3D (J. SCHMIDT 1996), LISEM (DE ROO ET AL. 1994) und WEPP (FLANAGAN & NEARING 1995), zurückgegriffen werden.

Hinsichtlich der Gebietsdiskretisierung werden nach MOORE ET AL. (1991) verschiedene Modelltypen unterschieden, die nachfolgend näher erläutert werden.

Ungegliederte Modelle (lumped models)

Bei diesen Modellen werden für das gesamte Einzugsgebiet repräsentative Mittelwerte der räumlich variablen Parameter gebildet. Typische Vertreter sind die USLE und RUSLE. Nach *VON WERNER (1995)* kann die Verwendung ungegliederter Modelle zu großen Fehleinschätzungen führen, wenn eine entsprechend hohe Variabilität der Bodenparameter vorliegt.

Gegliederte Modelle

Diese Modelle sind nach der Art ihrer Gebietsdifferenzierung unterteilbar in:

- Rasterbasierte Modelle

Die kleinste Einheit solcher Modelle bilden quadratische Strukturen einheitlicher Größe. Aufgrund der einfachen Verarbeitungsmöglichkeit von Rastern in GIS-Systemen finden entsprechende Modelle große Verbreitung. Typische Vertreter sind AGNPS, ANSWERS, LISEM, SHE und EROSION 3D. Ferner bieten rasterbasierte Modelle den Vorteil, dass lineare Erosionserscheinungen (Fließwege, Abflussverteilungen, Erosionsrinnen,) abgebildet werden können. Nach *MOORE ET AL. (1991)* bieten Rasterstrukturen die Möglichkeit, Satellitendaten zur Bestimmung der Eingangsparameter (insbesondere Vegetationsdaten) zu nutzen.

- Hydrotope (Hydrological Response Units)

Bei dieser Art der Aggregation werden nach *GATTKER (2006)* aus hydrologisch relevanten Gebietseigenschaften homogene Flächen (Hydrotope) gebildet. Die Einteilung in Hydrotope basiert auf im Wesentlichen auf Landnutzung, Topographie, Bodeneigenschaften und Geologie. Die Modelle CATFLOW, WEPP, EUROSEM und KINEROS arbeiten auf Grundlage dieser Form der Gebietsdifferenzierung.

- TIN-basierte Modelle

Die Untergliederung des Einzugsgebietes erfolgt auf Grundlage eines irregulären Dreiecksnetzes (z.B. DUSLE, *VON WERNER 1995*)

Zeitliche Differenzierung

Hinsichtlich der zeitlichen Diskretisierung wird zwischen langfristbezogenen (langjähriges Mittel) (USLE) und ereignisbezogenen Modellen (LISEM, EROSION 3D, KINEROS, EUROSEM) unterschieden. Da Erosion stets durch Einzelereignisse ausgelöst wird, sind ereignisbezogene Modelle gebräuchlicher. CATFLOW und SHE können sowohl für Langfristsimulationen als auch für die Simulation von Einzelereignissen eingesetzt werden.

3.2 Modellauswahl

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Landnutzungseinfluss auf Abfluss und Erosion am Beispiel zweier kleiner, hydrologisch unbeobachteter Einzugsgebiete in Abhängigkeit verschiedener Einzelereignisse abzubilden. Aus dieser Fragestellung leiten sich folgende Anforderungen an das Modell ab.

Das Modell muss zunächst in der Lage sein, Einzugsgebiete bis 10 km² Größe bearbeiten zu können. Da es sich um hydrologisch unbeobachtete Gebiete handelt, stehen keine Daten zur Kalibrierung von Modellergebnissen zur Verfügung. Demzufolge kommen nur physikalisch basierte Modelle in Frage, da diese keiner Kalibrierung im Einzugsgebiet bedürfen. Ferner sollte das Modell, um die Prozesse in Abhängigkeit der zugrunde gelegten Starkregenereignisse abbilden zu können, ereignisbezogen sein.

Um der hohen räumlichen Auflösung gerecht zu werden, wird rasterbasierten Modellen der Vorzug gegeben. Des Weiteren sind diese Modelle GIS koppelbar und in der Lage, Abflussverteilungen und lineare Erosionserscheinungen abzubilden.

Entsprechend der in Tab. 1 angegebenen Unterscheidung der Modelltypen, kommen demnach nur physikalisch basierte, ereignisbezogene Einzugsgebietsmodelle mit hoher räumlicher Auflösung (Raster) in Frage. Somit stehen für die Bearbeitung der Fragestellung ANSWERS, SHE, LISEM und EROSION 3D zur Auswahl.

Nach *DEINLEIN & BÖHM (2000)* beschränkt sich bei ANSWERS die zu verarbeitende Rasteranzahl auf 1700 Zellen, so dass die räumliche Auflösung mit zunehmender Einzugsgebietsgröße sinkt. Aufgrund der geforderten hohen Auflösung ist dieses Modell deshalb nicht für die vorliegende Fragestellung geeignet.

Ein Vergleich der Modelle EROSION 3D und LISEM durch *JETTEN ET AL. (1999)* zeigt, dass die von EROSION 3D berechneten Abflüsse deutlich besser mit gemessenen Werten übereinstimmen ($R^2 > 0.97$) als die von LISEM berechneten Werte ($R^2 < 0.69$). Ferner existiert für LISEM nach *FELDWISCH (1999)* keine flächenhaft vorliegende Informationsquelle, so dass die Parametrisierung entsprechend aufwändig ist. Als Eingangsdaten benötigt LISEM Erosionsparameter, welche in den Einzugsgebieten selbst erhoben werden müssen. Hinsichtlich der differenzierten Berechnung verschiedener Bodenbewirtschaftungsszenarien müssen ebenfalls entsprechende Parameter vor Ort ermittelt werden. Mit ähnlichen Parametrisierungsschwierigkeiten ist nach *FELDWISCH (1999)* auch beim SHE Modell zu rechnen. Auch hier werden intensive Datenerhebungen vor Ort als Voraussetzung genannt, um die komplexen Teilprozesse von Makroporeninfiltration und Bodenerosion modellieren zu können. Im Gegensatz dazu steht für das Modell EROSION 3D für Sachsen ein Parameterkatalog, der sämtliche Modellparameter umfasst, zur Verfügung. Aufgrund der

dadurch gewährleisteten Parametrisierungsmöglichkeit wurde für die vorliegende Arbeit das Modell EROSION 3D ausgewählt.

3.3 Das Simulationsmodell EROSION 3D

EROSION 3D ist ein computergestütztes, physikalisch begründetes Modell zur Simulation des durch Einzelregen oder Niederschlagsreihen bewirkten Oberflächenabflusses sowie der dadurch verursachten Bodenerosion und –deposition auf Einzugsgebietsebene, einschließlich des Eintrages von Sedimenten und partikelgebundenen Schadstoffen in Oberflächengewässer. Die theoretischen Grundlagen des Modells wurden von J. SCHMIDT. (1996) entwickelt und zunächst in das auf ein ausgewähltes Hangprofil anwendbare Simulationsmodell EROSION 2D und später durch VON WERNER (1995) in die Einzugsgebietsversion EROSION 3D implementiert.

3.3.1 Anwendungsbereiche

Bezüglich der Abflusssimulation berechnet EROSION 3D ausschließlich den Oberflächenabfluss (Direct surface runoff, vgl. Abb. 2), dem wegen seiner geringen Verzögerungszeit für die Entstehung von Hochwasser besondere Bedeutung zukommt. Eine Abbildung der Zwischen- und Basisabflüsse erfolgt nicht, weshalb das Modell keine Aussagen zu Gesamtabflüssen liefert.

EROSION 3D ist in der Lage, den Einfluss unterschiedlicher Landnutzungen auf die Abflussbildung sowie auf die Bodenerosion abzubilden und eignet sich daher insbesondere für:

- Ereignisbezogene Quantifizierung von Oberflächenabfluss und Bodenaustrag in Abhängigkeit von Nutzung und landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsmethode,
- Identifizierung besonders abflusswirksamer Flächen sowie erosionsanfälliger Standorte,
- Bemessung dezentraler Hochwasser- und Erosionsschutzmaßnahmen und Bewertung deren Wirksamkeit und
- Berechnung des ereignisbezogenen Sedimenteintrages in Oberflächengewässer und in Talsperren sowie des damit verbundenen Nährstoff- und Schwermetalleintrages.

3.3.2 Aufbau

Die Einzugsgebietsversion des Modells EROSION 3D wurde auf Basis der theoretischen Grundlagen des EROSION 2D Modells durch *J. SCHMIDT (1991)* und *VON WERNER (1995)* entwickelt und ist bis zu einer Flächengröße von etwa 100 km² anwendbar.

Die Auflösung einer Rasterzelle liegt in Abhängigkeit des zu Grunde gelegten digitalen Geländemodells üblicherweise zwischen 5 und 20 m. Die maximale Auflösung beträgt 1 m. Die Simulation der Niederschlagszenarien wird in Zeitschritten von 1 bis 10 min Dauer vorgenommen. Für Langfristsimulationen kann eine beliebige Anzahl von Niederschlagsereignissen (Sequenzen) hintereinander geschaltet werden.

EROSION 3D besteht aus zwei Hauptkomponenten, der Preprocessing- und der Processing Komponente.

Die **Preprocessing-Komponente** mit GIS-Modul dient der digitalen Reliefanalyse, welche insbesondere Voraussetzung zur Berechnung der Fließrichtungen des Abflusses in Abhängigkeit vom Oberflächenrelief ist. Diese Komponente umfasst folgende Werkzeuge:

- Erzeugung der Geländeoberfläche (Raster) des digitalen Geländemodells
- Berechnung der Abflussverteilung aus den Höhenunterschieden zu den jeweils tieferliegenden Nachbarzellen und des linienhaften Entwässerungsnetzes,
- Berechnung der zu jeder Rasterzelle gehörenden Einzugsgebietsfläche und Fließweglänge (Abflusskonzentration) und
- Abgrenzung des Einzugsgebietes und Bestimmung des Gebietsauslasses (Rasterzelle, die den Austritt des Vorfluters aus dem Einzugsgebiet kennzeichnet)

Die **Processing-Komponente** von EROSION 3D führt die eigentlichen Simulationsrechnungen durch und berücksichtigt die folgenden hydrologischen Ansätze und Erosionsprozesse:

- Niederschlagsinfiltration (Green-Ampt-Ansatz),
- Abflussbildung (Niederschlagsüberschuss),
- Ablösung der Bodenpartikel von der Bodenoberfläche in Folge des Aufschlags der Regentropfen (Splash) und der Scherkraft des Oberflächenabflusses,
- Partikel- und daran gebundener Schadstofftransport sowie Deposition (differenziert nach 9 Bodenartenklassen) in Abhängigkeit von der Transportkapazität des Oberflächenabflusses,

- Kornsortierung entlang des Transportweges sowie Sedimentrückhalt in Stauhaltungen,
- Abflussretention durch kleine Staubecken und Fangdämme sowie
- Erosions- bzw. depositionsbedingte Änderungen des Oberflächenreliefs.

Abb. 4 zeigt ein Ablaufschema der durch EROSION 3D erfassten Abfluss- und Abtragsprozesse (Processing Komponente).

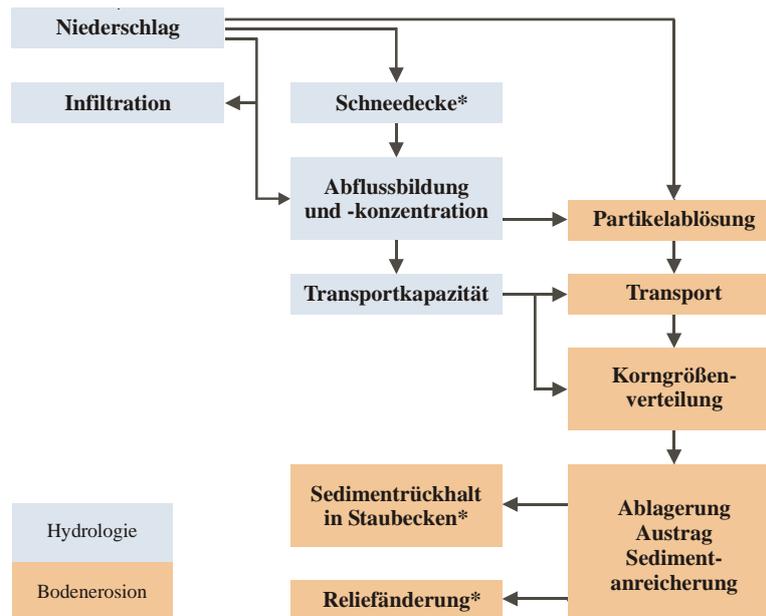


Abb. 4 Ablaufschema der durch EROSION 3D erfassten Abfluss- und Abtragsprozesse. Die mit * bezeichneten Komponenten sind optional bzw. bei der Langfristsimulation (Niederschlagsreihe) anwendbar, grau: Hydrologie, braun: Erosion (QUELLE: VON WERNER 2004).

Die Processing-Komponente untergliedert sich in das Infiltrations- und das Erosionsmodell. Im Folgenden werden die relevanten Gleichungen beider Teilmodelle dargestellt und erläutert.

EROSION 3D verfügt über Schnittstellen zu anderen Informations- und Simulationssystemen, so dass eine Übergabe der Eingabe- und Ausgabedaten gewährleistet ist.

3.3.3 Erosionsmodell

Das Erosionsmodell betrachtet nach J. SCHMIDT (1996) folgende Teilprozesse:

- **Ablösung** der Partikel von der Bodenoberfläche und
- **Transport** der Partikel mit dem Oberflächenabfluss und die Sedimentation.

Diese Prozesse werden für jedes Rasterelement untersucht und bilanziert.

Für die Erosion bzw. Deposition γ gilt:

$$(2) \quad \gamma = \frac{q_{s,in} - q_{s,out}}{\Delta x} * \Delta T$$

$q_{s,in}$ Sedimentstrom in das betrachtete Segment [kg/(m*s)]

$q_{s,out}$ Sedimentstrom aus dem betrachteten Segment [kg/(m*s)]

Δx Länge des Hangsegments [m]

ΔT Zeitintervall [s]

Ablösung der Partikel:

Die erosive Wirkung des abfließenden Wassers und der aufprallenden Tropfen wird aus den auf die Bodenoberfläche übertragenen Impulsströmen abgeleitet:

$$(3) \quad E = \frac{\varphi_q + \varphi_r}{\varphi_{crit}}$$

E Erosionskennzahl [-]

φ_q durch Oberflächenabfluss übertragener Impulsstrom [N/m²]

φ_r durch Tropfenimpuls übertragener Impulsstrom [N/m²]

φ_{crit} kritischer Impulsstrom [N/m²]

Der Koeffizient E gibt die Fähigkeit einer Strömung ($q < 0$) an, Partikel von der Bodenoberfläche zu lösen. Für den Fall, dass die Erosionskennzahl $E > 0$ ist, tritt Erosion auf, da die Summe der Impulsströme aus Oberflächenabfluss und Tropfenaufprall den Erosionswiderstand des Bodens (gekennzeichnet als kritischer Impulsstrom φ_{crit}), überschreitet. Für den Fall $E \leq 0$ tritt keine Erosion auf.

Der durch **Oberflächenabfluss übertragene Impulsstrom** φ_q ist wie folgt definiert:

$$(4) \quad \varphi_q = \frac{q * \rho_q * v_q}{\Delta x}$$

q Abflussvolumenstrom [m³/(m*s)]

ρ_q Flüssigkeitsdichte [kg/m³]

v_q mittlere Fließgeschwindigkeit des Abflusses [m/s]

Δx Länge des Rasterelements [m]

Der Abflussvolumenstrom ergibt sich aus dem im jeweiligen Rasterelement gebildeten Abfluss und dem Zufluss aus den benachbarten, höher liegenden Elementen.

$$(5) \quad q = (r_\alpha - i) * \Delta x + q_{in}$$

mit $r_\alpha = r \cdot \cos \alpha$

r Niederschlagsintensität [m/s]

α Hangneigungswinkel [°]

i Infiltrationsrate [m/s]

Δx Länge des Hangsegments [m]

q_{in} Zufluss aus darüber liegendem Hangsegment [m³/(m*s)]

Die mittlere Fließgeschwindigkeit v_q des Oberflächenabflusses kann bei hinreichend kleinen Zeitintervallen als gleichförmig angesehen werden und lässt sich aus folgender Beziehung ableiten:

$$(6) \quad v_q = \frac{1}{n} * \delta^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

$$(7) \quad \delta = \left[\frac{q * n}{S^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{3}{5}}$$

n Rauigkeitsbeiwert nach Manning-Strickler [s/m^{1/3}]

S Hangneigung [m/m]

δ Schichtdicke des Abflusses [m]

q Abflussrate [m³/(m*s)]

Der durch *Tropfenaufprall übertragene Impulsstrom* φ_r berechnet sich wie folgt:

$$(8) \quad \varphi_{r,\alpha} = r_\alpha * \Delta y * \Delta x * \rho_q * v_r * \sin \alpha * (1 - C_L)$$

r_α Niederschlagsintensität bezogen auf die Hangneigung α [m/s]

ρ_q Flüssigkeitsdichte des Niederschlages [kg/m³]

v_r mittlere Fallendgeschwindigkeit der Tropfen [m/s]

α Hangneigung [m/m]

C_L Bedeckungsgrad der Bodenoberfläche [-]

Dabei drückt der Bedeckungsgrad C_L das Verhältnis zwischen der mit Pflanzen, Pflanzenreste oder Steinen bedeckten Fläche A_{leaf} [m²] zur Gesamtfläche A [m²] aus:

$$(9) \quad C_L = \frac{A_{leaf}}{A}$$

Die Abschätzung der mittlere Fallendgeschwindigkeit der Tropfen v_r erfolgt auf Basis von durch LAWS & PARSONS (1943) gewonnenen Daten, da unter Feldbedingungen eine Messung dieses Parameters nur mit hohem technischen Aufwand möglich ist.

$$(10) \quad v_r = 4,5 * r^{0.12}$$

v_r mittlere Fallendgeschwindigkeit der Tropfen [m/s]
 r Niederschlagsintensität [mm/h]

Der kritische Impulsstrom φ_{crit} als Maß zur Charakterisierung des Erosionswiderstandes des Bodens ist durch Überströmungsversuche oder Beregnungsversuche experimentell bestimmbar. Dabei wird unterstellt, dass für die Partikelablösung ein Mindestabfluss q_{crit} notwendig ist, der abhängig von den Eigenschaften des überströmten Bodens ist.

Wird der Mindestabfluss q_{crit} in nachfolgende Gleichung eingesetzt, so ergibt sich der kritische Impulsstrom φ_{crit} :

$$(11) \quad \varphi_{crit} = \frac{q_{crit} * \rho_q * v_q}{\Delta x}$$

q_{crit} in Strömungsversuchen ermittelter kritischer Mindestabfluss, bei welchem, in Abhängigkeit der spezifischen Bodeneigenschaften Erosion einsetzt [$m^3/(m*s)$]

ρ_q Flüssigkeitsdichte [kg/m^3]

v_q mittlere Fließgeschwindigkeit des Abflusses [m/s]

Δx Länge des Rasterelements [m]

Zur quantitativen Beschreibung dieser Zusammenhänge korrelierte J. SCHMIDT (1996) die Erosionskennzahl E mit experimentell ermittelten Feststoffausträgen. Daraus ergab sich folgende empirische Beziehung:

$$(12) \quad q_{s,pot} = (1.75 * E - 1.75) * 10^{-4}$$

$q_{s,pot}$ potentieller Feststoffmassenstrom [$kg/(m*s)$]

Beim **Transport** der Bodenpartikel wirken zwei entgegen gesetzte Prozesse

- Die in Suspension befindlichen Partikel sinken infolge der Schwerkraft in einer vom Teilchendurchmesser abhängigen Geschwindigkeit zu Boden.
- Dem Absinken der Bodenteilchen wirkt eine aufwärts gerichtete turbulente Strömungskomponente entgegen, die im Modell als vertikale Impulsstromkomponente $\varphi_{q,vert}$ abgebildet wird. Dabei wird unterstellt, dass $\varphi_{q,vert}$ ein Teil des gesamten Impulsstromes aus Oberflächenabfluss und Tropfenaufrall ist.

Die Sinkgeschwindigkeit von in ruhender Flüssigkeit suspendierten Teilchen beschreibt das STOKESche Gesetz:

$$(13) \quad v_p = \frac{D^2 * (\rho_p - \rho_q) * g}{18 * \eta}$$

v_p	Sinkgeschwindigkeit [m/s]
D	Teilchendurchmesser [m]
ρ_p	Dichte der Teilchen [kg/m ³]
ρ_q	Flüssigkeitsdichte [kg/m ³]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
η	Viskosität der Flüssigkeit [kg/(m*s)]

Im Modell wird die Sinkgeschwindigkeit über diese Gleichung für die 9 Korngrößenklassen berechnet.

Der Massenstrom w_p der absinkenden Bodenpartikel ergibt sich aus

$$(14) \quad w_p = c * \rho_p * \Delta x * \Delta y * v_p$$

w_p	Massenstrom [kg/(m ² *s)]
c	Konzentration der suspendierten Teilchen in der Flüssigkeit [m ³ /m ³]
ρ_p	Dichte der Partikel [kg/m ³]
Δx	Länge des Rasterelements [m]
Δy	Breite des Rasterelements [m]
v_p	Sinkgeschwindigkeit [m/s]

Durch Multiplikation der Sinkgeschwindigkeit v_p mit dem Massenstrom w_p der absinkenden Teilchen ergibt sich der kritische Impulsstrom φ_{crit} . Wird dieser unterschritten, sinken die vorher in Suspension befindlichen Teilchen zu Boden.

$$(15) \quad \varphi_{crit} = w_p * v_p = c * \rho_p * \Delta x * \Delta y * v_p^2$$

Die *turbulente Strömungskomponente* wird wie folgt definiert:

$$(16) \quad \varphi_{q,vert} = \frac{1}{\kappa} * (\varphi_q + \varphi_{ra})$$

κ	Depositionskoeffizient [-]
----------	----------------------------

Der Depositionskoeffizient κ wurde durch iterative Anpassung der berechneten an die gemessene Kornverteilung mit $\kappa \approx 1000$ ermittelt.

Die Transportkapazität eines Oberflächenabflusses ist demnach dann erreicht, wenn die vertikale Impulsstromkomponente gleich dem kritischen Impulsstrom der in Suspension gehaltenen Partikel ist:

$$(17) \quad \varphi_{q,vert} = \varphi_{p,crit}$$

Die maximale Konzentration der Partikel im Oberflächenabfluss bei Transportkapazität ergibt sich durch Einsetzen der Gleichungen (15) und (16) in (17):

$$(18) \quad c_{max} * \rho_p * \Delta x * \Delta y * v_p^2 = \frac{1}{K} * (\varphi_q + \varphi_{ra})$$

Nach Umstellen der Gleichung nach c_{max} erhält man:

$$(19) \quad c_{max} = \frac{1}{K} * \frac{(\varphi_q + \varphi_{ra})}{\rho_p * \Delta x * \Delta y * v_p^2}$$

Die Transportkapazität des Abflusses berechnet sich aus:

$$(20) \quad q_{s,max} = c_{max} * \rho_p * q$$

mit:

$q_{s,max}$ maximale Transportkapazität [kg/(m*s)]

ρ_p Dichte der Partikel [kg/m³]

q Abflussrate [m³/(m*s)]

3.3.4 Infiltrationsmodell

Das Infiltrationsmodell von EROSION 3D beruht auf dem Ansatz von *GREEN UND AMPT (1911)*. Bei dieser Modellvorstellung wird vereinfacht angenommen, dass das Niederschlagswasser kolbenförmig im Boden vordringt und den verfügbaren Porenraum vollständig aufsättigt (*HARTGE 1978*).

Die mathematische Beschreibung der Infiltrationsrate erfolgt durch die Darcy-Gleichung für die vertikale Wasserbewegung im Boden:

$$(21) \quad i = -k \frac{\Delta(\psi_m + \psi_g)}{x_f(t)}$$

i	Infiltrationsrate [m/s]
k	hydraulische Leitfähigkeit [kg*s/m ³]
ψ_m	Matrixpotential [J/kg]
ψ_g	Gravitationspotential [J/kg]
$x_f(t)$	Eindringtiefe der Befeuchtungsfront [m] in Abhängigkeit der Zeit t

In Gleichung 21 sind die stationäre Komponente $i_1 = f(\psi_g)$ und die instationäre Komponente $i_2 = f(\psi_m)$ enthalten.

Für die stationäre Komponente gilt unter der Voraussetzung, dass i als Massenstrom und ψ_g unter Bezug auf die Masse definiert ist:

$$(22) \quad i_1 = -k \frac{\Delta(\psi_g)}{x_{f1}} = -k * g$$

g Erdbeschleunigung [m/s²]

Für die instationäre Komponente gilt:

$$(23) \quad i_2 = -k \frac{\Delta(\psi_m)}{x_{f2}}$$

Basierend auf der Modellvorstellung, bei der die Befeuchtungsfront sukzessive in den Boden vorrückt, ergibt sich die im betrachteten Zeitintervall infiltrierende Wassermenge i durch Multiplikation der Vorrückgeschwindigkeit (dx_f/dt) mit der Differenz aus dem Anfangswassergehalt und dem Wassergehalt an der Befeuchtungsfront.

Somit gilt für die stationäre Komponente:

$$(24) \quad -k * g = \rho_q * \Delta\Theta * dx_{f1} / dt$$

$$\text{mit } \Delta\Theta = \Theta_s - \Theta_0$$

Und die instationäre Komponente:

$$(25) \quad -k \frac{\Delta\psi_m}{x_{f2}} = \rho_q * \Delta\Theta * dx_{f2} / dt$$

$$\text{mit } \Delta\psi_m = \psi_{m0} - \psi_{ms}$$

ρ_q	Flüssigkeitsdichte [kg/m ³]
Θ_s	Wassergehalt bei Sättigung [m ³ /m ³]
Θ_0	Anfangswassergehalt [m ³ /m ³]
ψ_{m_s}	Matrixpotential bezogen auf den Wassergehalt in der Transportzone [J/kg]
ψ_{m_0}	Matrixpotential bezogen auf den Anfangswassergehalt [J/kg]
t	Zeit [s]

näherungsweise gilt:

$$(26) \quad \psi_{m_s} \approx 0$$

$$(27) \quad \Delta\psi_m \approx \psi_{m_0}$$

$$(28) \quad k \approx k_s$$

Durch Umstellen und Integration ergibt sich die Eindringtiefe der Befeuchtungsfront für die stationäre Komponente:

$$(29) \quad x_{f_1} = - \left[\frac{k_s * g * t}{\rho_q * \Delta\Theta} \right]$$

und für die instationäre Komponente:

$$(30) \quad x_{f_2} = - \left[\frac{2k_s * \psi_{m_0} * t}{\rho_q * \Delta\Theta} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Die Eindringtiefe der Befeuchtungsfront x_f ergibt sich aus der Summe der beiden Komponenten x_{f_1} und x_{f_2} :

$$(31) \quad x_f = x_{f_1} + x_{f_2} = - \left[\left[\frac{k_s * g * t}{\rho_q * \Delta\Theta} \right] + \left[\frac{2k_s * \psi_{m_0} * t}{\rho_q * \Delta\Theta} \right]^{\frac{1}{2}} \right]$$

Setzt man Gleichung (31) in die Darcy-Gleichung (21) ein, enthält diese nur noch solche Variablen, die durch unmittelbare Messung gewonnen oder über Schätzverfahren aus bekannten Größen abgeleitet werden können.

Schätzung des Matrixpotentials ψ_{m_0} aus dem zugehörigem Anfangswassergehalt Θ_0

Da der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Matrixpotential meßtechnisch nur mit großem Aufwand ermittelt werden kann, wird hierfür auf das Schätzverfahren nach VAN GENUCHTEN (1980) zurückgegriffen

$$(32) \quad \Theta_{\Psi_m} = \Theta_r + \frac{\Delta(\Theta_s - \Theta_r)}{\left[1 + (\alpha * \Psi_m)^n\right]^m}$$

Θ_{Ψ_m} Wassergehalt, dem Matrixpotential Ψ_m zugeordnet [m^3/m^3]

Θ_s Sättigungswassergehalt [m^3/m^3]

Θ_r Restwassergehalt bei pF 4,2 [m^3/m^3]

α, n, m Parameter ohne physikalische Bedeutung [-]

Ψ_m Matrixpotential [hPa]

da n und m voneinander abhängig sind, kann $m=1$ gesetzt werden (VEREecken ET AL. 1989).

Nach dem Einsetzen des Anfangswassergehaltes Θ_0 für Θ_{Ψ_m} und Umstellen der Gleichung ergibt sich das dem Anfangswassergehalt zugehörige Matrixpotential Ψ_{m_0} :

$$(33) \quad \Psi_{m_0} = \left[\left(\frac{\Theta_s - \Theta_r}{\Theta_0 - \Theta_r} - 1 \right) * \frac{1}{\alpha^n} \right]^{\frac{1}{m}}$$

Da die Gleichungen (21) und (32) unterschiedliche Einheiten des Matrixpotentials enthalten, erfordert dies wie folgt eine Umrechnung des Matrixpotentials Ψ_{m_0} [hPa] auf ψ_{m_0} [J/kg]

$$(34) \quad \psi_{m_0} = \frac{\Psi_{m_0} * 100}{\rho_q}$$

Schätzung des Sättigungswassergehaltes Θ_s , des Restwassergehaltes Θ_r sowie der Parameter α und n

Für o.g. Parameter zur Lösung von Gleichung (33) werden von VEREecken ET AL. (1989) folgenden Regressionsgleichungen angegeben:

$$(35) \quad \Theta_s = 0,81 - 0,283 * 10^{-3} * \rho_b + 0,001 * T$$

$$(36) \quad \Theta_r = 0,015 + 0,005 * T + 0,014 * C_{org}$$

$$(37) \quad \ln(\alpha) = -2,486 + 0,025 * S - 0,315 * C_{org} - 2,617 * \rho_b - 0,023 * T$$

$$(38) \quad \ln(n) = 0,053 - 0,009 * S - 0,013 * T + 0,00015 * S^2$$

ρ_b	Lagerungsdichte [kg/m ³]
C_{org}	Gehalt an organischem Kohlenstoff [M %]
T	Tongehalt [M %]
S	Sandgehalt [M %]

Schätzung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit k_s

Die Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ist ebenfalls mit hohem messtechnischem Aufwand verbunden. Da dieser Parameter im Wesentlichen von der Lagerungsdichte und der Textur des Bodens abhängig ist, wurde von *CAMPBELL (1985)* folgende Näherungsformel entwickelt:

$$(39) \quad k_s = 4 * 10^{-3} * \left(\frac{1,3 * 10^{-3}}{\rho_b} \right)^{1,3b} * \exp(-0,069 * T - 0,037 * U)$$

ρ_b	Lagerungsdichte [kg/m ³]
T	Tongehalt [kg/kg]
U	Schluffgehalt [kg/kg]
b	siehe Parameter der folgenden Gleichung

Der Parameter b leitet sich entsprechend Gleichung (39) aus dem mittleren Partikeldurchmesser \bar{D} und der zugehörigen Standardabweichung δ_p ab.

$$(40) \quad b = (10^{-3} * \bar{D})^{-0.5} + 0.2\delta_p$$

\bar{D}	mittlerer Partikeldurchmesser [m]
δ_p	Standardabweichung [m]

Der beschriebene Ansatz zur Modellierung der Infiltration ist physikalisch begründet und lässt prinzipiell die vertikale Differenzierung der Bodensäule in beliebig viele unterschiedliche Kompartimente, d.h. jeweils homogene Schichten, zu. Auf die Möglichkeit der vertikalen Differenzierung wurde in *EROSION 3D* bisher verzichtet, um den für die Anwendung erforderlichen Parametrisierungsaufwand zu begrenzen. Diese Einschränkung wurde als vertretbar betrachtet, da Regenerationsereignisse in der Regel von kurzer Dauer sind und die Befeuchtungsfront während dieser Zeit erfahrungsgemäß nur den obersten homogenen Abschnitt der Böden durchdringt.

Die Prognose der Abflussbildung und der Erosion in Folge des katastrophalen Niederschlagsereignisses vom August 2002 (*VON WERNER 2004*) hat allerdings gezeigt, dass eine adäquate Simulation der standortbezogenen Infiltration und Abflussbildung bei lang

anhaltenden Niederschlagsereignissen und hoher Vorfeuchte mit dem vorhandenen Ein-Schicht-Modell nicht möglich ist. Hieraus ergab sich die Notwendigkeit, eine vertikale Differenzierung (Mehr-Schichten-Ansatz) in das Infiltrationsmodell einzuführen, um die bei diesen Niederschlagsereignissen zu erwartende Infiltration in tiefer liegende Bodenschichten besser abbilden zu können. Dies gilt insbesondere für die Berücksichtigung stauender Boden- oder unterlagernder Gesteinschichten.

Für den Fall eines vertikal in mehrere Schichten gegliederten Bodenprofils erfolgt die Simulation nach J. SCHMIDT (2003) entsprechend folgender Verfahrensweise:

Die Abarbeitung der pro Zelle verfügbaren schichtenbezogenen Datensätze beginnt mit der obersten Bodenschicht, sobald das Niederschlagsereignis einsetzt. Aus der Auswertung des ersten Zeitschrittes ergibt sich u. a. die Eindringtiefe x_f der Befeuchtungsfront. Durch den Vergleich der Schichtmächtigkeiten wird überprüft, ob die Befeuchtungsfront bereits die zweite Schicht erreicht hat oder sich noch in der obersten Schicht befindet. Hat die Befeuchtungsfront die erste Schicht noch nicht durchdrungen, wird mit der Auswertung weiterer Zeitschritte (mit den Parametern der ersten Bodenschicht) solange fortgefahren, bis die Befeuchtungsfront die zweite Bodenschicht erreicht hat. Für die Auswertung des nachfolgenden Zeitschrittes wird das Matrixpotential, in welcher sich die Befeuchtungsfront gerade befindet, herangezogen. Des Weiteren wird die kleinste hydraulische Leitfähigkeit, zwischen Oberboden und aktueller Tiefe der Befeuchtungsfront ermittelt und zur Auswertung des aktuellen Zeitschrittes verwendet. Beim Erreichen der nachfolgenden Schichtgrenzen wird analog verfahren. Überschreitet die Befeuchtungsfront innerhalb eines Zeitschrittes eine Schichtgrenze, wird eine entsprechende Teilung der Zeitschrittlänge vorgenommen.

Der letzten definierten Schicht wird eine Mächtigkeit von 100.000 m unterstellt, so dass sich keine Limitierung der Berechnung durch die Tiefe der Bodensäule ergeben kann. Es besteht jedoch die Möglichkeit, den Übergang in den Grundwasserleiter zu definieren $k_s = k_{s,GW}$. Erreicht die Befeuchtungsfront in diesem Falle den Grundwasserspiegel ($x_f \geq x_{GW}$) und ist dabei die aktuelle Infiltrationsrate größer als die Abstromrate, ist die Infiltrationsrate i nur noch eine Funktion der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit k_s des Grundwasserleiters sowie dessen Gefälles S . Letzteres kann in vielen Fällen durch das Gefälle S der Bodenoberfläche angenähert werden:

$$(41) \quad q_{GW} \approx k_{s,GW} * S$$

q_{GW} Grundwasserabstrom [$m^3/(m^2s)$]

S Gefälle der Bodenoberfläche [m/m], $S \leq 1$

$k_{s,GW}$ gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters [m/s]

Für den Fall, dass die aktuelle Infiltrationsrate i kleiner ist als die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters, wird die Berechnung mit der aktuellen Infiltrationsrate fortgesetzt. Die Berechnung endet mit dem letzten Zeitintervall des Niederschlagsereignisses.

3.3.4.1 Skelettgehalt

EROSION 3D berücksichtigt den Skelettgehalt zunächst durch die Korrektur der hydraulischen Leitfähigkeit, da das Skelett den aus der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit abgeleiteten Durchfluss hemmt:

$$(42) \quad k_s = k_s \cdot \left(1 - \frac{GS}{100}\right)$$

mit

k_s hydraulische Leitfähigkeit [kg^*/m^3]

GS Grobskelettgehalt [%]

Dies führt dazu dass mit einer Erhöhung des Skelettgehaltes eine Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit erfolgt.

3.3.4.2 Infiltrationskurve eines geschichteten Bodens

EROSION 3D ermöglicht die Ausgabe von Infiltrationskurven jeweils bezogen auf eine ausgewählte Rasterzelle. Hierfür ist es notwendig, unter dem Menüpunkt Submodel / Infiltration model / Watch / watch single parameter die Option „Infiltration“ zu aktivieren. EROSION 3D liefert dann in der Ausgabedatei Zeitschritt bezogene Infiltrationsraten im Rasterformat, woraus sich die Infiltrationskurve erstellen lässt.

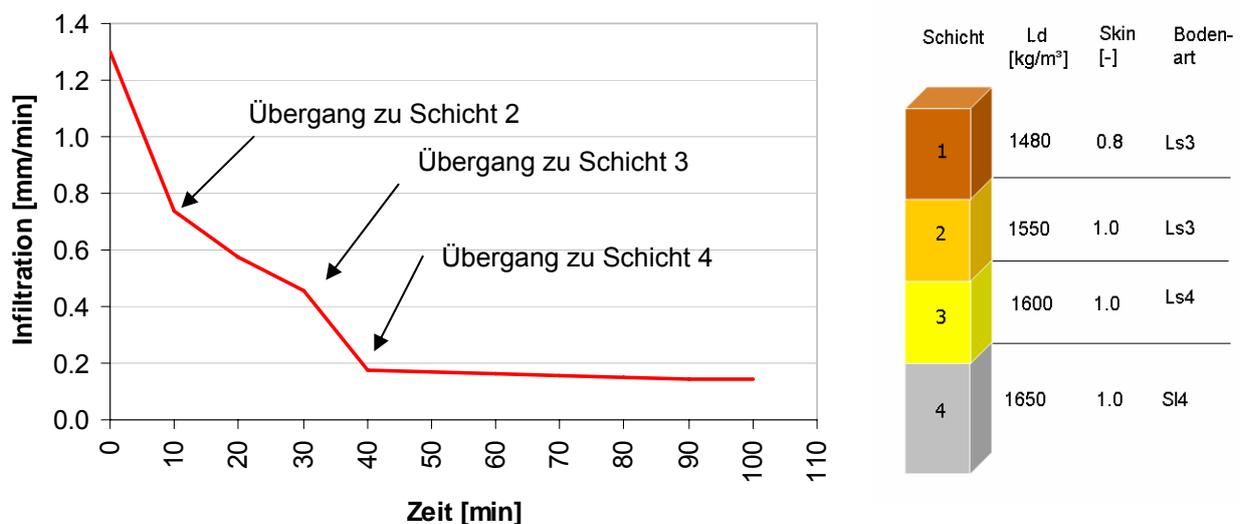


Abb. 5 Infiltrationskurve eines geschichteten Bodens unter Angabe der relevanten schichtenbezogenen Parameter.

Abb. 5 zeigt beispielhaft die berechnete Infiltrationskurve eines geschichteten Bodens. Die relevanten, schichtenbezogenen Parameter dieser Bodensäule sind auf der rechten Seite der Abbildung angegeben. Die Infiltrationskurve zeigt signifikante Knickpunkte, die jeweils den Übertritt der Befeuchtungsfront in die nachfolgende Schicht kennzeichnen.

3.3.5 Ein- und Ausgabeparameter

Die Ein- und Ausgabeparameter des Modells sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Tab. 2 Ein- und Ausgabeparameter von EROSION 3D

Eingabeparameter	Boden	
	Lagerungsdichte	kg/m ³
	Anfangswassergehalt	V %
	C _{org} -Gehalt	M %
	Erosionswiderstand	N/m ²
	Rauhigkeit	s/m ^{1/3}
	Bodenbedeckungsgrad	%
	Korngrößenklassen	M %
	Skinfaktor	-
	Relief	
x,y,z-Koordinaten	m	
Ausgabeparameter	Niederschlag	
	Niederschlagsdauer	min
	Niederschlagsintensität	mm/min
	Einzelzellenbezogene Parameter (beliebige Flächenzelle)	
	Erosion, Deposition (Sedimentbilanz)	kg/m ²
	Abflussvolumen	m ³ /m
	Gerinnebezogene Parameter (beliebige Zelle im Vorfluternetz)	
	Spezifisches Abflussvolumen aus dem Untersuchungsgebiet des Vorfluternetzes	m ³ /m
	Spezifischer Sedimentzufluss in das Vorfluternetz	kg/m
	Nettoerosion im Untersuchungsgebiet des Vorfluternetzes	t/ha
	Ton- bzw. Schluffanteil des eingetragenen Sediments	M %
	Untersuchungsgebietsbezogene Parameter (beliebige Zelle im UG)	
	Zufluss aus dem jeweiligen Untersuchungsgebiet	m ³ /m
	Sedimentzufluss aus dem jeweiligen Einzugsgebiet	kg/m
	Sedimentkonzentration	kg/m ³
	Tonanteil des transportierten Sediments	M %
	Schluffanteil des transportierten Sediments	M %
	Gesamtaustrag aus dem Zelleinzugsgebiet, differenziert nach 9 Korngrößenklassen	kg/m
	Durchschnittlicher Abtrag innerhalb des jeweiligen Zelleinzugsgebietes	t/ha
Durchschnittliche Deposition innerhalb des jeweiligen Zelleinzugsgebietes	t/ha	
Durchschnittlicher Austrag (Nettoerosion) aus dem jeweiligen Zelleinzugsgebiet	t/ha	

Ansichts der Bedeutung der Bodenparameter (s. Tab. 2) für die Abbildung der Landnutzungseinflüsse soll im Folgenden näher auf diese Parameter eingegangen werden. Wie Tab. 3 zeigt, sind diese von verschiedenen Einflussgrößen abhängig.

Tab. 3 Abhängigkeiten der modellspezifischen Parameter von verschiedenen Einflussgrößen

	Bodenart	Jahreszeit	Nutzung/ Feldfrucht	Bewirtsch. methode	Witterung/ Feuchte
Lagerungsdichte [kg/m ³]	x	x	x	x	
Anfangswassergehalt [V %]	x			x	x
C _{org} -Gehalt [M %]	x		x		
Erosionswiderstand [N/m ²]	x	x	x	x	
Rauhigkeit [s/m ^{1/3}]	x	x	x	x	
Bedeckungsgrad [%]		x	x	x	
Korngrößenklassen [M %]	x				
Skinfaktor [-]	x	x	x	x	x

Die **Lagerungsdichte** beeinflusst entscheidend die Menge des speicherbaren Wassers, da mit zunehmender Lagerungsdichte ein immer geringeres Porenvolumen zur Verfügung steht. Des Weiteren spielt dieser Parameter für die Berechnung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit nach *CAMPBELL (1985)* eine wesentliche Rolle. Die Lagerungsdichte unterliegt auf bearbeiteten Böden deutlichen saisonalen Schwankungen, während sie unter Dauerkulturen annähernd konstant ist (*MICHAEL ET AL. 2000*).

Die Feuchte des Bodens zu Beginn eines Starkniederschlagsereignisses (**Anfangsbodenfeuchte**) bestimmt zusammen mit der Lagerungsdichte wieviel Porenraum für die Speicherung von Niederschlagswasser zur Verfügung steht. Die Anfangsbodenfeuchte findet daher Eingang in die Berechnung der infiltrierenden Wassermenge *i*. Der Parameter ist neben der Witterung und dem Pflanzenentzug vor allem von der Bodenart abhängig und steigt tendenziell mit abnehmender Korngröße, da die Kapillarkräfte zunehmen. Bei Feldkapazität ist beispielsweise der Wassergehalt eines Schluffbodens deshalb höher der eines sandigen Bodens.

Der **C_{org}-Gehalt** beeinflusst maßgeblich den Erosionswiderstand der Böden. Dieser Parameter findet außerdem Eingang in die Berechnung der Infiltrationsrate (Verreecken Parameter). Der C_{org}-Gehalt wird im Wesentlichen von der Nutzung (Ernteentzug) und Bewirtschaftungspraxis bestimmt, aber auch vom Bodenwasserhaushalt.

Der **Erosionswiderstand** ist ein bodenspezifischer Kennwert, welcher im Rahmen des Bodenerosionsmessprogramms Sachsen aus experimentell bestimmten Abtragsdaten ermittelt wurde (MICHAEL 2000). Er ist abhängig von der Bodenart, dem C_{org} -Gehalt und der vorangegangenen Bodenbearbeitungsmaßnahme. Er steigt mit zunehmendem C_{org} -Gehalt, da Humus das Bodengefüge stabilisiert. Bei Dauerkulturen ist er annähernd konstant, während er bei typischer Ackernutzung saisonalen Schwankungen unterworfen ist. Durch mechanischen Eingriff in den Boden, wie beispielsweise Pflügen und Saatbettbereitung, wird der Erosionswiderstand herabgesetzt (u. a. wegen der feinen Zerteilung der Bodenaggregate).

Die **Rauhigkeit** geht im Modell in die Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit ein, die mit zunehmender Rauhigkeit abnimmt. Bei unbedeckten Böden steigt die Rauhigkeit mit zunehmender Aggregatgröße. Für mit Vegetation bzw. Mulch bedeckte Oberflächen steigt sie üblicherweise mit zunehmender Dichte der Vegetation bzw. Mulchmenge. Entsprechend zeigt die Rauhigkeit u. U. eine starke saisonale Abhängigkeit.

Der **Bedeckungsgrad** des Bodens gibt an, zu welchem Anteil die Bodenoberfläche durch Pflanzenmaterial bedeckt ist. Er ist abhängig von der angebauten Fruchtart und deren Entwicklungsstadium sowie von der Art der Bewirtschaftung. Bei konservierender Bewirtschaftung wird aufgrund der Mulchauflage ein höherer Bedeckungsgrad erreicht als bei konventioneller Bewirtschaftung. Für die Erosionsanfälligkeit eines Standortes ist der Bedeckungsgrad von großer Bedeutung, da in Abhängigkeit dieses Parameters der durch Regentropfenaufprall übertragene Impulsstrom entsprechend abmindert wird, so dass unter sonst gleichen Bedingungen die Erosion mit zunehmendem Bedeckungsgrad abnimmt.

Die **Korngrößenklassen** der jeweiligen Bodenart gehen sowohl in das Erosionsmodell (Berechnung des Transports bzw. der Sedimentation der Partikel) als auch in das Infiltrationsmodell (Berechnung des k_f -Wertes, Schätzung des dem Anfangswassergehalt zugehörigen Matrixpotentials nach VERECKEN 1989) ein. Die Bodenart wird für die Modellierung durch die Bodenkarten (RBS) und BK_{konz} vorgegeben und ist keinen saisonalen Schwankungen unterworfen.

Die Berechnung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit erfolgt im Modell EROSION 3D. nach CAMPBELL (1985). Die Einflüsse von Makroporen oder Verschlämmung auf den Wassertransport bleiben dabei zunächst unberücksichtigt. Infolge dessen ist ggf. eine Korrektur notwendig. Hierzu dient der so genannte **Skinfaktor**, welcher empirisch durch Anpassung berechneter k_f -Werte an gemessene bestimmt werden muss. Der Skinfaktor ist 1 wenn keine Abweichung vorliegt. Ist der gemessene k_f -Wert kleiner als der berechnete ist der Skinfaktor < 1 . Es liegt Verschlämmung vor. Ist der gemessenen k_f -Wert hingegen größer als der berechnete, nimmt der Skinfaktor Werte > 1 an. Dies ist dann der Fall, wenn im

Boden Makroporen vorliegen. Wegen der Abhängigkeit von der Bewirtschaftung unterliegt der Skinfaktor, zumindest bei Ackerkulturen, einer zeitlichen Variabilität.

3.3.6 Datenbankprozessor

Die in dieser Arbeit durchzuführenden Parametrisierungsschritte werden mit Unterstützung des EROSION 3D-Datenbankprozessors (*GEOGNOSTICS 2005*) vorgenommen. Dabei handelt es sich um eine Schnittstelle zwischen den primären Basisdaten, welche von verschiedenen Institutionen routinemäßig erhoben werden, und dem Simulationsmodell EROSION 3D.

Ohne diesen Datenbankprozessor (Dproc) müsste der Anwender die modellspezifischen Zielparameter aus dem EROSION 3D-Parameterkatalog oder anderen Datenquellen herausuchen und in eine Tabelle übertragen. Durch diese subjektiv geprägte Methode ist eine Vergleichbarkeit von Ergebnissen unterschiedlicher Nutzer kaum möglich, hinzu kommt die hohe Fehleranfälligkeit aufgrund der händischen Parametereingabe. Mit Hilfe des Dproc wird dies weitgehend vermieden. Der größte Nutzen des Dproc besteht aber darin, dass der vorher hohe manuelle Parametrisierungsaufwand nunmehr automatisch durchgeführt wird. Die detaillierte Funktionsweise ist dem Benutzerhandbuch (*GEOGNOSTICS 2005*) zu entnehmen. In der vorliegenden Arbeit wird der EROSION 3D-Datenbankprozessor erstmals durchgängig für die Parametrisierung des Modells eingesetzt.

4 Untersuchungsgebiete

4.1 Lage und räumliche Ausdehnung

Beide Untersuchungsgebiete befinden sich in Sachsen. Das rund 6 km² große Untersuchungsgebiet Klatschbach (bei Rossau) ist Teil des Mulde Lösshügellandes, das ca. 9 km² große Untersuchungsgebiet Oberreichenbacher Bach (bei Oberschöna) erstreckt sich über die unteren Lagen des Erzgebirges (Abb. 6). Der Oberreichenbacher Bach mündet ebenso wie der Klatschbach in die Striegis, welche ihrerseits in die Freiburger Mulde fließt und über die Vereinigte Mulde im Raum Dessau die Elbe erreicht.

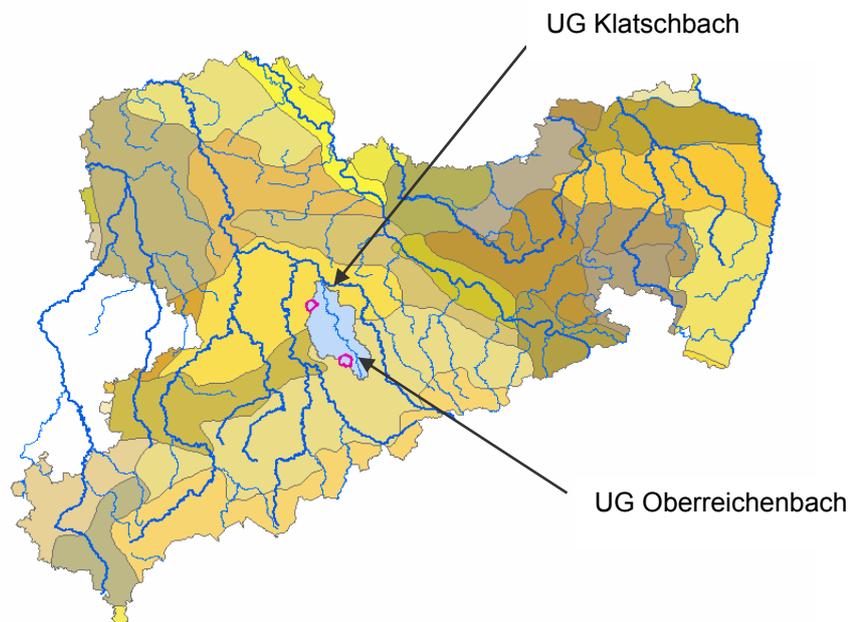


Abb. 6 Übersichtskarte der Untersuchungsgebiete Klatschbach und Oberreichenbach, eingeordnet in die Karte der Bodenregionen und -landschaften Sachsens (SLfUG 2005).

4.2 Naturräumliche Einordnung

Das Untersuchungsgebiet Klatschbach (UG Klatschbach) ordnet sich nach *BERNHARDT ET AL.* (1986) in die Naturregion der „Lössbestimmten Hügelländer Sachsens“ und genauer in den Naturraum des Mulde-Lösshügellandes ein. Diese unterlagen während des Pleistozäns vorrangig periglaziale Einfluss. Durch thermische Gletscherfallwinde wurden Lössschichten mit bis zu 10 m Mächtigkeit aufgeweht (*BASTIAN 2003*). Im südlichen Bereich der Sächsischen Lösshügelländer, in denen sich auch das UG Klatschbach befindet, ist die

Mächtigkeit der Lösslehm-Decken allerdings geringer. Für das UG Klatschbach wird eine Mächtigkeit von durchschnittlich 3 m angegeben (*BASTIAN 2003*). Das Untersuchungsgebiet Oberreichenbacher Bach (UG Oberreichenbach) wird nach *BERNHARDT ET AL. (1986)* der Naturregion der „Sächsischen Mittelgebirge“ und dort wiederum dem Naturraum „Unteres Osterzgebirge“ zugeordnet. Es befindet sich in der Übergangsregion zwischen Mulde-Lösshügelland und der Erzgebirgsregion. Dort nehmen die periglazial abgelagerten Löss-Lehme auf weniger als 2 m Mächtigkeit ab (*BASTIAN 2003*)

4.3 Relief

Aus den Digitalen Geländemodellen (Abb. 7) des UG Oberreichenbach bzw. UG Klatschbach geht hervor, dass es sich in beiden UG um ein sehr hügeliges Relief mit deutlich sichtbaren Tiefenlinien (konvergierendes Gefälle) handelt. Die mittlere Hangneigung der landwirtschaftlich genutzten Flächen beträgt ca. 3 %. Die Hangneigungen können bis etwa 18 % erreichen, wobei diese steilen Bereiche mit Wald bedeckt sind.

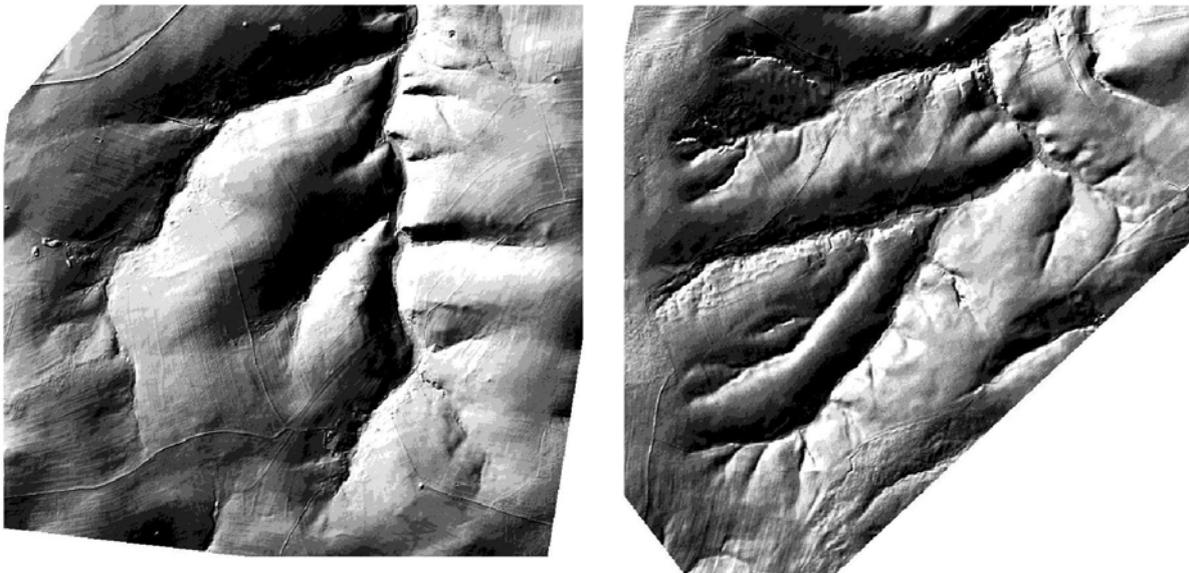


Abb. 7 Reliefdarstellungen der Untersuchungsgebiete auf Grundlage der mittels Laserscan erstellten Digitalen Geländemodelle (*FA. MILAN 2004*). Oberreichenbacher Bach (links) und Klatschbach (rechts).

Den mit 357 m ü. NN tiefsten Punkt (Gebietsauslass) des UG Oberreichenbach bildet die Einmündung des Oberreichenbacher Baches in die Striegis bei Oberschöna. Die höchste Erhebung ist hier der Lindaer Höhenrücken mit 520 m ü. NN.

Im UG Klatschbach befindet sich der tiefste Punkt und damit die Einmündung des Klatschbaches in die Striegis in einer Höhe von 210 m ü. NN, die höchste Erhebung im Gebiet liegt in 340 m ü. NN.

4.4 Geologie

Der Freiburger Graugneis, welcher im UG Oberreichenbach in Form des Wegfarther Gneises vertreten ist, stellt das Leitgestein der Region dar. Bei der Verwitterung bildet sich Gneisgrus. Aufgrund der geringmächtigen Lösslehmüberdeckung liegen in allen Bodenschichten kryoturbar eingemengte Gneisbruchstücke vor.

Das Leitgestein im UG Klatschbach ist der Granulit, ein heller kristalliner Schiefer hohen Metamorphosegrades. Beim Verwitterungsprozess zerfällt er zu Sand. Das Gestein des Granulitgebirges ist im UG Klatschbach flächendeckend durch Lösslehm überdeckt. Darüber hinaus findet man im UG Klatschbach auch pleistozäne Ablagerungen von Schmelzwasserkiesen und Geschiebemergeln (WAGENBRETH UND STEINER 1982).

4.5 Klima

Beide Untersuchungsgebiete liegen im Übergangsbereich von warmgemäßigtem zu kühl gemäßigtem Klima der mittleren Breiten (KÖPPEN 1936). Die Jahresmitteltemperatur im UG Oberreichenbach beträgt 7.5 - 8.0°C. Die Jahresniederschlagsmenge liegt zwischen 800 - 900 mm. Im UG Klatschbach beträgt die Jahresdurchschnittstemperatur 8.0 - 8.5°C, die Jahresniederschlagsmenge ist mit 700 - 800 mm dagegen etwas niedriger. Das Klima beider Untersuchungsgebiete lässt sich als vollhumid beschreiben.

4.6 Böden

Im UG Oberreichenbacher Bach liegen vorrangig Braunerden und Pseudogleye vor (Abb. 8).

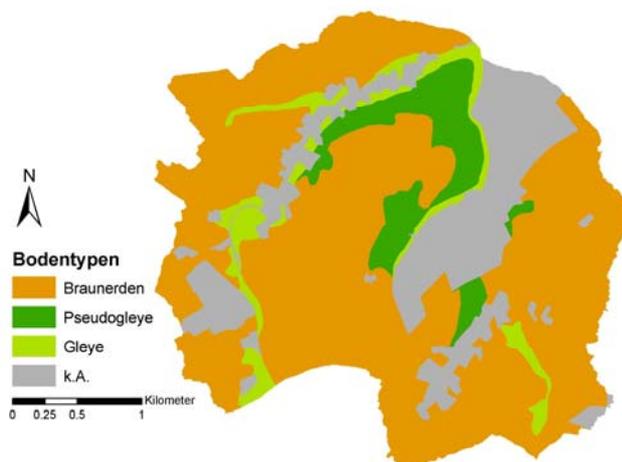


Abb. 8 Verteilung der Bodentypen im UG Oberreichenbach nach BKKonz (SLFUG 2004A).

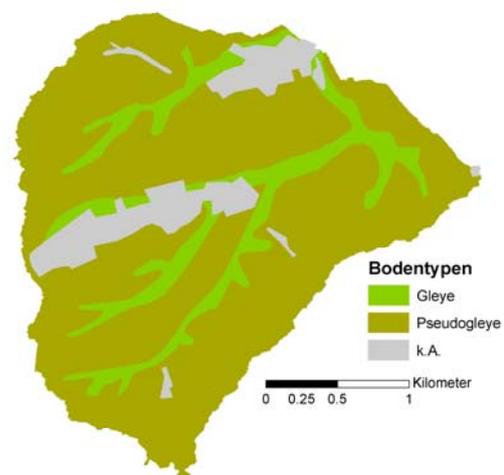


Abb. 9 Verteilung der Bodentypen im UG Klatschbach nach BKKonz (SLFUG 2004A).

Die Pseudogleye der Mittel- und Unterhanglagen sind weitgehend durch Kolluvien überdeckt. In den Auenbereichen befinden sich Gleye. Im UG Klatschbach sind ebenfalls weitflächig hydromorph überprägte Bodentypen (Gleye und Pseudogleye) verbreitet (Abb. 9). Im Mittel- und Unterhangbereich sind sie durch bis zu 2 m mächtige Kolluvien überdeckt. In den Auen liegen die Gleye vor (nach *SLFUG 2004A*, BKkonz).

4.7 Landnutzung

Die Hauptnutzungen der beiden Untersuchungsgebiete sowie die Anteile der Ackerkulturen sind in Abb. 10 (UG Oberreichenbach) und Abb. 11 (UG Klatschbach) dargestellt. In beiden Untersuchungsgebieten dominiert die landwirtschaftliche Nutzung, wobei das UG Oberreichenbach einen etwas geringeren landwirtschaftlichen Flächenanteil aufweist. Der Waldanteil ist hingegen im UG Oberreichenbach fast doppelt so hoch wie im UG Klatschbach. Die Waldgebiete konzentrieren sich auf stärker geneigte Standorte und solche geringer Bodenfruchtbarkeit. Unter Grünlandnutzung stehen vornehmlich die Auenbereiche. Ferner werden auch Hanglagen als Grünland genutzt.

Hinsichtlich der angebauten Ackerkulturen dominiert im betrachteten Zeitraum in beiden Untersuchungsgebieten der Getreideanbau, daran schließen sich Raps und Mais an. Im UG Oberreichenbach werden außerdem Kartoffeln angebaut. Die angebauten Ackerfrüchte sind besonders deswegen von Interesse, weil die Verschlammungsneigung eines Ackerschlaages vor allem vom Bedeckungsgrad zum Zeitpunkt des Niederschlagsereignisses abhängt (s. Anhang Tab. 11)

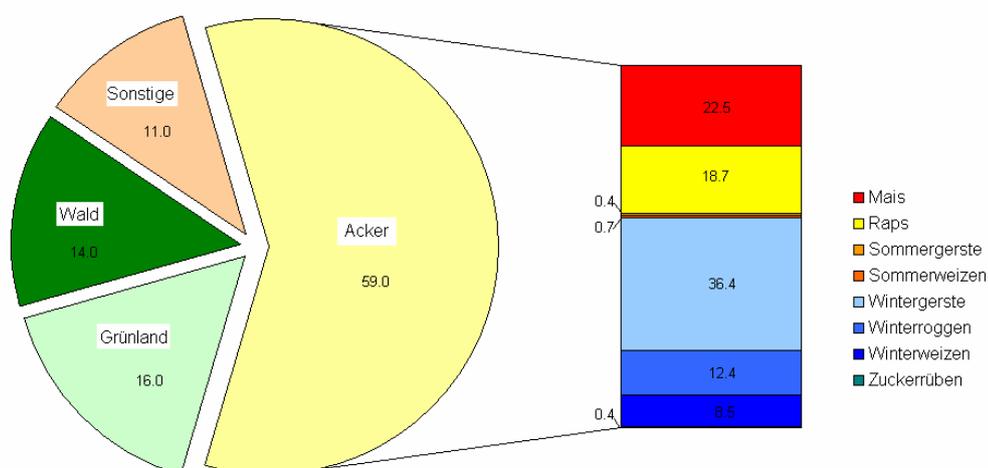


Abb. 10 Landnutzungs- und Ackerfruchtanteile [%] im UG Oberreichenbach, Prozentangaben auf Grundlage der digitalisierten Landnutzungskarten basierend auf ATKIS DLM (LVerMA 2004), InVeKos Feldblockdaten (SMUL 2004) und Orthophotos (LVerMA 2002).

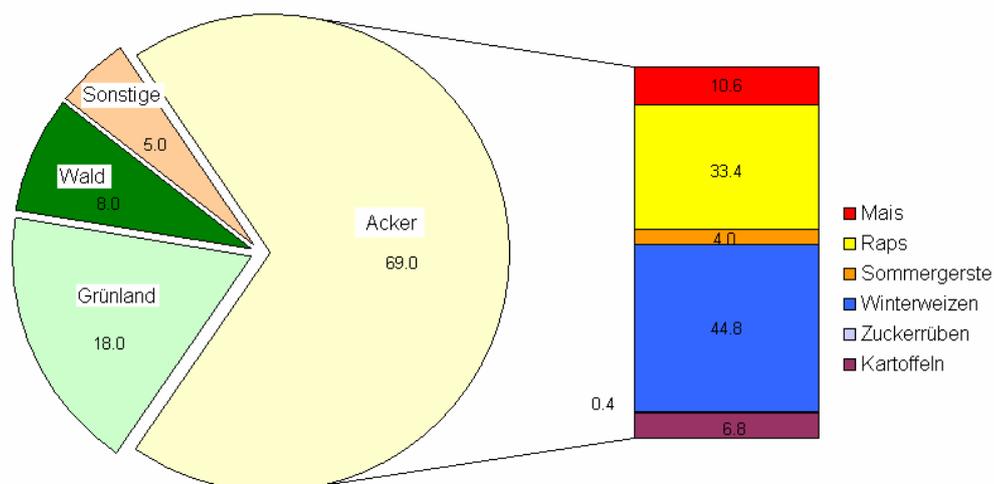


Abb. 11 Landnutzungs- und Ackerfruchtanteile [%] im UG Klatschbach, Prozentangaben auf Grundlage der digitalisierten Landnutzungskarten basierend auf ATKIS DLM (LVerma 2004), InVeKos Feldblockdaten (SMUL 2004) und Orthophotos (Lverma 2002).

5 Methoden

Anschließend erfolgt die Beschreibung der für die Simulationsrechnungen zugrunde gelegten Daten. Die Prüfung der verfügbaren Datengrundlagen ergab, dass für Grünland und Waldstandorte nur unzureichende Daten vorlagen, so dass eigene experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden mussten, um diese Lücken zu füllen. Im Wesentlichen geht es dabei um die Bestimmung von Skinfaktoren auf der Basis von Berechnungsversuchen. Die Auswertung dieser Versuche verlangt die Berücksichtigung diverser standortspezifischer Parameter wie Lagerungsdichte, C_{org} -Gehalt und Anfangswassergehalt sowie die Korngrößenverteilung. Neben den Berechnungsversuchen waren deshalb auch Proben zu nehmen und im Labor hinsichtlich der genannten Parameter zu untersuchen.

Des Weiteren wird ein Verfahren zur Bewertung der Abflusswirksamkeit von Niederschlagsereignissen erläutert, mit welchem ein wichtiges Instrument zur Interpretation der Modellergebnisse geschaffen wurde. Am Schluss des Methodenteils wird auf das Curve Number Verfahren eingegangen, welches später zur Plausibilitätsprüfung der Abflusssimulation eingesetzt wird.

5.1 Datengrundlagen

5.1.1 Basisdaten

Für die Durchführung der Modellrechnungen mit EROSION 3D sind grundlegend Basisdaten zur Beschreibung der Geländeoberfläche, der Niederschläge sowie der Boden- und Landnutzungsverhältnisse notwendig. In den nachfolgenden Kapiteln werden die zur Verfügung stehenden Daten detailliert erläutert. Ferner wird beschrieben, wie aus den vorhandenen Landnutzungs- und Bodendaten die benötigten flächendeckenden Simulationsgrundlagen generiert wurden und wie schließlich die Erstellung der Elementarflächenkarte (Flächen gleicher Landnutzung und Bodeneigenschaften) erfolgt.

5.1.1.1 Reliefdaten

Das digitale Geländemodell ist Voraussetzung für die Modellierung der Abflussbewegung und -konzentration auf der Landoberfläche. Als Datengrundlage wird in der Regel das Digitale Geländemodell des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS DGM 25) des Landesvermessungsamtes verwendet. Dieses

liegt für beide Untersuchungsgebiete vor. Das Geländemodell beruht auf einem Netzpunktabstand von 20 m und weist einen maximalen Höhenfehler von 2 m auf.

Im Rahmen des dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsprojektes war es möglich, für beide Untersuchungsgebiete Laserscannerbefliegungen durchzuführen (FA. MILAN 2004). Diese lieferten digitale Geländemodelle mit einer Auflösung von ursprünglich 1 m Rasterweite. Abb. 12 zeigt das hochaufgelöste DGM (Ausschnitt) am Beispiel des UG Oberreichenbacher Bach.

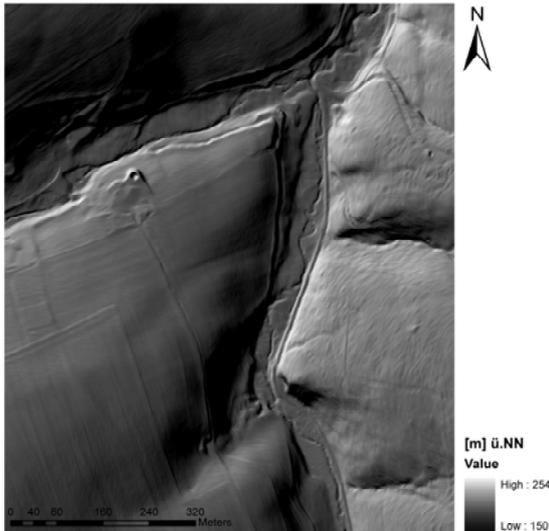


Abb. 12 Ausschnitt des Laserscanner DGM's UG Oberreichenbach (Fa. Milan 2004), Auflösung 1 m.

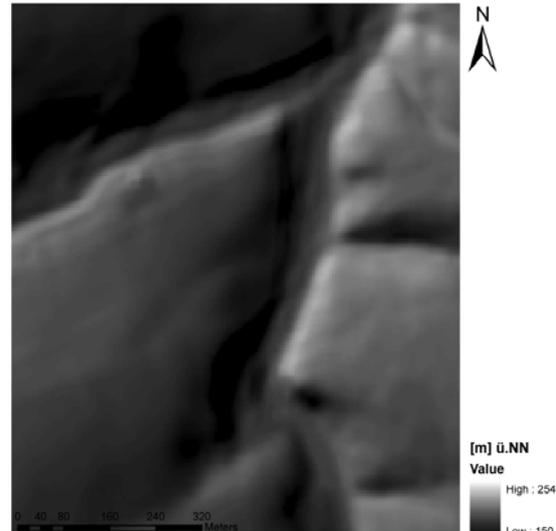


Abb. 13 Ausschnitte des auf 5 m Auflösung umgerechneten und geglätteten DGM's, UG Oberreichenbach.

Vor dem Hintergrund eines sehr hohen Rechenaufwandes bei 1 m Auflösung, wurde das Laserscanner DGM auf 5 m Rastergröße umgerechnet. Dies erfolgte durch ein Resampling der ursprünglichen Punktdichte von 1 m auf 5 m Rasterweite mit Hilfe des bilinearen Interpolationsalgorithmus des GIS-Tools SAGA. Zudem war es notwendig zur Unterdrückung von Abbildungsfehlern eine Glättung des Geländemodells vorzunehmen, die dadurch entstehen, dass bei dem Laserscann-Verfahren nicht immer nur die Bodenoberfläche, sondern auch die niedrige Vegetation erfasst wurde. Die Glättung wurde im ArcGIS über die Funktionen focal statistics / neighborhood / high 5, width 5 vorgenommen. Ein Ausschnitt des resultierenden DGM's zeigt Abb. 13.

5.1.1.2 Niederschlagsdaten

Für die Modellierung mit EROSION 3D sind Niederschlagsdaten notwendig, die die Intensität mindestens in einer Auflösung von 10 min wiedergeben. Für die landesweite Anwendung des Modells EROSION 2D/3D wurde der Deutsche Wetterdienst vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie mit der Zusammenstellung von Basisdaten zum Starkniederschlagsgeschehen in Sachsen beauftragt (DWD Gutachten Reg.-Nr. 322-93). Hierfür wurde Sachsen in Anlehnung an seine naturräumliche Gliederung in 8 Subregionen (siehe Abb. 14) unterteilt (MICHAEL 2000).

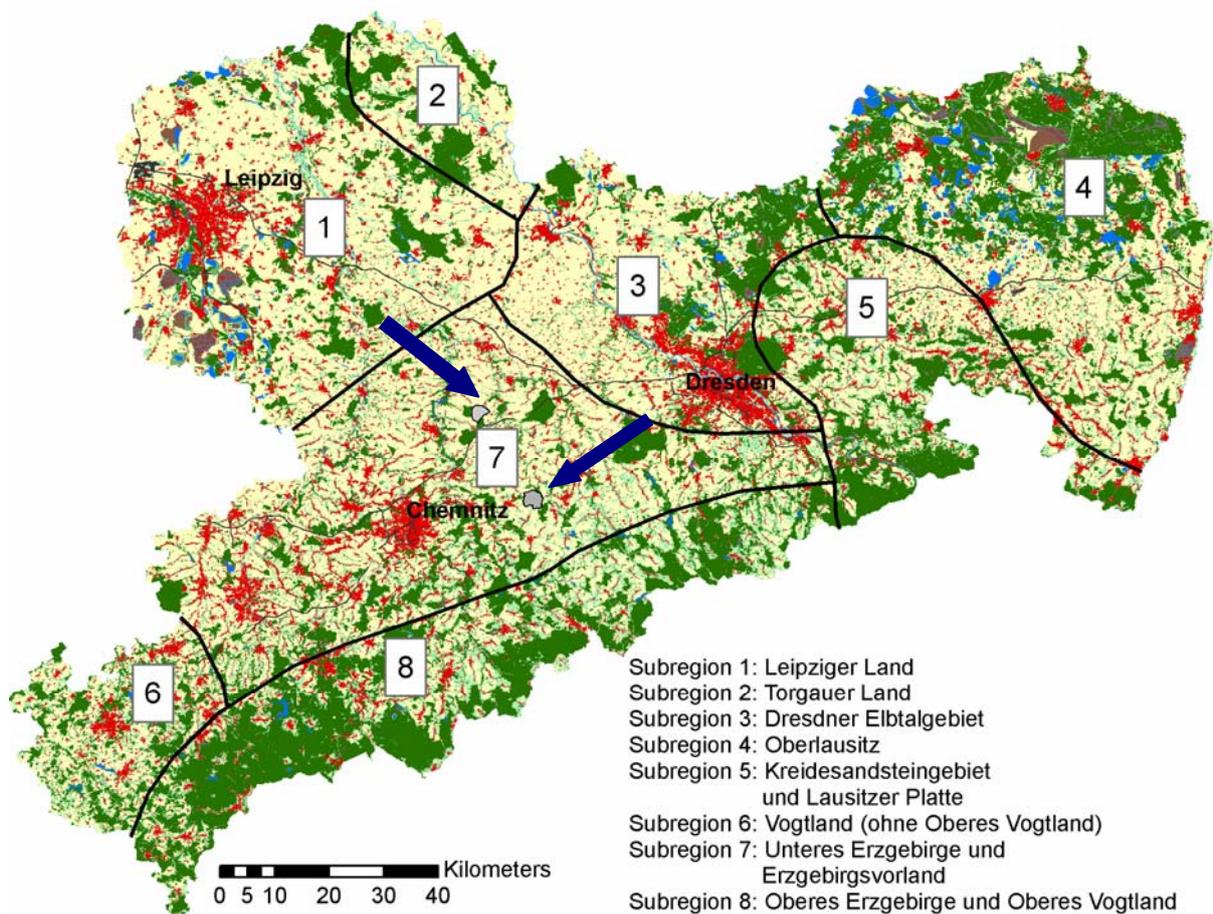


Abb. 14 Subregionen Sachsens hinsichtlich des Starkniederschlages, Einordnung der Untersuchungsgebiete (blaue Pfeile) in Subregion 7, nördliches UG: Klatschbach, südliches UG: Oberreichenbacher Bach (verändert nach Michael 2000, Quelle Landnutzungsdaten: ATKIS DLM, LVermA 2004).

Wie Abb. 14 zeigt, lassen sich beide Untersuchungsgebiete der Subregion 7 zuordnen. Für jede Subregion liegen Niederschlagsdaten für Extremereignisse mit 2, 5, 10, 20, 50 und 100 jähriger Wiederkehrwahrscheinlichkeit sowie für ein Referenzjahr vor. Diese Daten sind Bestandteil des Parameterkataloges Sachsen (MICHAEL ET AL. 1996) und können diesem direkt entnommen werden. Details zu den statistischen Grundlagen des DWD Gutachtens sind bei MICHAEL (2000) zu finden. Es ist darüber hinaus möglich, reale

Niederschlagsereignisse für das Modell aufzubereiten, sofern die o.g. Mindestauflösung vorliegt.

5.1.1.3 Bodendaten

Hinsichtlich konkreter Bodendaten liegen für beide Untersuchungsgebiete die Schichtverzeichnisse und Karten der digitalen Reichsbodenschätzung (RBS) sowie der Bodenkonzeptkarte (BK_{konz}) vor. Die Bodenarten des UG Oberreichenbach sind in Abb. 15 und Abb. 16 dargestellt, die des UG Klatschbach zeigen Abb. 17 und Abb. 18 .

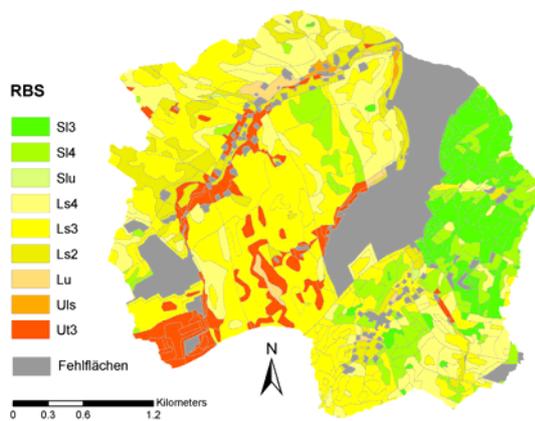


Abb. 15 Bodenartenverteilung nach Reichsbodenschätzung (SLfUG 2004b) im UG Oberreichenbach.

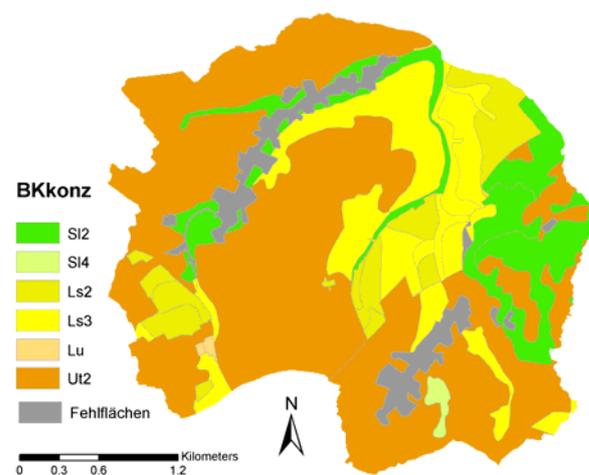


Abb. 16 Bodenartenverteilung nach Bodenkonzeptkarte (SLfUG 2004a) im UG Oberreichenbach.

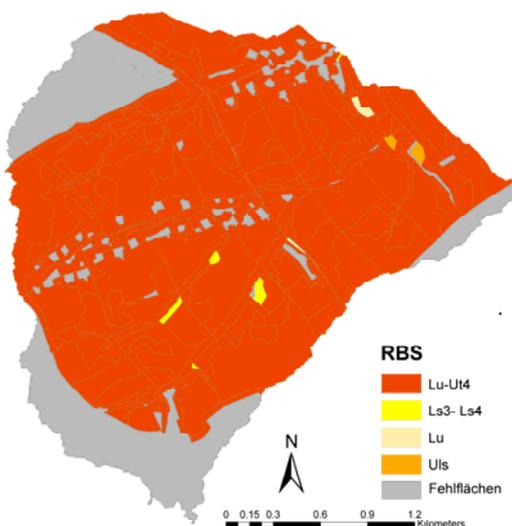


Abb. 17 Bodenartenverteilung nach Reichsbodenschätzung (SLfUG 2004b) im UG Klatschbach.

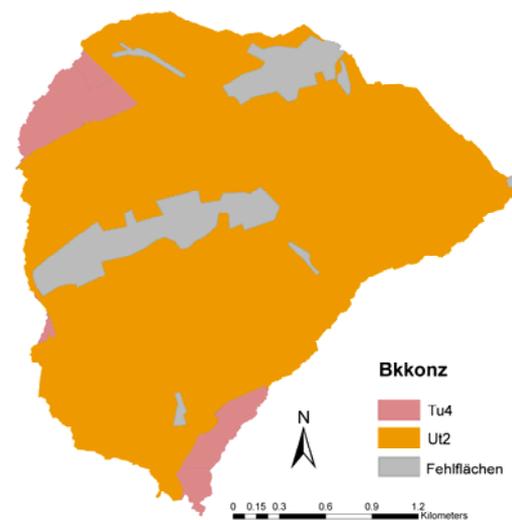


Abb. 18 Bodenartenverteilung nach Bodenkonzeptkarte (SLfUG 2004a) im UG Klatschbach.

Es ist zu erkennen, dass sich die beiden Kartengrundlagen hinsichtlich ihrer Flächendeckung weitgehend ergänzen. Allerdings variieren die Bodenarten der landwirtschaftlich genutzten Flächen der im UG Oberreichenbach zwischen RBS und BK_{konz} z.T. erheblich.

Bei der **Reichsbodenschätzung** handelt es sich um ein Kartenwerk, welches 1934 mit dem Hintergrund einer gerechteren Besteuerung der Landwirtschaft erarbeitet wurde (*FREUND 1992*). Sie erfasst die potentielle Standortertragsfähigkeit unter optimalen Randbedingungen (*KUNTZE ET AL. 1994*). Hierfür wurden die landwirtschaftlich genutzten Böden in einem 50 m Raster mittels Bohrstock beprobt. In der Mitte einer auf Grundlage dieser Bohrstockproben als gleichartig bestimmten Fläche, wurde zusätzlich ein Grabloch ausgehoben und umfassend beschrieben. Mit Hilfe dieser Grablöcher und den umliegenden Bohrstockproben wurden Klassenflächen gleicher Eigenschaften festgelegt. Diese enthalten sämtliche Angaben zum Boden bis in 1 m Tiefe sowie dessen Ertragspotential (*FREUND 1992*). Diese flächendeckende bodenkundliche Aufnahme der landwirtschaftlich genutzten Böden wird in zeitlichen Abständen im Rahmen von Nachschätzungen aktualisiert.

Für die beiden Untersuchungsgebiete Oberreichenbach und Klatschbach sind die Daten der RBS bis auf kleinere Fehlflächen (Wald- und Siedlungsflächen) flächendeckend digital vorhanden (s. Abb. 15 Abb. 17), so dass die Parameter Bodenart, Lagerungsdichte und C_{org}-Gehalt schichtenbezogen zur Verfügung stehen.

Die wesentliche Grundlage der **Bodenkonzeptkarte** (BK_{konz} 1:50 000) (Abb. 16 und Abb. 18) sind digital aufbereitete Altdatenbestände. Für die Waldflächen wurde hierfür die sog. Waldbodenkarte im Maßstab 1:25.000 herangezogen, welche wiederum aus der Forstlichen Standortkartierung (1: 10.000) abgeleitet wurde. Die Daten für die landwirtschaftlich genutzten Flächen gehen aus der Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK) hervor, welche in den 80er Jahren veröffentlicht wurde. Die digitale Version liegt im Maßstab 1:25000 vor (MMK25). Beide Karten wurden nach KA4 (Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage) verschlüsselt und verschnitten. Die sich daraus ergebende Karte ist die BK_{konz}, aus welcher Bodenformengesellschaften sowie zahlreiche Parameter hervorgehen (*SLFUG 2008*).

Wie aus Abb. 15 bis Abb. 18 sowie den Beschreibungen der Datengrundlagen hervorgeht, deckt die Reichsbodenschätzung die Acker- und Grünlandflächen mit einer sehr hohen räumlichen Datendichte ab. Die in der RBS fehlenden Waldflächen werden durch die Bodenkonzeptkarte ergänzt. Hinsichtlich der Siedlungsflächen bestehen in beiden Beständen Datenlücken.

5.1.1.4 Landnutzungsdaten

Für die Modellierung mit EROSION 3D sind digitale Landnutzungskarten notwendig aus denen die Hauptnutzungen (Acker, Grünland und Wald) sowie die Kulturarten der Landwirtschaftsflächen hervorgehen.

Für die Untersuchungsgebiete standen folgende Datengrundlagen flächendeckend zur Verfügung:

- Das ATKIS DLM 25 (*LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN 2000*) mit den wesentlichen Hauptnutzungen und Basisgeometrien der Untersuchungsgebiete.
- Die klassifizierte Coloured-Infrared-Karte Sachsen (*CIR/BTK, SMUL 1992*) zur differenzierten Erfassung der Waldarten.
- InVeKoS Daten zur Untergliederung der Ackerschläge sowie zur Identifizierung der Ackerfrüchte.
- Orthophotos (*LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN 2002*) als Grundlage für die detaillierte Digitalisierung von Straßen, Gewässerläufen usw.

ATKIS DLM

Das ATKIS DLM (Amtliches Topografisch-Kartografisches Informationssystem), *LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN 2000*) ist ein digitales Landschaftsmodell, dessen Inhalt sich an der Topographischen Karte 1:25000 orientiert und in einem Objektartenkatalog festgelegt ist. Die geometrischen Erfassungsgrundlagen bilden in Sachsen die Topographische Karte 1:10.000, Orthophotos 1:5.000 sowie photogrammetrische Stereobildauswertungen (*LVERMGEO 2008*).

Das ATKIS DLM 25 liegt für beide Untersuchungsgebiete flächendeckend vor, wies jedoch für die vorliegende Arbeit zu große Abweichungen in der Lagegenauigkeit auf, so dass eine neue, wesentlich detailliertere Landnutzungskarte erstellt werden musste. Des Weiteren liefert das ATKIS DLM keine hinreichende Differenzierung bezüglich der Waldarten und Ackerflächen. Aus den genannten Gründen wurde von einer weiteren Verwendung des ATKIS DLM 25 in dieser Arbeit abgesehen.

Coloured-Infrared- Biotoptypenkarte (CIR-Karte)

Als weitere Datenquelle bezüglich der Landnutzungsdifferenzierung standen die in Vegetationsarten klassifizierten CIR-Karten Sachsens (*SMUL 1992*) als Shape-Datei (Datenformat im ArcGIS) zur Verfügung. Damit konnten die Waldstandorte in Nadel-, Laub- und Mischwaldbestände unterteilt werden.

InVeKoS Feldblock Daten

Bei den InVeKoS Feldblock Daten (Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem, *SMUL 2004*) handelt es sich um eine GIS-gestützte Erfassungskulisse für die jährlichen Kulturartenanteile (Acker, Grünland, ohne Schlaggrenzen) und dient damit als Nachweisbasis für beantragte und ausgezahlte EU-Beihilfen (*EU 1992*). Als Feldblock wird dabei eine landwirtschaftliche Nutzungseinheit bezeichnet, deren räumliche Lage aufgrund ihrer Umgrenzung durch eindeutige topographische Objekte (wie Flüsse, Straßen, Wälder) langfristig wenig veränderlich ist. Grundlage der Modellierung waren die InVeKoS Daten und damit die Kulturartenverteilung im Jahre 2004. Innerhalb des Feldblocks sind die Flächengrößen der angebauten Kulturarten bekannt, die Schlaggeometrien jedoch nicht.

Digitale Orthophotos (DOP)

Für beide Untersuchungsgebiete standen Orthophotos aus dem Jahr 2002 (*LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN 2002*) zur Verfügung aus welchen die Geometrien einzelner Landnutzungselemente hervorgehen. Auf Grundlage dieser verzerrungsfreien, hochaufgelösten Luftbildaufnahmen kann beispielsweise eine sehr genaue Digitalisierung von Landschaftselementen erfolgen sowie die Aktualität anderer Geodaten überprüft werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit dienten sie der Digitalisierung von Elementen (Straßen, Siedlungen etc.), die von den zuvor genannten Geodaten nicht bzw. nur in geringer Auflösung erfasst wurden.

Die beschriebenen Boden- und Landnutzungsdaten gilt es nun zu flächendeckende hochaufgelösten Karten zusammenzufügen. Im Folgenden wird die Vorgehensweise detailliert erläutert.

5.1.2 Erstellung der Landnutzungskarten

Landwirtschaftlich genutzte Flächen

Die InVeKoS Kulisse bildet die Grundlage für die Basisgeometrien der landwirtschaftlichen Flächen. Diese enthält jedoch nur eine Einteilung in Feldblöcke. Um eine Unterteilung in Ackerschläge vornehmen zu können, wurden Orthophotos (*LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN 2002*) herangezogen. Die Zuordnung der Kulturarten, welche ebenfalls nur feldblockbezogen vorliegt, erfolgte auf Grundlage der Hektarangaben im InVeKoS Datensatz (*SMUL 2004*). Um eine Unterteilung in Ackerschläge vornehmen zu können, wurden Orthophotos (*LVerMA 2002*) herangezogen. Diese mussten als den DOP's nachdigitalisiert und anhand der Flächengrößen manuell zugewiesen bzw. durch Befragung der Landwirte ermittelt werden. Ergebnis des ersten Schrittes war eine Karte der landwirtschaftlich genutzten Flächen inklusive der entsprechenden Kulturartenverteilung des Jahres 2004.

Waldflächen

Im zweiten Schritt wurden die Waldflächen aus der klassifizierten Coloured-Infrared-Karte Sachsen (CIR/BTK, SMUL 1992) extrahiert. Da die Nutzungskategorien der Datenbank für EROSION 3D lediglich eine Aufteilung in Laub- und Nadelwald zulassen, wurden die CIR-Daten wie folgt aggregiert:

Laubwald: Laubbaum-Reinbestand, Laubmischwald und Laub-Nadelmischwald.

Nadelwald: Nadelbaum-Reinbestand, Nadelmischwald und Nadel-Laubmischwald.

Zusammenfügen von Landwirtschafts- und Waldflächen

Die Karte der landwirtschaftlichen Nutzflächen sowie die Waldflächenkarte wurden im ArcGIS überlagert, so dass die resultierende Karte die Attribute beider Nutzungen enthält.

Digitalisierung der Restflächen

Zuletzt wurden noch fehlende Nutzungselemente, bei denen es sich vorrangig um Siedlungen, Straßenverläufe und Gewässernetze handelt, nachträglich auf Grundlage der digitalen Orthophotos manuell digitalisiert.

Die resultierenden Landnutzungskarten beider Untersuchungsgebiete zeigen Abb. 19 (UG Oberreichenbach) und Abb. 20 (UG Klatschbach).

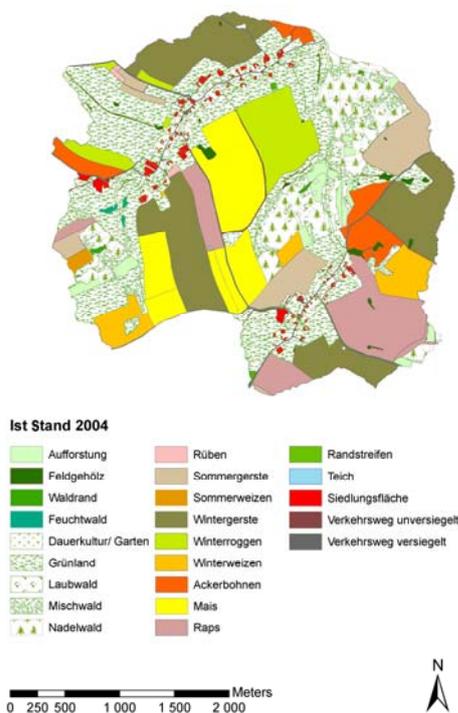


Abb. 19 UG Oberreichenbach, Landnutzungsverteilung 2004.

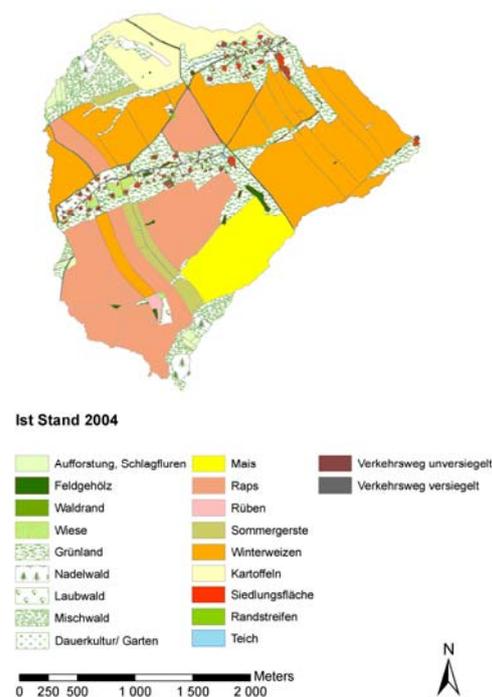


Abb. 20 UG Klatschbach, Landnutzungsverteilung 2004.

Die Landnutzungsverteilung wird entsprechend der unterstellten Landnutzungsszenarien (vgl. Kapitel 5.2.1) variiert.

5.1.3 Verschneidung der Bodenkarten

Für die Parametrisierung der Mehr-Schichten-Version von EROSION 3D sind flächendeckende Bodeninformationen mit vertikaler Differenzierung notwendig. Wie in Kapitel 4.6 dargestellt, standen hierfür die Reichsbodenschätzung und die Bodenkonzeptkarte zur Verfügung.

Mit Hilfe des Datenbankprozessors (Dproc) wurden diese beiden Bodenkarten miteinander verschnitten, und zwar so, dass die Reichsbodenschätzung (RBS) aufgrund ihrer höheren Auflösung Priorität hat. Die BK_{KONZ} dient damit lediglich der Schließung von Datenlücken der RBS (vorrangig Waldflächen).

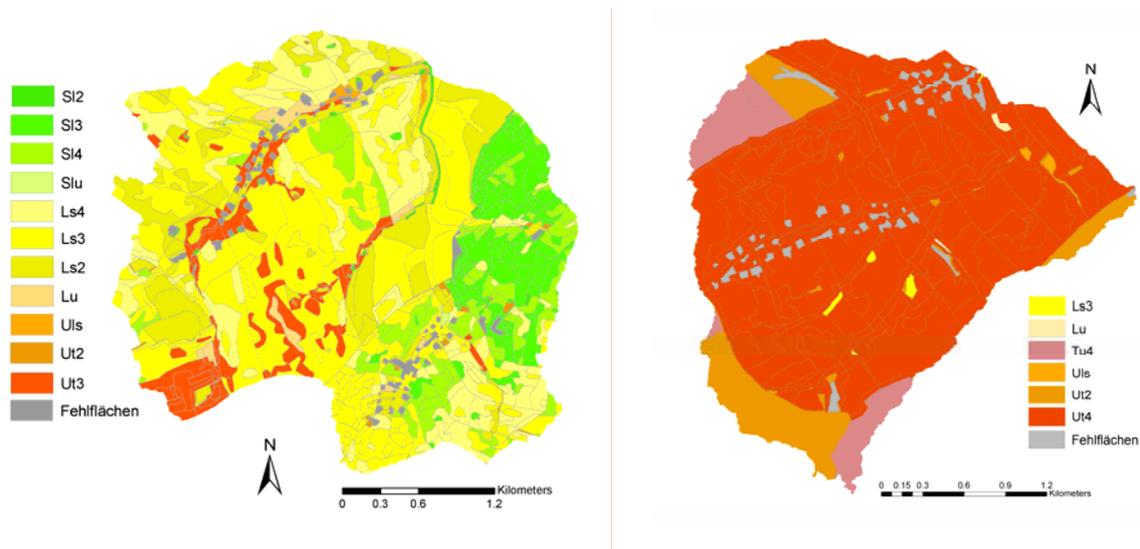


Abb. 21 Verschnittene Bodenarten-Information der digitalen Reichsbodenschätzung (RBS, SLfUG 2004b) und der Konzeptbodenkarte (BK_{KONZ}, SLfUG 2004a) für die Untersuchungsgebiete Oberreichenbach (links) und Klatschbach (rechts).

Restflächen, (< 5 %) die durch keine der beiden Datenbestände abgedeckt werden konnten, wurden mit einheitlichen Werten belegt. Dies erfolgte mit der Bodenart, welche im jeweiligen UG flächenmäßig am häufigsten auftritt (Klatschbach Ut4, Oberreichenbacher Ls3). Die durch dieses Verfahren entstandenen flächendeckenden Bodenkarten zeigt Abb. 21.

Mit Hilfe des Dproc wurden innerhalb eines jeden Bodenpolygons Horizontierung, Bodenart, Lagerungsdichte, C_{org}-Gehalt und Skelettgehalt aus der digitalen RBS bzw. BK_{KONZ} entnommen. Die Bodenarten wurden in die für die Modellierung notwendigen Korngrößenanteile übersetzt. Das Ergebnis ist eine Rasterkarte, deren Objektschlüssel sich auf flächen- und schichtbezogene Modell-Parameter einer gleichzeitig generierten Tabelle beziehen.

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei wechselnden Szenarien zu gewährleisten wurde für den Oberbodenhorizont eine Mächtigkeit von 30 cm festgelegt. Die nach oben beschriebenen Verfahren flächendeckend erstellte Bodenkarte wurde für alle Landnutzungsszenarien verwendet.

5.1.4 Erstellung der Elementarflächenkarten

Im nächsten Schritt werden jeder Rasterzelle durch Überlagerung der Boden- und Landnutzungskarte die zuvor erzeugten Daten zugewiesen. Auf Grund der hohen Anzahl von Rasterzellen mit gleichen Eingabeparametersätzen werden diese zu Flächen gleicher Boden- und Nutzungsinformation zusammengefasst. Endprodukt dieses Rationalisierungsschrittes ist die Elementarflächenkarte (s. Abb. 22). Die auf diese Weise erzeugte Elementarflächenkarte zur Beschreibung des Realnutzungs-Zustandes 2004 im Untersuchungsgebiet Oberreichenbacher Bach enthält 1718 Flächen mit jeweils 2 - 4 Schichten (Abb. 22 links). Bezüglich des UG Klatschbach entstanden entsprechend 722 Flächen mit ebenfalls jeweils 2 - 4 Bodenschichten (Abb. 22, rechts). Die deutlich geringere Elementarflächenanzahl ist auf die im Vergleich zu Oberreichenbach geringere Diversität der Bodenarten (vgl. Abb. 21) zurückzuführen.

Ohne die Möglichkeit einer Elementarflächenbildung müssten die Datensätze für jede Rasterzelle einzeln angelegt werden. Für das UG Oberreichenbach entspricht dies mehr als 538.000 Datensätzen in einer Tabelle. Der Vorteil der Elementarflächen besteht also darin, dass die Datenhaltung und Verwaltung überschaubar gestaltet wird.

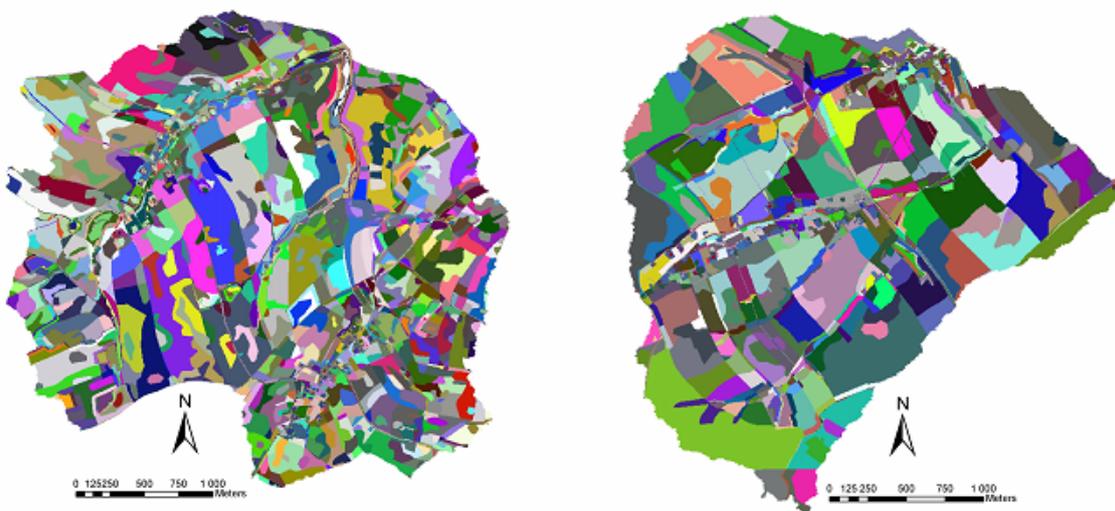


Abb. 22 Elementarflächenkarten der Realnutzungs Zustände 2004 der UG's Oberreichenbach (links) und Klatschbach (rechts), jede Farbe repräsentiert eine Kombination aus Boden- und Landnutzungsart.

Mit Hilfe des Dproc werden im Anschluss für jede Elementarfläche die modellspezifischen Zielparameter aus den Eingangsinformationen der Landnutzungs- und Bodendaten abgeleitet (Abb. 23).

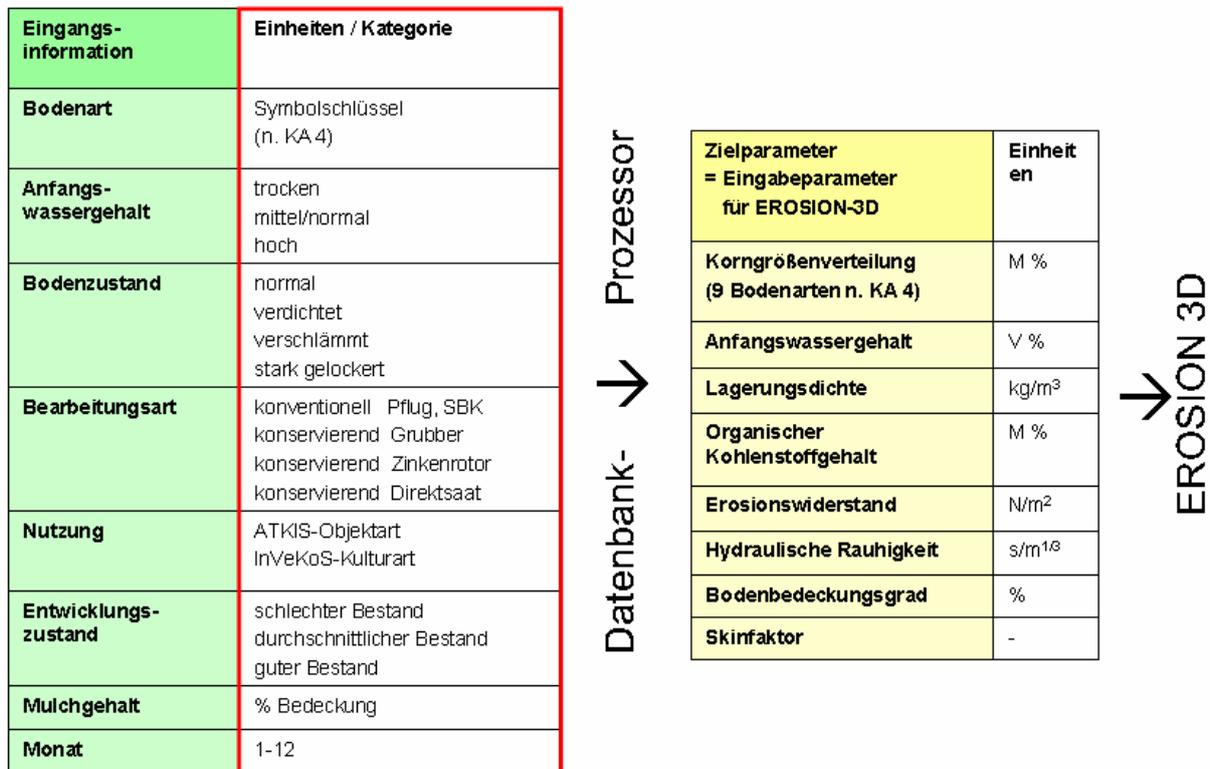


Abb. 23 Eingangsinformation und Zielparameter des Datenbankprozessors.

Mit Hilfe einer Schlüsselkennziffer wird jeder Elementarfläche ein Zielparameterdatensatz zugewiesen. Das Ergebnis ist ein flächendeckender Eingabeparameter-Datensatz für EROSION 3D. Ein Beispiel eines EROSION 3D-Eingabeparameterdatensatzes befindet sich im Anhang (Tab. 13).

5.2 Szenarien

Im Rahmen der Modellrechnungen werden verschiedene Einflussgrößen verändert. Im Mittelpunkt des Interesses steht dabei der Einfluss der Landnutzung auf Abfluss und Erosion. Ferner werden Niederschlagsdauer, Intensität und Zeitpunkt sowie die Anfangsbodenfeuchte variiert. Die zu Szenarien zusammengestellten Parameterkombinationen werden nachfolgend im Einzelnen beschrieben.

5.2.1 Landnutzungsszenarien

Bei der Erstellung der Landnutzungsszenarien wurden solche Varianten ausgewählt, die einen Vergleich der Hauptnutzungsarten (Wald, Grünland, Ackerland) ermöglichen und zudem eine Beurteilung unterschiedlicher Bewirtschaftungsmethoden (konventionell, konservierend, Direktsaat) zulassen. Ausgehend von der realen Landnutzungsverteilung (Abb. 19 für UG Oberreichenbach bzw. Abb. 20 für UG Klatschbach) wird die Bewirtschaftung in Abhängigkeit des jeweiligen Szenarios variiert.

5.2.1.1 Konventionelle Bewirtschaftung

Bei diesem Landnutzungsszenario werden alle Ackerflächen regelmäßig gepflügt. Der Bodenzustand wird aufgrund der geringen Bodenbedeckung sowie der geringen Strukturstabilität als verschlämmt parametrisiert. Die Feldfrüchte entsprechen der Realnutzung des Jahres 2004, abgeleitet aus den InVeKos Feldblockdaten.

5.2.1.2 Konservierende Bewirtschaftung

Im Gegensatz zum Szenario „konventionelle Bewirtschaftung“ wird den Ackerflächen hier eine konservierende Bewirtschaftung, d.h. eine nichtwendende Bodenbearbeitung (Grubber) unterstellt. Für die Mulchauflage wird ein (zusätzlicher) Bedeckungsgrad von 30 % angenommen. Hinsichtlich der Bodenstruktur wird ein unverschlämter Zustand zugrunde gelegt. Die Feldfrüchte entsprechen denen des Szenarios „konventionelle Bewirtschaftung“.

5.2.1.3 Grünland / Direktsaat

Die Szenarien Grünland und Direktsaat wurden in dieser Arbeit zu einem Szenario (Grünland / Direktsaat) zusammengefasst, da sie durch vergleichbare Eigenschaften gekennzeichnet sind. In beiden Fällen fehlt jegliche mechanische Beeinflussung des Bodens durch lockernde Bearbeitungsgeräte wie Pflug oder Grubber, so dass sich ein stabiles Bodengefüge ausbilden kann. Es erfolgt lediglich eine Verdichtung des Oberbodens durch das Befahren mit landwirtschaftlichen Maschinen. Des Weiteren liegt bei beiden Nutzungen eine ganzjährige Bodenbedeckung vor. Die Landnutzungsverteilung dieses Szenarios entspricht dem der Realnutzung, wobei sämtliche Ackerflächen als Grünland / Direktsaat parametrisiert werden.

5.2.1.4 Waldvegetation

Abgesehen vom Siedlungs- und Wegenetz wird bei diesem Szenario angenommen, dass sämtliche Flächen des Untersuchungsgebiets mit Buchenmischwald (Potentiell Natürliche Vegetation) bewachsen sind.

5.2.2 Niederschlagsszenarien

Zur Bewertung der Wirkung verschiedener Niederschlagsereignisse auf die Abflussbildung werden statistische Ereignisse sowie eines reales Ereignis herangezogen.

Statistische Ereignisse

Bezüglich der statistischen Ereignisse werden vier verschiedene regionaltypische Niederschlagsereignisse mit Wiederkehrzeiten von 5, 20, 50 und 100 Jahren verwendet. Datengrundlage hierfür ist das Gutachten des Deutschen Wetterdienstes bzw. der Parameterkatalog Sachsen (vgl. Kapitel 5.1 Niederschlagsdaten). Die Intensitätsverläufe sind unter Angabe der Niederschlagscharakteristiken in Abb. 24 dargestellt.

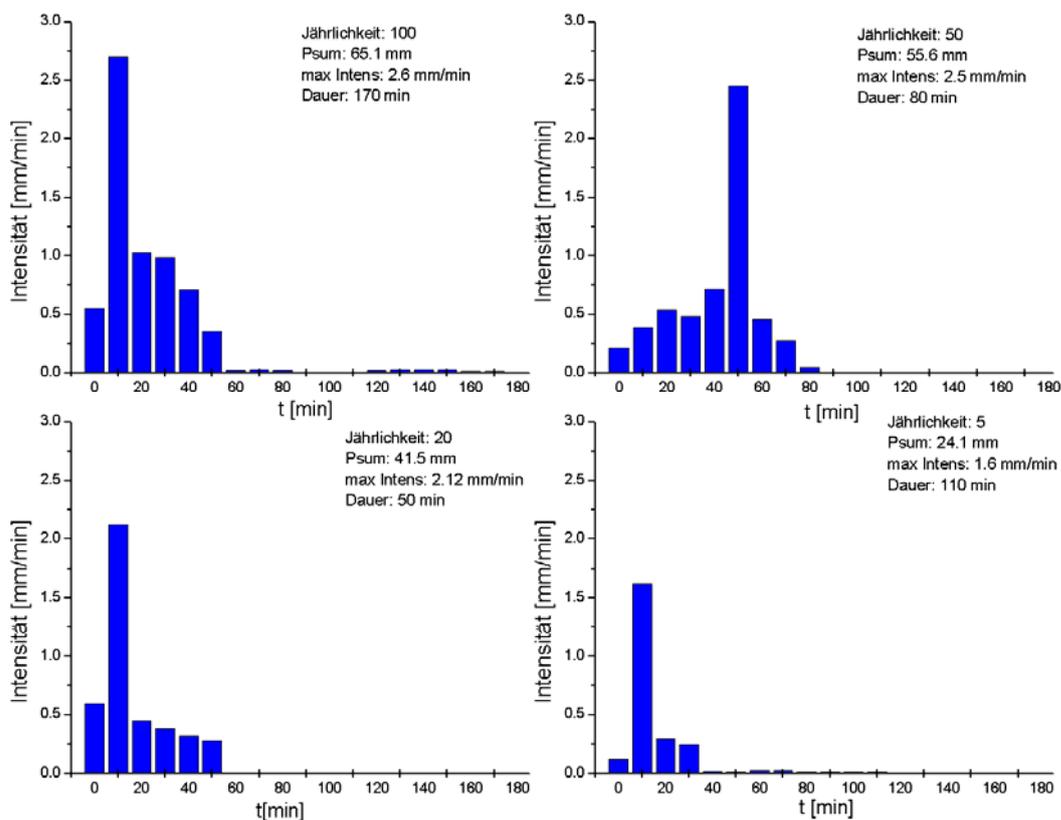


Abb. 24 Intensitätsverläufe der statistischen Starkregenereignisse unterschiedlicher Jährlichkeiten (MICHAEL ET AL. 1996).

Reales Ereignis

Als reales Ereignis wurde das Hochwasserereignis vom 11. - 13. August 2002 (reales Ereignis 2002) ausgewählt, welches in Sachsen zu extremen Überschwemmungen mit enormen Schäden geführt hat (SLFUG 2004).

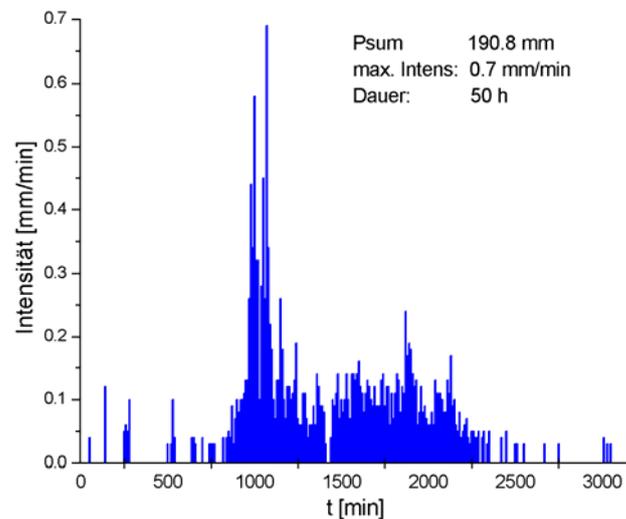


Abb. 25 Intensitätsverlauf des realen Ereignisses 2002. Niederschlagsmesstation Talsperre Saidenbach. Quelle: SLTV (2002).

Für die Modellierung werden die Niederschlagsdaten der Station „Talsperre Saidenbach“ herangezogen (Abb. 25). Die zeitliche Auflösung der verwendeten Intensitätsdaten beträgt wie bei den statistischen Ereignissen 10 min. Das Ereignis ist durch eine Niederschlagssumme von 191 mm und eine Dauer von 50 Stunden charakterisiert. Die maximale Intensität beträgt 0.7 mm/min.

Im Vergleich zu den statistischen Ereignissen besitzt das hier verwendete reale Ereignis 2002 zwar eine deutlich geringere maximale Intensität, ist demgegenüber aber durch eine erheblich größere Niederschlagsdauer und –menge gekennzeichnet. Während die verwendeten statistischen Ereignisse maximal 170 Minuten umfassen, erstreckte sich das reale Ereignis über zwei Tage. Die Niederschlagsmenge des realen Ereignisses beträgt dabei das 3 bis 7 fache der statistischen Ereignisse.

5.2.3 Anfangsbodenfeuchten und Simulationszeitpunkte

Die Simulationsrechnungen erfolgen für Varianten mit niedriger, mittlerer und hoher Anfangsbodenfeuchte. Dabei wird folgende Zuordnung zu Grunde gelegt:

- Niedrige Bodenfeuchte = Bodenfeuchte bei Permanentem Welkepunkt (PWP)

- Mittlere Bodenfeuchte = Mittelwert des Bodenwassergehaltes aus Feldkapazität (FK) und Permanenten Welkepunkt (PWP)
- Hohe Bodenfeuchte = Bodenwasserhalt bei Feldkapazität (FK)

Da die Modellrechnungen für niedrige Anfangsbodenfeuchten keine plausiblen Ergebnisse lieferten, wurde diese Variante nach ersten Testrechnungen nicht weiter verfolgt (siehe Kapitel 6.2.5.2).

Die Modellierungen erfolgen jeweils bezogen auf die Monate Mai und August.

5.2.4 Szenarienkombinationen der statistischen Extremereignisse

Bezüglich der statistischen Extremereignisse erfolgen die Berechnungen für alle vier beschriebenen Landnutzungsszenarien, jeweils bei mittlerer und hoher Anfangsbodenfeuchte sowie für beide Simulationszeitpunkte (Mai und August).

5.2.5 Szenarienkombinationen des realen Extremereignisses

Die meteorologische Situation, welche das reale Ereignis 2002 auslöste, ist detailliert beschrieben in der Dokumentation „Ereignisanalyse Hochwasser 2002“ (SLFUG 2004). Wichtig für die Durchführung der Modellrechnungen ist der Umstand, dass dem Ereignis bereits mehrere Starkregen vorausgingen, so dass die Böden aufgrund der hohen Vorfeuchte wenig speicherfähig und daher schnell gesättigt waren (SLFUG 2004). Bei der Parametrisierung des Ereignisses wurde deshalb nur der Zustand mit hoher Anfangsbodenfeuchte zugrunde gelegt. Des Weiteren wurden ausschließlich die den Simulationszeitpunkt August betreffenden Szenarienkombinationen ausgewählt.

5.3 Experimentelle Untersuchungen

Die Parametrisierung der Landnutzungsszenarien erfolgt unter weitgehender Verwendung des Digitalen Parameterkatalogs für die Eingabeparameter des Prognosemodells EROSION 3D, welcher im Rahmen des in den Jahren 1992 - 1996 durchgeführten „Bodenerosionsmessprogramms Sachsen“ erstellt wurde (MICHAEL ET AL. 1996). Das mit dem Ziel der Erfassung und Bewertung der Abflussdisposition landwirtschaftlicher Kulturarten und Managementverfahren durchgeführte Parametrisierungsprogramm lieferte jedoch nur unzureichende Datengrundlagen hinsichtlich Skinfaktoren, Lagerungsdichten und C_{org} -Gehalten zu den Landnutzungsarten Wald und Grünland. Es war deshalb für die vorliegende Arbeit erforderlich, in den betreffenden Untersuchungsgebieten ergänzende

experimentelle Untersuchungen zur Parametergewinnung durchzuführen. Die Ermittlung der Skinfaktoren erfolgte auf der Basis von Beregnungsversuchen, indem die mit EROSION 3D berechneten Infiltrationskurven an die im Feld gemessenen Kurven angepasst wurden. Dafür waren wiederum die standortbezogenen Eingabeparameter (Lagerungsdichte, Anfangswassergehalt, C_{org} -Gehalt und Korngrößenverteilung) notwendig, die durch Laboranalysen bestimmt wurden.

5.3.1 Beregnungsversuche

Versuchsstandorte

In beiden Einzugsgebieten wurden jeweils drei Grünlandstandorte, drei Nadelwaldstandorte sowie drei Laubwaldstandorte untersucht. Aufgrund der für die Beregnung benötigten hohen Wassermengen war es notwendig, die Versuche in unmittelbarer Nähe zu einem Gewässer durchzuführen. Diese Voraussetzung war in den oberen Einzugsgebieten des Klatschbaches bzw. des Oberreichenbacher Baches nicht immer gegeben. Deshalb wurden bevorzugt Standorte im unteren Teil der Einzugsgebiete untersucht. Aufgrund vergleichbarer Bodenarten wird eine Übertragung der Ergebnisse auf nicht unmittelbar untersuchte Flächen als vertretbar erachtet. Es wurde versucht, gebietstypische Kombinationen von Wald- und Bodenart zu erfassen. In Abb. 26 sind die Standorte der Beregnungsversuche eingezeichnet.



Abb. 26 Standorte der Beregnungsversuche in den Untersuchungsgebieten Oberreichenbach (links) und Klatschbach (rechts) basierend auf Orthophotos (LVerMA 2002)

Die Standorteigenschaften der einzelnen Beregnungsstandorte sind in Tab. 4 zusammengefasst.

Tab. 4 Kenndaten der im Rahmen des Vorhabens durch Beregnungsversuche untersuchten Wald- und Grünlandstandorte

UG	Standort	Feinbodenart	Bodentyp	Wald-/Nutzungsart
Oberreichenbach	2	Us	Kolluvisol über Braunerde	Laubwald: Eiche, Buche, Hainsimse
	3	Us	Braunerde	Nadelwald: Fichte, Buche, Eberesche, Holunder
	4	Us	Kolluvisol	Grünland (intensiv)
	5	Us	Kolluvisol	Nadelwald: Fichte
	6	Su4	Kolluvisol	Nadelwald
	7	Us	Braunerde	Grünland (Weide)
	8	Us	Kolluvisol	Grünland (Aue)
	9	Us	Kolluvisol	Laubwald
	10	Us	Kolluvisol über fossilem Parabraunerde-Pseudogley	Laubwald: Birke, Espe, Haselnuss, Ulme, Esche, Hainsimse
	Klatschbach	11	Us	Parabraunerde-Pseudogley
12		Uu	Parabraunerde-Pseudogley	Nadelwald: Fichte, Eiche, Birke
13		Ut2	Braunerde-Parabraunerde	Laubwald: Birke, Linde, Hainbuche, Eberesche, Eiche
14		Us	Braunerde	Nadelwald: Fichte
15		Us	Parabraunerde-Pseudogley	Mischwald: Eiche, Eberesche, Linde, Birke, Kiefer
16		Uu	Kolluvisol über fossiler Parabraunerde	Grünland (intensiv)
17		Ut3	Kolluvisol über fossiler Parabraunerde	Grünland
18		Ut3	Parabraunerde	Grünland (intensiv)
19		Us	Kolluvisol über fossiler Parabraunerde	Nadelwald: Fichte

5.3.1.1 Durchführung der Beregnung

Um die Vergleichbarkeit mit den Daten des Parameterkatalogs Sachsen (*MICHAEL ET AL. 1996*) zu gewährleisten, wurde für die Beregnungsexperimente ein bauartgleiches Modul der in den damaligen Versuchen verwendeten Großberegnungsanlage verwendet.



- 1 schwenkbare Flachstrahldüse
- 2 Intensitätsregler
- 3 Wasserzuleitung
- 4 Ableitung Überschusswasser
- 5 Infiltrationsmessfläche
- 6 Erfassung Oberflächenabfluss

Abb. 27 Aufbau der Kleinberegnungsanlage

Dieser Kleinregner (Abb. 27) steht auf einem ca. 2.5 m hohen Stativ, auf welchem die schwenkbare Beregnungsdüse samt Steuereinheit befestigt ist. Die Gesamtberegnungsfläche beträgt ca. 2 m x 2 m und überregnet eine in der Mitte befindlichen Infiltrationsmessfläche von 1 m x 1 m, welche von einem Steckrahmen umgrenzt ist. Randeffekte, insbesondere eine laterale Ausbreitung des Infiltrationsstromes unterhalb der Messfläche, werden auf diese Weise vermieden. Die Beregnungsintensität wird über die Schwenkfrequenz der Düse und die Verweilzeit in den Totpunkten gesteuert. Die Intensität kann zusätzlich über den Düsenvordruck beeinflusst werden, der zur Herstellung eines realitätsnahen Tropfenspektrums auf 0.5 bar fest eingestellt wurde. Vor und nach jedem Beregnungsversuch wurde jeweils die Beregnungsintensität durch Abdecken der Infiltrationsmessfläche und anschließendes Auslitern des Abflusses pro Zeiteinheit bestimmt. Die Beregnungsintensitäten schwankten zwischen 2.5 und 3.5 mm/min.

Bei den Beregnungsversuchen wird die infiltrierende Wassermenge pro Zeiteinheit über die Differenz aus Beregnungsintensität und Abfluss bestimmt. An jedem Standort wurde aufgrund des hohen apparativen Aufwandes ein Messlauf durchgeführt. Die Messung erfolgte solange, bis sich eine konstante Abfluss- bzw. Infiltrationsrate einstellte. Nach jeder Beregnung wurde die Eindringtiefe der Befeuchtungsfront mittels Bohrstock bestimmt. Die Beregnungsversuche erfolgten in den Monaten April (UG Oberreichenbach) und Mai (UG Klatschbach) 2005.

5.3.2 Probenahme und Laboranalysen

Die Entnahme der Bodenproben erfolgte parallel zu den Beregnungsversuchen. Die Lage der Beprobungspunkte ist in Abb. 26 eingezeichnet. Es wurde an jedem Standort eine Bodengrube angelegt und eine Beprobung der einzelnen Horizonte (sechs Stechzylinderproben und eine gestörte Probe) durchgeführt.

Im Labor wurden die Parameter Lagerungsdichte, C_{org} -Gehalt und Anfangswassergehalt gemäß der einschlägigen Normen (DIN ISO 11272, DIN ISO 10694, DIN 38414-2) bestimmt. Zur Ermittlung der Korngrößenverteilung des Feinbodens wurde abweichend von DIN 19683 die Vorbehandlung nicht chemisch, sondern mechanisch im Ultraschallbad durchgeführt. Ziel war es dabei, den Boden soweit in seine Einzelpartikel zu zerlegen, wie es auch durch den Aufprall der Regentropfen und durch den Abfluss erfolgen würde. Bei der herkömmlichen, chemischen Probenvorbehandlung werden hingegen sämtliche Kittsubstanzen mit H_2O_2 und $\text{Na}_2\text{P}_4\text{O}_7$ zerstört, so dass ein im Vergleich zu den natürlichen Partikelablösungsprozessen eine viel stärkere Dispergierung der Kleinstaggregate des Bodens erreicht wird. Durch die Behandlung im Ultraschallbad werden im Vergleich zur chemischen Behandlung geringere Ton- und damit höhere Schluffgehalte bestimmt, da die meisten Kleinstaggregate aus Tonteilchen bestehen (MICHAEL 2000).

5.3.3 Ableitung modellspezifischer Parameter aus den Experimenten

In den folgenden Kapiteln wird beschrieben, wie aus den experimentellen Untersuchungen, d.h. den Beregnungsversuchen und dem im Labor bestimmten Bodenparametern, die modellspezifischen Parameter Skinfaktor, Lagerungsdichte und C_{org} -Gehalt ermittelt und regionalisiert werden. Die Skinfaktoren für die Landnutzungen Wald und Grünland werden sowohl für den Oberboden als auch für den Unterboden aus den experimentell bestimmten Infiltrationsdaten abgeleitet. Für Ackerflächen wird auf Daten des Parameterkataloges Sachsen zurückgegriffen. Bezüglich der Parameter Lagerungsdichte und C_{org} -Gehalt werden

nur Werte für den Oberboden verwendet, da für den Unterboden entsprechende Daten aus den Bodenkarten zur Verfügung stehen (vgl. Kapitel 5.1.3).

5.3.3.1 Ableitung tiefenbezogener Skinfaktoren

Mit Hilfe des Modells EROSION 3D wurden für jeden berechneten Standort auf Grundlage der im Labor bestimmten Parameter Lagerungsdichte, Anfangswassergehalt, C_{org} -Gehalt und Korngrößenverteilung Infiltrationskurven berechnet und mit den experimentell bestimmten Infiltrationskurven verglichen. Ausgehend von einem Skinfaktor von 1 können die Kurven nun einander angepasst werden, wobei Skinfaktoren < 1 die Effekte von Verschlammung und Verkrustung abbilden und Skinfaktoren > 1 die Effekte von Makroporen (vgl. Kapitel 3.3.5).

Die tiefenbezogene Ableitung von Skinfaktoren für Waldböden ist nur für die Mineralbodenhorizonte möglich, nicht jedoch für organische Auflagen. Diese sind im Schnitt nur 10 cm mächtig und weisen im Vergleich zu Mineralbodenhorizonten eine sehr geringe Dichte ($< 1000 \text{ kg/m}^3$) auf. Aufgrund dessen sind die Infiltrationsraten bei Durchtritt der Befeuchtungsfront durch die oberen 10 cm extrem hoch und überschreiten die maximale Beregnungsintensität von 3.5 l/min deutlich. Deshalb konnte in den ersten Minuten der Beregnung kein Abfluss erfasst werden, so dass auch keine Berechnung des Skinfaktors möglich war.

Die Tiefe der Befeuchtungsfront zum Ende der Beregnung wurde mit Hilfe von Probebohrungen abgeschätzt. In fast allen Fällen wurde eine Tiefe von $> 0.9 \text{ m}$ (Bohrstocklänge) erreicht. Demnach beziehen sich die gemessenen Infiltrationskurven auf den gesamten Bodenkörper bis mindestens 0.9 m Tiefe. Ausnahmen bilden die Standorte 11 (Klatschbach, Laubwald) und 14 (Klatschbach, Nadelwald) mit Eindringtiefen von 0.5 m sowie der Standort 18 (Klatschbach, Grünland) mit 0.65 m. Die Bodenansprachen bzw. Bodenbeprobungen ergaben, dass bis in 0.9 m Tiefe vorrangig Bv- (Wald) und M-Horizonte (Grünland) anstehen. Der C-Horizont wurde in den Bohrstockproben nicht vorgefunden, lediglich an den Standorten 2 (Oberreichenbach, Laubwald) und 5 (Oberreichenbach, Nadelwald) wurden Bv-IIcV-Horizonte angesprochen.

Auf Grundlage der gemessenen Infiltrationskurven lassen sich sowohl Skinfaktoren für den Oberboden (A-Horizont), als auch für den Unterboden (B- bzw. M-Horizonte) bis zur jeweiligen maximalen Eindringtiefe der Befeuchtungsfront ableiten. In Abb. 28 ist beispielhaft eine gemessene Infiltrationskurve (rot) dargestellt. Diese zeigt ein zweimaliges sprunghaftes Abfallen der Infiltrationsrate, was jeweils den Übertritt der Befeuchtungsfront von einem Horizont (Schicht) in den folgenden Abschnitt des Bodenprofils kennzeichnet. Da für das dargestellte Beispiel die Horizonte Ap, M und Sw-M angesprochen wurden, kann nun für jeden dieser Horizonte der jeweilige Infiltrationsverlauf mit Hilfe von EROSION 3D, unter

Verwendung der standortbezogenen Parameter, modelliert werden. Die berechneten Kurven werden dann, wie oben beschrieben, mit Hilfe des Skinfaktors an die gemessenen Infiltrationskurven angepasst.

Für das Beispiel Abb. 28 ergibt sich für den A-Horizont ein Skinfaktor von 50 und für den M-Horizont ein Skinfaktor von 100. Die hohen Skinfaktoren in den obersten beiden Horizonten deuten auf einen großen Anteil von Makroporen hin. Für den Sw-M-Horizont, der sich in ca. 0.8 m Tiefe an den M-Horizont anschließt, wurde ein Skinfaktor von 1 berechnet. Daraus folgt, dass sich in diesem Horizont keine Makroporen mehr befinden sollten.

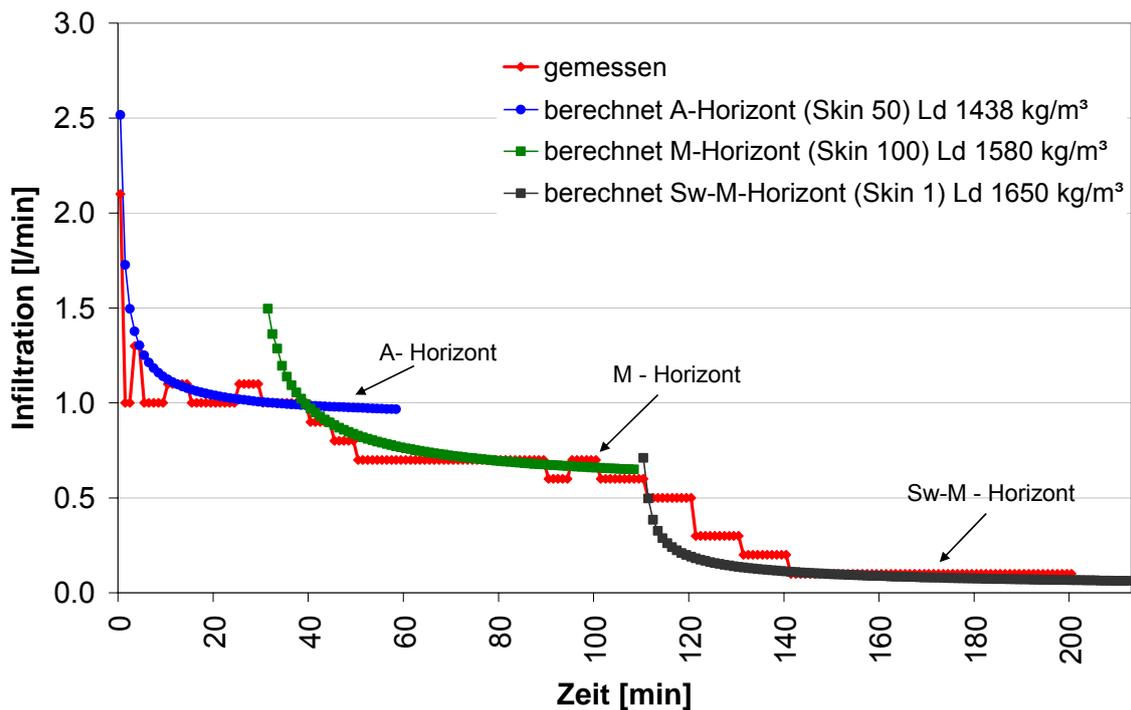


Abb. 28 Beispielhafte Darstellung der Ableitung von horizontbezogenen Skinfaktoren auf Grundlage der experimentell gemessenen Infiltrationskurven (UG Klatschbach, Standort 18 Grünland).

Zeigte die gemessene Kurve nur zwei klar differenzierte Abschnitte, so wurde der Skinfaktor des A-Horizontes durch Anpassung des ersten Abschnittes und der Skinfaktor des Unterbodenhorizontes (B bzw. M) durch Anpassung des zweiten Abschnittes bestimmt. Im Falle einer in sich undifferenzierten Kurve wurde für das gesamte Profil ein einheitlicher Skinfaktor ermittelt. C-Horizonte wurden grundsätzlich mit dem Skinfaktor 1 belegt (Details siehe Kapitel 5.4.1.4).

Aus den auf diese Weise pro Standort abgeleiteten Skinfaktoren für den A- und B- bzw. M-Horizont wurden landnutzungsbezogene Mittelwerte für das jeweilige Untersuchungsgebiet gebildet und fanden entsprechend Eingang in die Parametrisierung (s. Kapitel 5.4).

5.3.3.2 Lagerungsdichten

Für jeden Standort erfolgte eine Mittelwertbildung der im Tiefenbereich von 0-30 cm entnommenen Stechzylinderproben. Diese Mittelwerte wurden bei gleicher Landnutzung innerhalb eines Untersuchungsgebietes wiederum zu Mittelwerten zusammengefasst, so dass schließlich für die A-Horizonte von Grünland, Laubwald und Nadelwald jeweils einheitliche Lagerungsdichten erhalten wurden. Diese so erzeugten landnutzungsspezifischen Mittelwerte wurden innerhalb der Untersuchungsgebiete auf die entsprechenden Standorte übertragen.

Die Lagerungsdichten für den Unterboden konnten aus den vorliegenden Bodenkarten übernommen werden, da die nutzungsbedingten Unterschiede lediglich den Oberboden betreffen.

5.3.3.3 Organischer Kohlenstoffgehalt

Die C_{org} -Gehalte wurden aus den Mischproben des Oberbodens (0-20 cm) bestimmt. Bezüglich der Festlegung landnutzungsspezifischer Mittelwerte und deren Übertragung auf das Untersuchungsgebiet wurde, wie unter Kapitel 5.3.3.2 beschrieben, verfahren.

5.4 Parametrisierung der modellspezifischen Eingabegrößen

Aus den Informationen der Landnutzungs- und Bodenkarten werden die modellspezifischen Eingabegrößen zur Erstellung der Bodenparameterdatei (soil_params.csv) abgeleitet.

Die Schwierigkeit der Parametrisierung bestand darin, dass nicht gleichmäßig auf Daten einheitlicher Qualität zurückgegriffen werden konnte und bei fehlenden Messwerten Plausibilitätsannahmen getroffen werden mussten. Nachfolgend werden die vorhandenen Datenquellen und die darauf aufbauende Parametrisierung der Modellgrößen detailliert beschrieben.

5.4.1 Datenquellen

Folgende Datenquellen standen für die Erstellung der soil_params Dateien zur Verfügung.

- Parameterkatalog Sachsen (*MICHAEL ET AL. 1996*),
- Bodendaten des Landesamtes für Umwelt und Geologie,
- Eigene Untersuchungen auf Grünland und Waldstandorten sowie
- Plausibilitätsannahmen.

5.4.1.1 Parameterkatalog Sachsen

Der Parameterkatalog Sachsen (s. Kapitel 5.3) umfasst Angaben zu den Parametern Lagerungsdichte, C_{org} -Gehalt, Anfangswassergehalt, Bedeckungsgrad, Skinfaktor, Erosionswiderstand sowie Rauigkeit und dient damit der Zusammenstellung sämtlicher für die Prognoseberechnungen mit EROSION 3D notwendigen Bodenparameter. Dieser ursprünglich für Ackerflächen konzipierte Parameterkatalog ermöglicht die vollständige Parametrisierung von Oberbodenhorizonten für konventionelle und konservierende Bodenbearbeitung. Allerdings fehlen entsprechende Daten für langfristig konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat, da zum Zeitpunkt des o. g. Bodenerosionsmessprogramms keine geeigneten Flächen zur Verfügung standen. Für die Landnutzungen Grünland und Wald enthält der PKS lediglich grobe Schätzwerte. Ferner fehlen bewirtschaftungsspezifische Daten für Unterbodenhorizonte.

5.4.1.2 Bodendaten des Landesamtes

Zur Ableitung der schichtenbezogenen Kornverteilungen, Lagerungsdichten und C_{org} -Gehalte standen flächendeckend die Daten der Reichsbodenschätzung (RBS) 1:10.000 bzw. der Bodenkonzeptkarte 1:50.000 (BK_{konz}) zur Verfügung (vgl. Kapitel 5.1.1.3).

5.4.1.3 Daten aus eigenen Geländeuntersuchungen

Um die Datenlücken für Grünland und Wald bezogen auf die infiltrationsrelevanten Parameter Skinfaktor, Lagerungsdichte und C_{org} -Gehalt zu schließen, wurden im Untersuchungsgebiet experimentelle Untersuchungen durchgeführt (siehe Kapitel 5.3).

5.4.1.4 Plausibilitätsannahmen

Soweit keine gemessenen Daten zugänglich waren, musste auf Plausibilitätsannahmen zurückgegriffen werden. Wie aus Tab. 5 ersichtlich ist, betrifft dies ausschließlich die Skinfaktoren der B-Horizonte der Ackerböden sowie der C-Horizonte sämtlicher Landnutzungen. Nachfolgend wird beschrieben, welche Annahmen bezüglich der Skinfaktoren getroffen wurden.

Skinfaktoren Unterboden der Ackerstandorte

Es wird zwischen drei Fällen unterschieden:

Skinfaktor im Oberboden < 1

Ist der Skinfaktor im Oberboden kleiner als 1, so unterliegt dieser Boden einer Verschlämmung. Diese setzt sich nicht in tiefer gelegene Bodenzonen fort. Mit hoher Wahrscheinlichkeit kontrolliert diese Verschlammungsschicht jedoch die Infiltration. Da ein

verschlämmt Boden immer ein Zeichen für geringe biologische Aktivität ist (z.B. aufgrund des Fehlens von organischem Material), kann davon ausgegangen werden, dass auch im Unterboden eine vernachlässigbar kleine Anzahl von Regenwurmporen vorhanden ist. Aufgrund dieser Annahmen wird in diesem Falle der Skinfaktor des Unterbodens auf 1 festgelegt.

Skinfaktor im Oberboden = 1

Wird im Oberboden der Skinfaktor 1 gesetzt, bedeutet dies, dass keine äußeren Einflüsse, wie Verschlammung oder Makroporen die Infiltration beeinflussen, sondern diese lediglich von den Eigenschaften der Bodenmatrix abhängig ist. Wenn demzufolge im Oberboden keine Makroporen vorhanden sind, ist es unwahrscheinlich, diese im Unterboden vorzufinden. Deshalb wird in diesem Falle der Unterboden ebenfalls mit dem Skinfaktor 1 belegt.

Skinfaktor im Oberboden > 1

Ein Skinfaktor größer 1 unterstellt, dass Makroporenflüsse zur Infiltration beitragen.

Nach *DYCK & PESCHKE (1995)* reichen Makroporen in Tiefenbereiche von 1 – 2 m. Aufgrund dieser Angaben werden die Skinfaktoren des Oberbodens bis in einen Tiefenbereich von 1 m übernommen.

Skinfaktoren der C-Horizonte (Schicht 3)

Für die C-Horizonte liegen ebenfalls keine gemessenen Daten vor. Somit mussten auch hier Annahmen getroffen werden. Wie aus o.g. Literatur hervor geht, ist auf Wald und Grünlandstandorten mit Regenwurmröhren bzw. Baumwurzeln bis in ca. 1 m Tiefe zu rechnen. Da Regenwürmer und Wurzeln hauptsächlich für die Bildung von Makroporen verantwortlich sind, ist der Makroporeneinfluss auf die Infiltration unterhalb dieser Tiefe als vernachlässigbar einzuschätzen. Entsprechend wird bei sämtlichen Nutzungen der Skinfaktor im C-Horizont 1 gesetzt.

5.4.2 Schichtenbezogene Parametrisierung

In Tab. 5 ist die horizontbezogene Zuordnung der Datenquellen zu den Modellparametern in Abhängigkeit der Nutzung dargestellt. Dabei sei erwähnt, dass durch die Bodenkarten (RBS, BK_{konz}) oft mehr als nur drei Schichten ausgewiesen werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in Tab. 5 jedoch nur drei Schichten dargestellt. Dabei steht Schicht 1 für die oberen 30 cm des Mineralbodens. In Schicht 2 sind alle unterhalb der ersten Schicht ausgewiesenen Horizonte bis in ca. 1 m Tiefe zusammengefasst. Schicht 3 beschreibt die letzte Schicht, welche von der RBS bzw. BK_{konz} erfasst wird.

Tab. 5 Datenquellen für die schichtbezogenen Parametrisierung der Modellgrößen in Abhängigkeit der Nutzung.

Schicht	Bodenart	BF [V %]	Rauh. [s/m ^{1/3}]	E-wid. [N/m ²]	Cover [%]	C _{org} [M %]	Ld [kg/m ³]	Skin [-]
Ackerflächen konservierend/konventionell								
1	RBS	PKS	PKS	PKS	PKS	PKS	PKS	PKS
2	RBS	PKS	/	/	/	RBS	RBS	A
3	RBS	PKS	/	/	/	RBS	RBS	A
Grünland / Direktsaat								
1	RBS	PKS	PKS	PKS	PKS	Seidel	Seidel	Seidel
2	RBS	PKS	/	/	/	RBS	RBS	Seidel
3	RBS	PKS	/	/	/	RBS	RBS	A
Wald								
1	RBS	PKS	PKS	PKS	PKS	Seidel	Seidel	Seidel
2	RBS	PKS	/	/	/	RBS	RBS	Seidel
3	RBS	PKS	/	/	/	RBS	RBS	A

BF-Anfangswassergehalt, Ld-Lagerungsdichte, Rauh.-Rauhigkeit, E-wid.-Erosionswiderstand, Cover- Bedeckungsgrad

Landesweiter Datenbestand

PKS Parameterkatalog Sachsen

RBS Reichsbodenschätzung

BK_{konz} Konzeptbodenkarte**Standortbezogene Messdaten**

Seidel (2005) experimentell

gewonnene Daten

Sonstige

/ ohne Relevanz

A Annahme

Die **Bodenart** wird schichtenabhängig der digitalen Bodenkarte entnommen. Die **Anfangsbodenfeuchte** (mittel, hoch) wird vor der Modellierung festgelegt und vom Datenbankprozessor in die bodenarten- bzw. bewirtschaftungsabhängigen Wassergehalte umgerechnet. Die die Bodenoberfläche beschreibenden Parameter (**Erosionswiderstand**, **Rauhigkeit**, **Bedeckungsgrad**) können vollständig dem Parameterkatalog Sachsen (PKS) entnommen werden. Sie haben für den Unterboden keine Relevanz. Bezüglich der Parameter **Lagerungsdichte** und **C_{org}-Gehalt**, unterscheiden sich die Datenquellen für den Ober- und Unterboden. Ursache hierfür ist der Landnutzungs- bzw. Bewirtschaftungseinfluss dem diese Parameter im Oberboden unterliegen. Diese Einflüsse werden durch den PKS berücksichtigt, durch die Bodenkarten (RBS und BK_{konz}) jedoch nicht. Deswegen sind die Bodenkarten nur für die Parametrisierung des Unterbodens heranzuziehen, während für die Parametrisierung des Oberbodens der PKS eine bessere Differenzierung ermöglicht.

Für die Parameter **Lagerungsdichte** und **C_{org}-Gehalt** liegen für alle betrachteten Landnutzungsvarianten sowohl Daten für den Oberboden als auch für den Unterboden vor, wenn auch in unterschiedlicher Qualität. Bezüglich der ackerbaulichen Szenarien wird zur Parametrisierung des Oberbodens einheitlich auf die Daten des PKS zurückgegriffen. Für die

Grünland- und Waldstandorte wurden die im jeweiligen Untersuchungsgebiet erhobenen Daten verwendet. Die Daten für den Unterboden entstammen den digitalen Karten der Reichsbodenschätzung (für Acker- und Grünlandflächen) bzw. der BK_{konz} (für Waldflächen).

Skinfaktoren der A-Horizonte (Schicht 1)

Für die Parametrisierung der Skinfaktoren der Oberböden kann auf gemessene Daten zurückgegriffen werden. Für die konventionelle sowie die konservierende Variante werden die entsprechenden Werte des PKS verwendet. Wald und Grünland werden durch eigene Messwerte, die in den Untersuchungsgebieten gewonnen wurden, abgedeckt (vgl. Kapitel 5.3.).

Skinfaktoren der B-bzw. M-Horizonte (Schicht 2)

Die Skinfaktoren der B- und M-Horizonte der Wald- und Grünlandstandorte entstammen den eigenen experimentellen Untersuchungen. Für Acker liegen hingegen für den Unterboden keine gemessenen Daten vor, so dass auf Annahmen (vgl. Kapitel 5.3.3.1) zurückgegriffen wurde.

Skinfaktor der C-Horizonte (Schicht 2)

Entsprechend den Ausführungen aus Kapitel 5.3.3.1 wurden der Skinfaktor sämtlicher C-Horizonte auf 1 gesetzt.

5.4.3 Konkrete Parameterwerte

Nachdem im vorigen Kapitel die Parameterquellen beschrieben wurden, werden im nun folgenden Schritt die Wertebereiche der Parameter in Abhängigkeit von der Nutzung dargestellt. Dies erfolgt beispielhaft für das UG Oberreichenbach dargestellt (Tab. 6).

Die Angaben für das UG Klatschbach befinden sich im Anhang (Tab. 12).

Tab. 6 Wertebereiche der Bodenparameter in Abhängigkeit der Nutzung (UG Oberreichenbach)

Schicht	WG mittel [V %]	WG hoch [V %]	Rauh. [s/m ^{1/3}]	E-wid. [N/m ²]	Cover [%]	Corg [M%]	Ld [kg/m ³]	Skin [-]
Acker konventionell								
1	18-40	28-41	0.005-0.099	0.0003-0.008	2-100	1.-1.7	1300-1500	0.06-0.9
2	18-40	22-41	/	/	/	0-0.6	1400-1750	1
3	18-41	28-44	/	/	/	0	1500-1800	1
Acker konservierend								
1	20-40	28-41	0.01-0.1	0.0015-0.011	32-100	1.5-1.7	1450-1530	2.5-15
2	20-41	22-41	/	/	/	0-0.6	1400-1750	2.5-15
3	20-41	28-44	/	/	/	0	1500-1800	1
Grünland / Direktsaat								
1	18-41	28-41	0.3	0.03-0.05	90	3.4	1328	8
2	18-41	26-41	/	/	/	0-0.6	1400-1750	34
3	13-44	14-44	/	/	/	0	1500-1800	1
Laubwald								
1	20-41	28-41	0.9	0.1-0.15	100	4.7	1152	10
2	20-41	26-41	/	/	/	0-0.6	1400-1750	29
3	14-41	14-44	/	/	/	0	1500-1800	1
Nadelwald								
1	18-40	28-40	0.9	0.1-0.15	100	7.0	1010	8
2	18-40	28-40	/	/	/	0-0.6	1400-1750	40
3	14-39	14-40	/	/	/	0	1500-1800	1

Die **Bodenarten** des UG Oberreichenbach umfassen ein weites Spektrum von sandigen bis hin zu schluffreichen Böden (SI2-Ut4).

Die **Anfangsbodenfeuchten** variieren in Abhängigkeit der Bodenart bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte zwischen 18 und 40 V % und bei hoher Anfangsbodenfeuchte zwischen 28 und 44 V %.

Die höchsten Werte für die **Rauhigkeit** ergeben sich erwartungsgemäß für die Waldböden. Daran schließen sich die Grünland / Direktsaatflächen sowie die konservierende Bewirtschaftung an. Die geringsten Rauhigkeiten werden den konventionell bewirtschafteten Ackerflächen (mit Mulchauflage) zugeordnet. In gleicher Reihenfolge sinken auch die Werte des **Erosionswiderstandes**, des **Bedeckungsgrades** sowie des **C_{org}-Gehaltes**.

Die **Lagerungsdichten** der Oberböden zeigen deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Nutzungen. Die geringsten Werte weisen die Waldstandorte infolge der vergleichsweise geringen anthropogene Beeinflussung und der hohen biologischen Aktivität

auf. Etwas höhere Dichten ergeben sich für die Grünland / Direktsaat Standorte. In Abhängigkeit vom Entwicklungszustand der Ackerkulturen besitzen die konservierend bewirtschafteten Standorte wegen der fehlenden mechanischen Lockerung z. T. höhere Lagerungsdichten, als die konventionelle Bewirtschaftung. Im konventionellen Fall wird durch das regelmäßige Pflügen der Boden stark gelockert, was kurzfristig zu sehr geringen Lagerungsdichten führt. Die Lagerungsdichten des Unterbodens unterscheiden sich zwischen den Landnutzungen hingegen nicht, da die Eingriffstiefe der Bodenbearbeitung nur bis in ca. 30 cm Tiefe reicht.

Bezüglich der **Skinfaktoren** des Oberbodens besitzen die Laubwaldstandorte die höchsten Werte im Oberboden, daran schließen sich die Nadelwald-, die Grünland / Direktsaat-Standorte sowie die konservierend bewirtschafteten Ackerflächen an. Unter bestimmten Voraussetzungen kann es vorkommen, dass die konservierend bewirtschafteten Standorte höhere Skinfaktoren aufweisen (z.B. Skinfaktor 12 bei Winterweizen auf Bodenart Ut3) als die Grünland / Direktsaat-Standorte (Skinfaktor 8) bzw. die Nadelwälder (Skinfaktor 8). Die Plausibilität dieser Daten im Verhältnis zueinander erscheint fraglich und müsste durch weitere Felduntersuchungen überprüft werden. Die Skinfaktoren der konventionell bewirtschafteten Ackerflächen sind < 1 gesetzt, da hier eine Verschlammung der Bodenoberfläche unterstellt wurde (vgl. Kapitel 5.4.1.4).

Die Skinfaktoren des Unterbodens sind auf den Nadelwald-Standorten am höchsten, daran schließen sich die Nutzungen Grünland / Direktsaat, Laubwald und konservierende Bewirtschaftung an. Diesen Nutzungen wird demnach ein vergleichsweise hoher Anteil von Makroporen im Unterboden unterstellt. Bei konventioneller Bewirtschaftung wird hingegen von einer vernachlässigbaren Anzahl von Makroporen ausgegangen. Auch hier sind die Verhältnisse zwischen den Landnutzungen nicht in jedem Fall schlüssig. Die Plausibilität der Unterboden-Skinfaktoren sollte durch weitere experimentelle Untersuchungen geprüft werden.

5.4.4 Räumliche Verteilung der Parameter

Um einen Eindruck über die räumliche Verteilung der Parameter zu erhalten, ist diese in Abb. 29 anhand von Karten beispielhaft für das UG Oberreichenbach dargestellt. Die Angaben beziehen sich jeweils auf den A-Horizont (Schicht 1) des Landnutzungsszenarios „Realnutzung konventionell“ unter der Annahme eines hohen Anfangswassergehaltes.

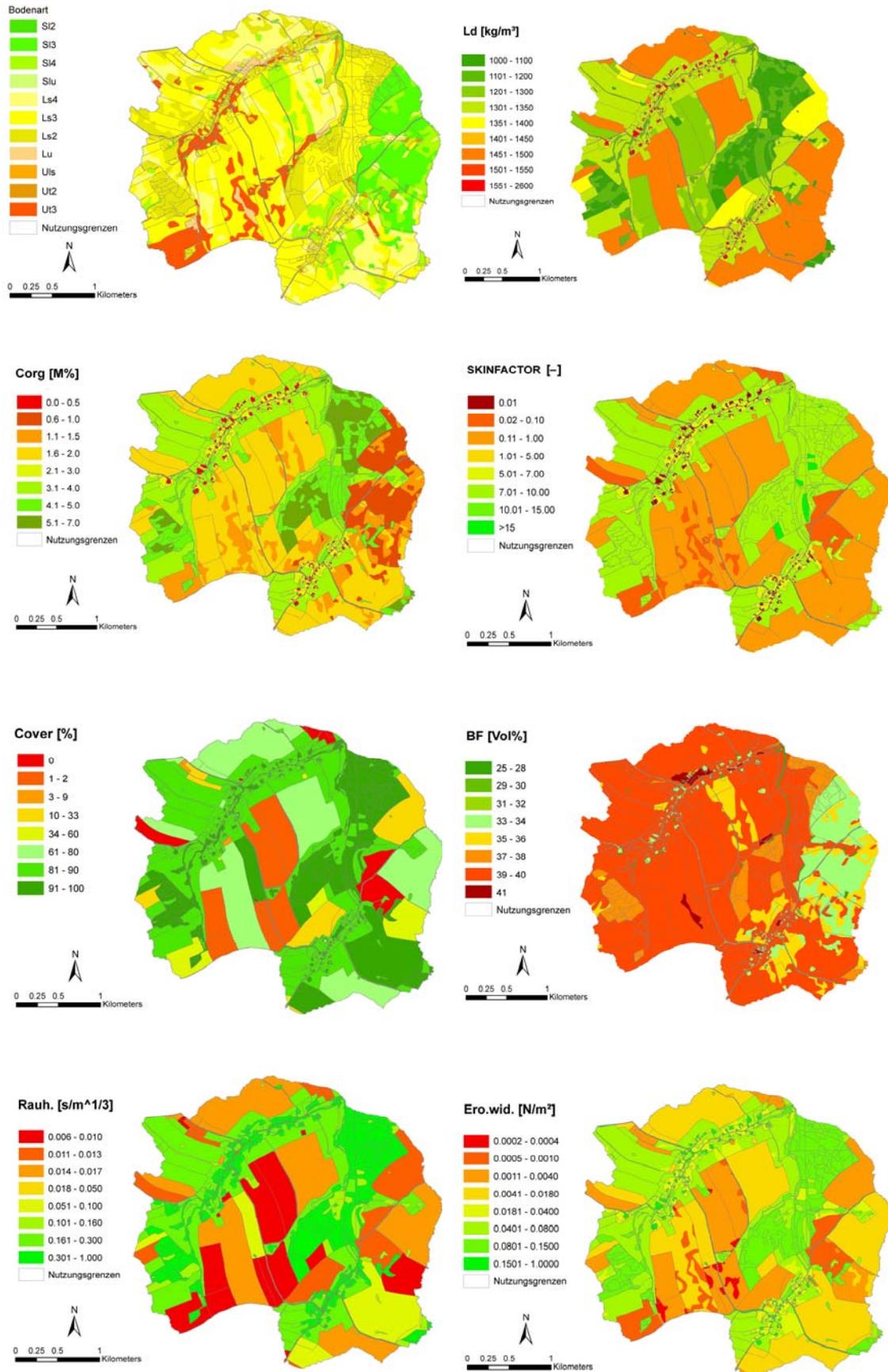


Abb. 29 Räumliche Verteilung der Parameter am Beispiel Oberreichenbach im Mai, konventionelle Bewirtschaftung, hohe Anfangsbodenfeuchte.

Die roten Farbtöne kennzeichnen dabei abfluss- und erosionssteigernde Parameterwerte, während die grünen Farben abfluss- bzw. erosionsmindernde Parameterwerte darstellen.

5.4.5 Ausgabeoptionen zur Darstellung der Simulationsergebnisse

EROSION 3D bietet eine Reihe Ausgabedateien zur Darstellung und Auswertung der Ergebnisse an. Folgende Ausgabeoptionen wurden entsprechend der Fragestellung der vorliegenden Arbeit verwendet:

- Abfrage des Gesamtaustrages bzw. des Abflussvolumens aus den Untersuchungsgebieten,
- Räumlich differenzierte Darstellung der Abflussbildung (Niederschlagsüberschüsse) und
- Räumlich differenzierte Darstellung der Abflusskonzentration.

Da hierfür in Ergänzung zum Benutzerhandbuch zusätzliche Tools und Informationen verwendet wurden, sind diese aus Gründen der Nachvollziehbarkeit im Folgenden kurz erläutert.

Gesamtaustrag und Abflussvolumen

Die Ergebnisse „Gesamtaustrag“ und „Abflussvolumen“ können interaktiv auf Grundlage der Ergebniskarte abgefragt werden.

Hierfür wird die Rasterzelle des Gebietsauslasses im Vorfluter angeklickt und unter dem Menüpunkt „Upslope data (channel flow)“ die Ausgabewerte

- total runoff [m³] (Abflussvolumen) und
- total sedimentmass [kg] (Gesamtaustrag)

abgelesen. Werden nur wenige Szenarien berechnet, ist dieses Verfahren durchaus komfortabel.

Bei einer größeren Anzahl von Szenarien ist es jedoch praktikabler, sich von EROSION 3D eine Datei erzeugen zu lassen, welche sämtliche Ergebnisse bezogen auf den Gebietsauslass in einer Tabelle ausgibt. Hierfür ist es notwendig eine Datei anzulegen, welche den Gebietsauslass markiert. Diese Datei wird in die Reliefdatei des jeweiligen Untersuchungsgebietes kopiert und „pour.asc“ genannt. Anschließend wird im Menü Simulation / Simulation options / Tabular output / Source of reference points die Option „grid“ gewählt. Während des Simulationsablaufs wird daraufhin von EROSION 3D eine Datei (ppdata.csv) angelegt, welche sämtliche Ergebnisse bezogen auf den Gebietsauslass liefert. Beachtet werden muss dabei, dass das Abflussvolumen (Ch_Runoff) in m³/m angegeben

wird und entsprechend der Auflösung des Geländemodells (in diesem Falle mit 5) multipliziert werden muss, um den tatsächlichen Gesamt-Oberflächenabfluss zu erhalten.

Abflussbildung (Niederschlagsüberschuss)

EROSION 3D berechnet für jede Rasterzelle des Untersuchungsgebiets den zeitlich- und räumlich differenzierten Verlauf der Abflussbildung in Abhängigkeit vom Niederschlagsverlauf sowie den Boden- und Nutzungseigenschaften des Standorts. Die entsprechende Darstellung wird durch die Ausgabedateien `q_cell*.asc` ermöglicht. Hierfür wurde diese Datei für den ausgewählten Zeitschritt in ein GIS geladen und entsprechend klassifiziert. Für die Darstellung der Abflussbildung zum Ende des Niederschlagsereignisses müssen die zeitschrittbezogenen Ascii-Dateien addiert werden. Abb. 30 zeigt beispielhaft den Niederschlagsüberschuss zum Ende des 50 jährigen Extremereignisses bezogen auf das Szenario „konventionelle Bewirtschaftung“ bei hoher Anfangsbodenfeuchte im UG Oberreichenbach.

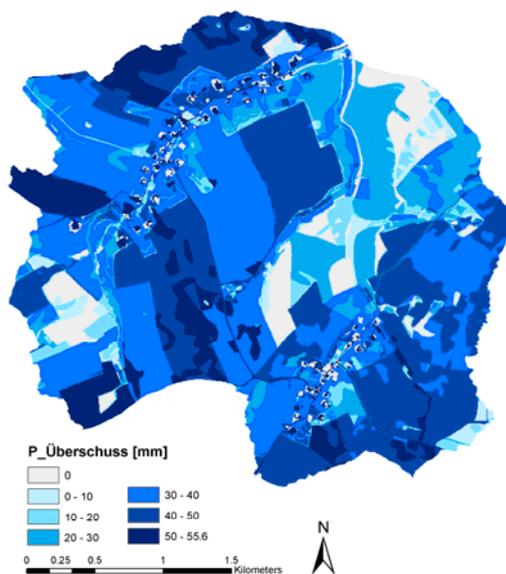


Abb. 30 Räumlich differenzierte Darstellung des ereignisbezogenen Niederschlagsüberschusses zum Ende des 50 jährigen Starkregenereignisses (konventionelle Bewirtschaftung, hohe Anfangsbodenfeuchte, Mai, UG Oberreichenbach).

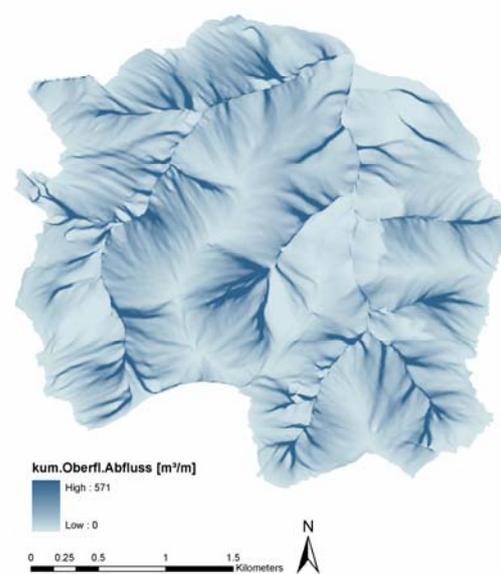


Abb. 31 Räumlich differenzierte Darstellung des kumulativen Oberflächenabflusses für ein Gesamtereignis (50 jähriges Niederschlagsereignis konventionelle Bewirtschaftung, hohe Anfangsbodenfeuchte, Mai, UG Oberreichenbach).

Abflusskonzentration (kumulativer Oberflächenabfluss)

Die räumlich differenzierte Darstellung der Abflusskonzentration (kumulativer Oberflächenabfluss) wird in EROSION 3D durch Ausgabe der Datei `sum_q_asc` ermöglicht. Mit Hilfe eines GIS lässt sich daraus die Abflusskonzentration nach Ende des Starkregenereignisses für das gesamte Einzugsgebiet darstellen. Durch Auswahl einer einzelnen Rasterzellen, kann die standortbezogene Höhe des Abflussvolumens abgelesen

werden, welches diese Zelle im Laufe des Niederschlagsereignisses überströmt hat. Anhand von Abb. 31 ist ein Beispiel der erläuterten Darstellungs- und Abfrageoption gezeigt.

5.5 Verfahren zur Bestimmung der Abflusswirksamkeit eines Starkregenereignisses

Die in der Arbeit verwendeten statistischen Ereignisse wurden vom DWD auf Basis der Auswertung von Starkniederschlägen nach DVWK Regel 123 (DVWK 1985) erstellt. Die Jährlichkeit der Ergebnisse gibt an, wie oft mit einem Ereignis annähernd gleicher Intensität zu rechnen ist (MICHAEL 2000). Demnach wird die Jährlichkeit allein anhand der maximalen Intensität festgelegt, die Niederschlagssumme geht dabei nicht ein. Die Jährlichkeit ist daher kein physikalisches, sondern ein statistisches Maß. Deshalb wird im Folgenden eine Größe eingeführt, die sich aus der Niederschlagsdauer und der Intensitätsverteilung ableitet. Diese Größe wird im Folgenden **Abflusswirksamkeit** genannt. Es steht damit ein weiteres Instrument zur Interpretation der Ergebnisse zur Verfügung.

Zur Bestimmung der Abflusswirksamkeit wird folgendes Verfahren angewendet:

Für das betreffende Niederschlagsereignis werden zunächst Überschreitungshäufigkeiten der Niederschlagsintensität (≥ 0.1 mm/min) in Stufen von je 0.1 mm/min (0.1, 0.2, 0.3...) bestimmt und graphisch dargestellt (Abb. 32).

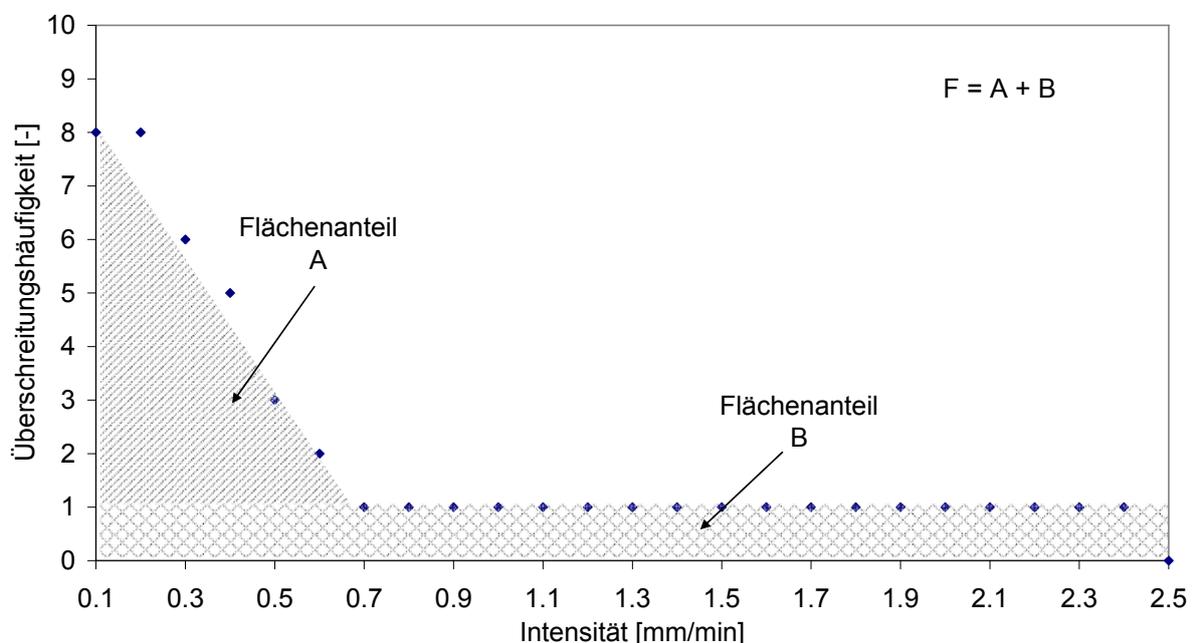


Abb. 32 Überschreitungshäufigkeiten der Niederschlagsintensität am Beispiel des 50 jährigen Extremereignisses der Subregion 7 sowie Bestimmung des Flächeninhaltes F unterhalb der Kurve.

Für die so erhaltene Kurve wird der Flächeninhalt F unter der Kurve bestimmt. Im einfachsten Fall wird eine Anpassung dadurch erzielt, dass jeweils eine Trendlinie für Überschreitungshäufigkeiten = 1 und eine für > 1 in das Diagramm eingezeichnet wird.

Dadurch ergeben sich zwei Flächen, eine Rechteckfläche und eine Dreiecksfläche, deren Summe den Flächeninhalt unter der Kurve hinreichend gut beschreibt. Die so ermittelte Fläche lässt sich als gewichtete Intensität des Starkregenereignisses interpretieren und ist ein Maß für die Abflusswirksamkeit.

Dieses Verfahren wurde auf die in der vorliegenden Arbeit verwendeten vier statistischen Starkregenereignisse der Subregion 7 mit 5, 20, 50 und 100 jähriger Wiederkehrzeit angewendet. Für diese Ereignisse ergeben sich folgende Abflusswirksamkeiten (Tab. 7).

Tab. 7 Abflusswirksamkeiten verschiedener statistischer Starkregenereignisse (Subregion 7)

Jährlichkeit [a]	5	20	50	100
Abflusswirksamkeit [mm/min]	2.15	3.85	5.03	6.00

Die Beziehung zwischen Jährlichkeit und Abflusswirksamkeit ist in Abb. 33 graphisch dargestellt.

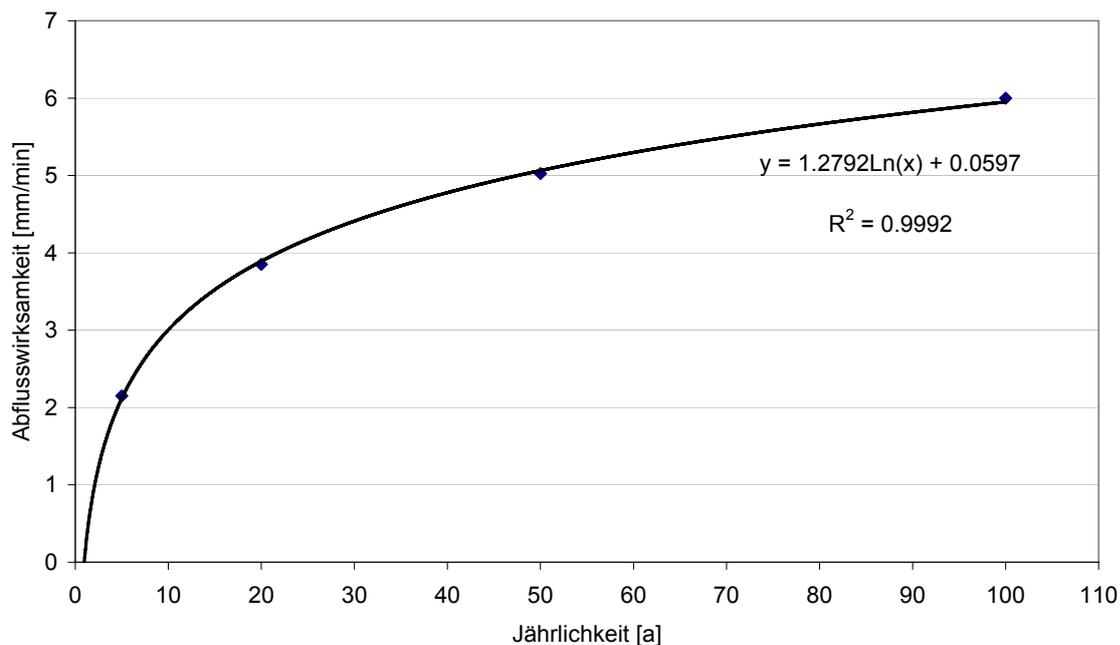


Abb. 33 Darstellung der Abflusswirksamkeit in Abhängigkeit der Jährlichkeit für die vier ausgewählten Starkregenereignisse der Subregion 7.

Legt man durch die vier Punkte eine logarithmische Trendlinie, zeigt diese ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß, so dass sich auf Basis des Linienvlaufes die Abflusswirksamkeiten weiterer Starkregenereignisse, die eine Jährlichkeit zwischen 0 und 100 Jahren besitzen, bestimmen lassen.

Aus Abb. 33 geht weiter hervor, dass bis zu einem Wiederkehrintervall von etwa 20 Jahren die Abflusswirksamkeit eines Ereignisses mit zunehmender Jährlichkeit stark zunimmt.

Danach ist der Anstieg der Kurve deutlich flacher, so dass die Abflusswirksamkeit ab dem 50 jährigen Extremereignis nur noch geringfügig zunimmt.

Da das Abflussvolumen mit zunehmender Ereignisdauer meist deutlich zunimmt, sollte die Abflusswirksamkeit nicht auf das Abflussvolumen, sondern auf den Abflussbeiwert bezogen werden, da der Anteil des abgeflossenen Niederschlages nur maximal 100 % betragen kann.

Das Beispiel bezieht sich auf Subregion 7. Geprüft werden müsste, wie sich die Kurve für andere Subregionen verhält.

In die Abflusswirksamkeit geht nach dem hier zugrunde gelegten Verfahren die überregnete Fläche nicht ein, da ausschließlich kleine Einzugsgebiete betrachtet werden sollen, bei denen stets von einer flächendeckenden Überregnung ausgegangen werden kann.

5.6 Curve-Number-Verfahren

Da es sich bei den in dieser Arbeit untersuchten Einzugsgebieten um hydrologisch unbeobachtete Gebiete handelt, und demnach keine gemessenen Abflussdaten existieren, wurde zur Plausibilitätsprüfung der von EROSION 3D berechneten Abflussbeiwerte das Curve-Number-Verfahren (CN-Verfahren) herangezogen (*MANIAK 2005, US-SCS 1986*). Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine international akzeptierte Methode zur Abschätzung des effektiven Niederschlages in Abhängigkeit der Niederschlagshöhe N sowie gebietsspezifischer Parameter für Boden und Vegetation sowie die Anfangsbodenfeuchte (*MANIAK 2005*).

Für eine detaillierte Methodenbeschreibung sei auf *MANIAK (2005, S.291FF.)* verwiesen.

Der Direktabfluss A berechnet sich wie folgt:

$$(43) \quad A = \frac{(N - Ia)^2}{(N - Ia) + S}$$

A	Direktabfluss[mm]
N	Niederschlagsmenge [mm]
Ia	Anfangsverlust [mm]
S	maximales Speichervermögen [mm]

mit :

$$Ia = 0.2 * S \quad \text{bzw.} \quad Ia = 0.05 * S \quad **$$

*Aufgrund von Feldmessungen wird im CN-Verfahren von einem Anfangsverlust von 20 % des maximalen Speichervermögens ausgegangen

**Für mitteleuropäische Verhältnisse wird nach *MANIAK (2005)* ein Anfangsverlust von 5 % des maximale Speichervolumens empfohlen. Dieser Wert wird für die Vergleichsrechnungen herangezogen

Das maximale Speichervolumen S wird in Abhängigkeit der Curve-Number wie folgt berechnet:

$$(44) \quad S = \frac{1000}{CN - 10}$$

Da alle Werte in Zoll ausgedrückt sind, erfolgt durch Multiplikation mit 25.4 die Umrechnung in Millimeter:

$$(45) \quad S = 25.4 * \left(\frac{1000}{CN - 10} \right)$$

Für die Berechnung des Abflussbeiwertes können drei Bodenfeuchteklassen berücksichtigt werden. Die Curve-Number für mittlere Bodenfeuchte (Bodenfeuchtekategorie II) dient als Ausgangsgröße zur Umrechnung in die Bodenfeuchtekategorie I (trockener Bodenzustand, Gleichung 46) und III (nasser Bodenzustand, Gleichung 47).

$$(46) \quad CNI = \left(\frac{CNII}{2.334 - 0.01334 * CNII} \right) \text{ bzw.}$$

$$(47) \quad CNIII = \left(\frac{CNII}{0.4036 + 0.0059 * CNII} \right)$$

Tab. 8 Auszug der CN-Werte in Abhängigkeit von Bodengruppe und Nutzung für Bodenfeuchtekategorie II (verändert nach Maniak 2005)

Landnutzungsszenario	Zugeordnete Kategorie	CN für Bodengruppe			
		A	B	C	D
Wald	Wald, dicht	25	55	70	77
Grünland	Dauerwiese	30	58	71	78
Ackernutzung	Getreide, herkömmlich	64	76	84	88
Siedlung	Wirtschaftshöfe	59	74	82	86

Bodengruppe A: Böden mit großem Versickerungsvermögen, auch nach starker Vorbefeuchtung, z.B. tiefgründige Kies- und Sandböden.

Bodengruppe B: Böden mit mittlerem Versickerungsvermögen, tiefe bis mäßig tiefgründige Böden mit mäßig feiner bis mäßig grober Struktur, z.B. Sandböden, Löss, (schwach)lehmgiger Sand.

Bodengruppe C: Böden mit geringem Versickerungsvermögen, Böden mit feiner bis mäßig feiner Textur oder mit wasserstauer Schicht, z.B. flachgründige Sandböden, sandiger Lehm.

Bodengruppe D: Böden mit sehr geringem Versickerungsvermögen, Tonböden sehr flache Böden über nahezu undurchlässigem Material, Böden mit dauern sehr hohem Grundwasserspiegel.

Hinsichtlich der hydrologischen Bodengruppen wurde das Untersuchungsgebiet Oberreichenbach in die Bodengruppe B eingeordnet, das UG Klatschbach in Bodengruppe C (siehe Tab. 8).

Die Berechnung der szenarienspezifischen CN-Werte erfolgte unter Berücksichtigung der jeweiligen Flächenanteile der Hauptlandnutzungen sowie der Anfangsbodenfeuchte. (Gleichung 48).

Da sich das reale Ereignis 2002 über zwei Tage erstreckte, das CN-Verfahren jedoch für Tageswerte konzipiert ist, wurde das Ereignis geteilt und zunächst jeweils die Abflussbeiwerte pro Tag berechnet. Anschließend wurden diese beiden Abflussbeiwerte in Abhängigkeit der Tagesniederschlagssumme gewichtet und zu einem auf das Gesamt ereignis bezogenen Abflussbeiwert aufaddiert.

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Experimentelle Ergebnisse

6.1.1 Infiltrationskurven

Die in den Beregnungsexperimenten aufgenommenen Infiltrationskurven sind für Laubwald, Nadelwald und Grünland deutlich verschieden. Typische Verläufe von Infiltrationskurven der drei untersuchten Nutzungsvarianten veranschaulicht Abb. 34.

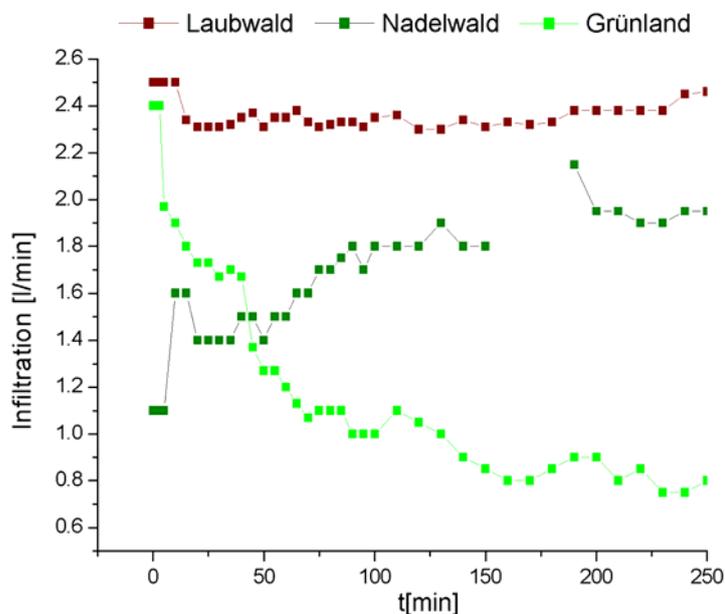


Abb. 34 Beispiele für typische Verläufe der Infiltrationskurven unter Laubwald (Standort 2), Nadelwald (Standort 8) und Grünland (Standort 4).

Daraus geht hervor, dass auf Grünland die Infiltration im Gegensatz zu Laubwald und Nadelwald mit der Zeit deutlich abnimmt und sich schließlich auf einem konstanten Niveau (Endinfiltrationsrate) einpegelt. Die Laubwald-Standorte zeigen von Beregnungsbeginn an hohe Infiltrationsraten, die im Verlauf der Beregnung nur geringfügig abnehmen. Die Nadelwaldstandorte liefern Infiltrationskurven, welche zunächst auf niedrigem Niveau beginnen und mit der Zeit ansteigen, bis schließlich die Endinfiltrationsrate erreicht ist. Die Endinfiltrationsrate liegt dann etwas unterhalb derer der Laubwaldstandorte. Die Ursache für die anfänglich geringen, dann ansteigenden Infiltrationsraten der Nadelwaldstandorte wird in den hohen Benetzungswiderständen aufgrund der hydrophoben Eigenschaften der Nadelstreu gesehen. Hierbei spielen auch die im Vergleich zu Laubwaldstandorten

geringeren Wassergehalte der Nadelwaldböden eine Rolle. Hydrophobizitätseffekte wurden auf den Laubwald-Standorten nicht beobachtet. Somit konnten Gegensatz zu den Studien von *TOLDRIAN (1974)* und *SCHWARZ (1985, 1986)* (s. Kapitel 2.3.2.1) zwischen Laub- und Nadelwald-Standorten Unterschiede im Infiltrationsverhalten festgestellt werden.

Die höchsten Endinfiltrationsraten wurden jeweils auf den Laubwald-Standorten erreicht, die geringsten wiesen die Grünland-Standorte auf. Die höheren Endinfiltrationsraten der Wald-Standorte sind auf die im Vergleich zu Grünland deutlich geringeren Lagerungsdichten (vgl. Abb. 37) und das damit verbundene höhere Gesamtporenvolumen zurückzuführen.

Die vollständige Darstellung der aus den Beregnungsversuchen stammenden Infiltrationskurven befinden sich im Anhang (Abb. 80 bis Abb. 82)

6.1.2 Skinfaktoren

Die Ergebnisse der berechneten Skinfaktoren bezogen auf die einzelnen Landnutzungsvarianten zeigen Abb. 35 und Abb. 36. Dabei sind in Abb. 35 die Skinfaktoren der A-Horizonte dargestellt, in Abb. 36 die der B- / M-Horizonte. Die Ergebnisse auf der linken Seite der Abbildungen beziehen sich auf das UG Oberreichenbach, die auf der rechten Seite auf das UG Klatschbach.

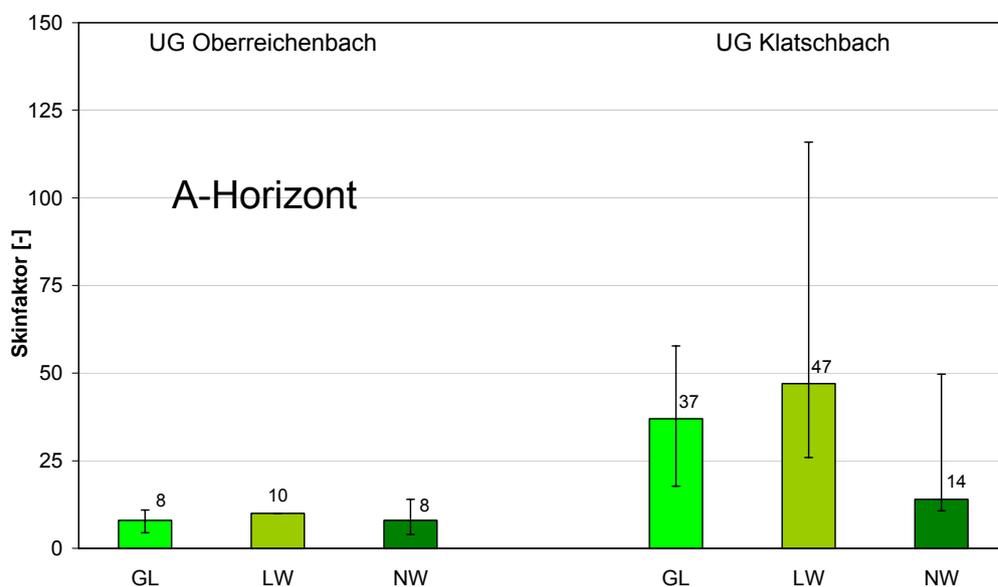


Abb. 35 Skinfaktoren der A-Horizonte (unter Angabe der Spannweiten) beider Untersuchungsgebiete für Grünland (GL) Laubwald (LW) und Nadelwald (NW), ermittelt aus den Experimenten.

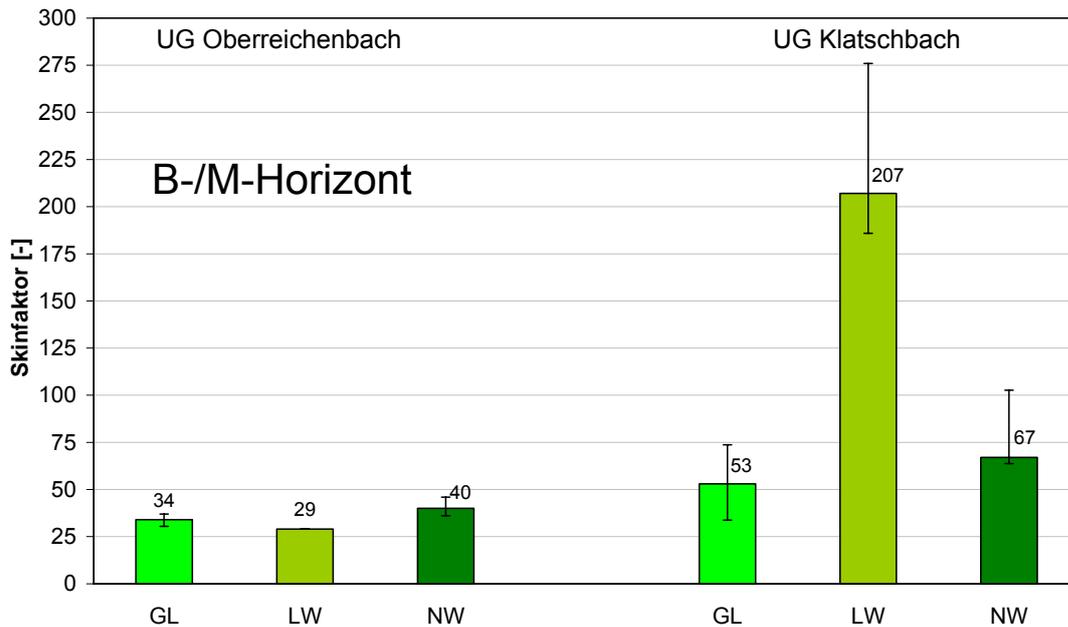


Abb. 36 Skinfaktoren der B-/M-Horizonte (unter Angabe der Spannweiten) beider Untersuchungsgebiete für Grünland (GL) Laubwald (LW) und Nadelwald (NW), ermittelt aus den Experimenten.

Daraus geht hervor, dass in allen Fällen für die B-/M-Horizonte höhere Skinfaktoren berechnet wurden als für die A-Horizonte. Als Ursache werden Betreten bzw. Befahrung der Standorte, welche eine Zerstörung einzelner Makroporen im Oberboden zur Folge hat, angesehen. Da der Unterboden nicht mechanisch beeinflusst wird, kann sich dort ein stabiles Makroporensystem ausbilden. Des Weiteren zeigt das UG Oberreichenbach für beide Horizonte geringere Skinfaktoren als Klatschbach. Grund hierfür sind die ohnehin durchlässigeren sandigeren Böden im UG Oberreichenbach im Vergleich zu den Schluffböden im UG Klatschbach.

Bezüglich der Landnutzungsvarianten lässt sich für den A-Horizont feststellen, dass Laubwald in beiden Untersuchungsgebieten die höchsten Skinfaktoren aufweist. Dies lässt sich mit der hohen biologischen Aktivität unter Laubwaldbeständen begründen. Im B-/M-Horizont zeigt sich nur im UG Klatschbach ein signifikant höherer Skinfaktor der Laubwaldstandorte im Vergleich zu Nadelwald und Grünland.

Abgesehen vom A-Horizont des UG Klatschbach weisen Grünland und Nadelwald vergleichbare Größenordnungen auf. Die im Vergleich zu Laubwald geringeren Skinfaktoren lassen sich bei Grünland durch die Befahrung (Verdichtung und Verschmierung von Makroporen) begründen. Bei den Nadelwaldstandorten wird eine geringere biologische Aktivität im Vergleich zu Laubwald als Ursache für die geringeren Skinfaktoren angesehen.

6.1.3 Lagerungsdichten

Wie aus den experimentell bestimmten Lagerungsdichten (Abb. 37) hervorgeht, wurden im UG Klatschbach für die drei untersuchten Landnutzungen höhere Lagerungsdichten bestimmt als im UG Oberreichenbach. Dies lässt sich mit den unterschiedlichen Bodenarten in den Untersuchungsgebieten begründen, da Böden mit höheren Ton- und Schluffgehalten im Allgemeinen eher zu Verdichtung neigen als sandigere Böden.

Abb. 37 zeigt weiterhin, dass in beiden Untersuchungsgebieten unter Grünland die höchsten Lagerungsdichten ermittelt wurden, daran schließen sich die Laubwald- und Nadelwald-Standorte an. Die vergleichsweise hohen Lagerungsdichten der Grünlandstandorte sind auf Befahrungen (Mahd, Heuernte) zurückzuführen.

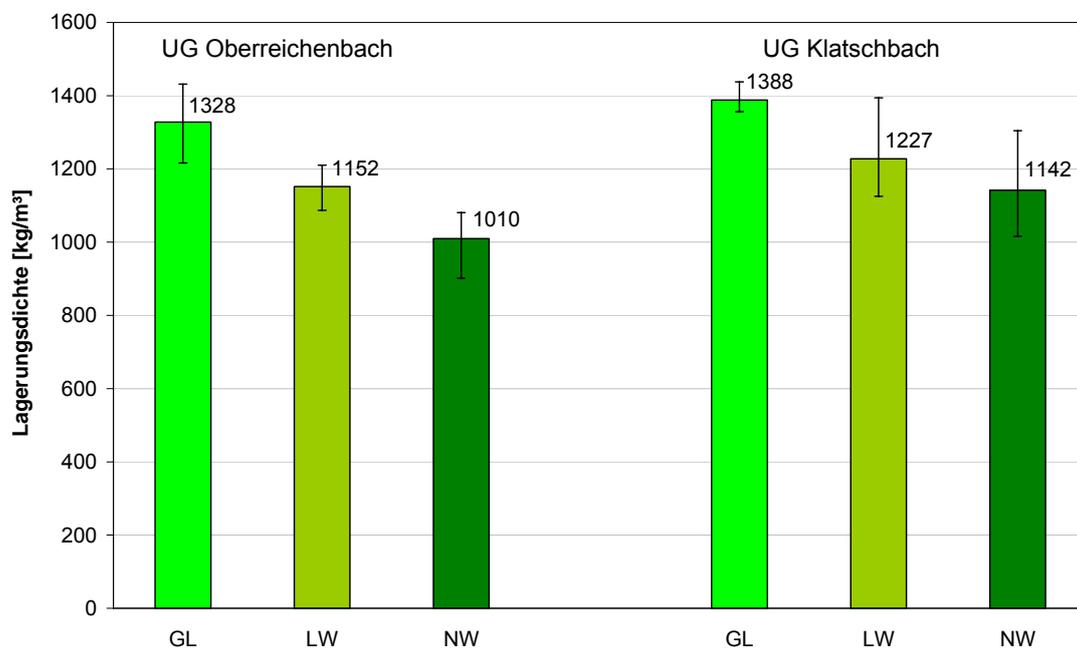


Abb. 37 Mittlere Lagerungsdichten der Grünland (GL), Laub - (LW) und Nadelwaldstandorte (NW) beider Untersuchungsgebiete.

6.1.4 C_{org}-Gehalte

Die mittleren C_{org}-Gehalte der Landnutzungsvarianten sind Abb. 38 zu entnehmen. Es zeigt sich, dass die Nadelwald-Standorte die höchsten C_{org}-Gehalte aufweisen, daran schließen sich die Laubwälder an. Die geringsten Gehalte weisen die Grünlandstandorte auf, sofern die Ackerflächen unberücksichtigt bleiben.

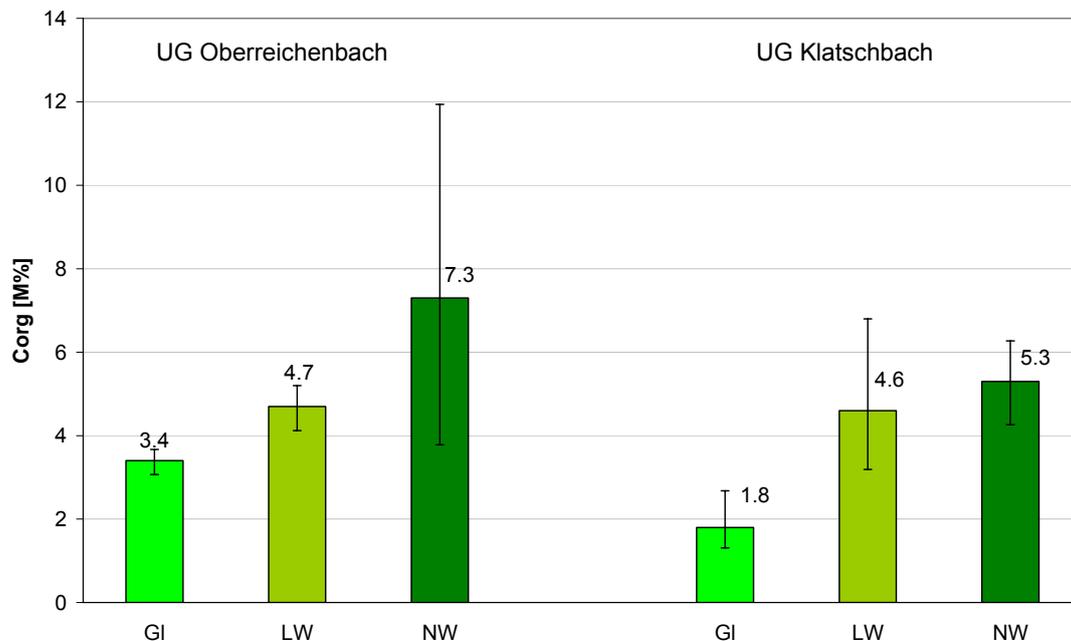


Abb. 38 Mittlere C_{org}-Gehalte der Grünland (GI), Laub- (LW) und Nadelwald-Standorte (NW) beider Untersuchungsgebiete.

Bezüglich der Grünlandstandorte besitzt das UG Oberreichenbach deutlich höhere C_{org}-Gehalte als das UG Klatschbach. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass im UG Klatschbach die Grünland-Standorte noch intensiver als im UG Oberreichenbach genutzt werden und dadurch ein höherer Ernteentzug stattfindet.

Die mittleren C_{org}-Gehalte der Laubstandorte unterscheiden sich hinsichtlich der UG's nicht. Bei den Nadelwaldstandorten liegt der mittlere C_{org}-Gehalt im UG Klatschbach 2 M% unter dem des UG's Oberreichenbach. Allerdings ist die Schwankungsbreite im UG Oberreichenbach sehr groß, so dass die Unterschiede zwischen den Untersuchungsgebieten nicht eindeutig feststellbar sind.

Es ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Feldversuchen lediglich um wenige Stichproben handelt, die untereinander teilweise stark schwanken. Da der C_{org}-Gehalt jedoch einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die im Modell verwendete Infiltrationsberechnung besitzt, sind die Auswirkungen auf die Abflussprognosen als eher gering einzuschätzen.

6.2 Modellergebnisse

6.2.1 Statistische Niederschlagsereignisse

6.2.1.1 Ergebnisse der Abflussberechnungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellrechnungen dargestellt und beschrieben.

In Abb. 39 sind die berechneten Oberflächenabflüsse der beiden Untersuchungsgebiete in Abhängigkeit von der Nutzung und für Starkregenereignisse unterschiedlicher Jährlichkeit dargestellt. Die Diagramme im linken Teil der Abbildung beziehen sich auf Berechnungen mit mittlerer Anfangsbodenfeuchte (BF), die Diagramme im rechten Teil zeigen die Ergebnisse für hohe Anfangsbodenfeuchte.

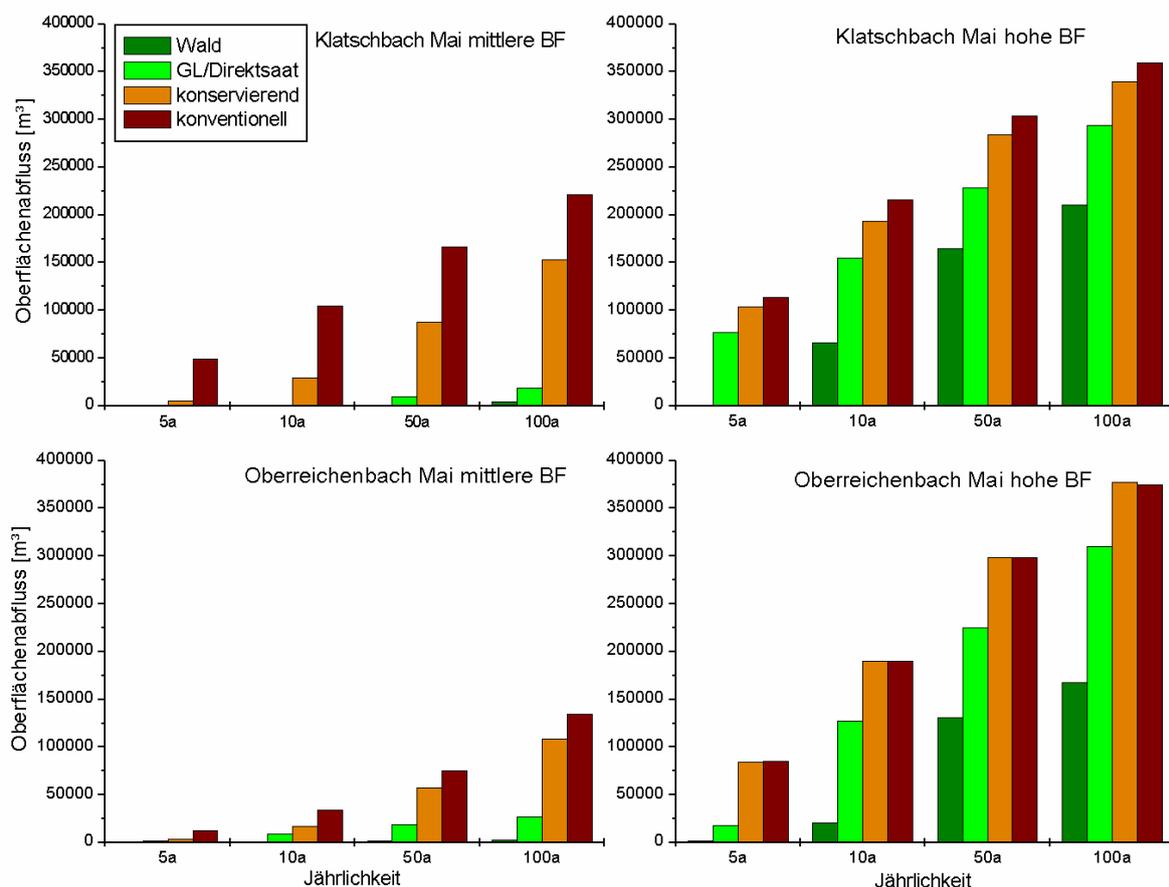


Abb. 39 Ergebnisse der Abflussprognoseberechnungen für die UG's Klatschbach (oben) und Oberreichenbach (unten) bei Unterstellung mittlerer (links) und hoher Anfangsbodenfeuchte (BF) (rechts).

Die Ergebnisse zeigen folgende Abhängigkeiten:

Mit zunehmender Jährlichkeit steigt bei gleicher Nutzung die Menge des oberflächlich abfließenden Wassers an. Erwartungsgemäß nehmen die Abflüsse von Wald, Grünland / Direktsaat über konservierende zur konventionellen Bewirtschaftung hin zu. Eine Ausnahme zeigen die Ergebnisse im UG Oberreichenbach bei hoher Anfangsbodenfeuchte. Hier sind zwischen konservierend und konventionell beim 10 und 50 jährigen Starkregenereignis keine Unterschiede festzustellen. Beim 100 jährigen Extremereignis liefert die konservierende Variante geringfügig mehr Oberflächenabfluss als die konventionelle.

Bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte wird deutlich, dass unter Wald kein nennenswerter Oberflächenabfluss entsteht. Erst bei hoher Anfangsbodenfeuchte kommt es auch unter Wald zur Abflussbildung. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die relativen Unterschiede zwischen den verschiedenen Nutzungsszenarien bei hoher Anfangsbodenfeuchte kleiner sind, als bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte. Der Einfluss der Nutzung auf die Abflussbildung nimmt außerdem mit zunehmender Jährlichkeit der Niederschlagsereignisse ab.

Hinsichtlich der ackerbaulichen Bewirtschaftungsmethoden konservierend und konventionell zeigen sich nur im UG Klatschbach signifikante Unterschiede. Die konservierende Bewirtschaftung liefert stets weniger Abfluss als die konventionelle Variante. Im UG Oberreichenbach zeigen sich solche Unterschiede nicht. Eine deutliche Minderung des Oberflächenabflusses im Vergleich zur konventionellen Variante ergibt sich bei beiden Untersuchungsgebieten für die Variante Grünland / Direktsaat.

Betrachtungen auf Einzugsgebietsebene

Um die spezifische Reaktion der Untersuchungsgebiete auf Extremereignisse unterschiedlicher Jährlichkeit vergleichend beschreiben zu können, ist in den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 40 bis Abb. 43) der Abflussbeiwert als Funktion der Abflusswirksamkeit (s. Kapitel 5.5) aufgetragen. Für jede Kombination aus Nutzung und Anfangsbodenfeuchte wurde eine Kurvenanpassung durchgeführt. Diese ergab für sämtliche Datenreihen ein hohes Bestimmtheitsmaß ($R^2 > 0.9$), so dass von einem signifikanten Zusammenhang zwischen Abflussbeiwert und Abflusswirksamkeit ausgegangen werden kann. Dieser Zusammenhang ist nicht linear, da sich der Abflussbeiwert mit zunehmender Abflusswirksamkeit einem konstanten Wert annähert.

Die Grafiken (Abb. 40 bis Abb. 43) zeigen, dass sich bei gleicher Abflusswirksamkeit unter Wald stets die geringsten Abflussbeiwerte ergeben. Daran schließen sich Grünland / Direktsaat und konservierende Bewirtschaftung an. Die höchsten Abflussbeiwerte ergaben sich in dieser Studie für konventionelle Bewirtschaftung.

Allerdings nehmen die Unterschiede zwischen den nutzungsspezifischen Abflussbeiwerten mit zunehmender Abflusswirksamkeit ab. Bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte sind im UG Klatschbach (Abb. 40) deutliche Unterschiede zwischen konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung zu erkennen. Diese Ergebnisse gehen im Wesentlichen konform mit Untersuchungen von W. SCHMIDT ET AL. (2001). Weniger deutliche Unterschiede zwischen diesen beiden Bewirtschaftungsmethoden ergeben sich im UG Oberreichenbach (Abb. 42). Bei hoher Anfangsbodenfeuchte sind ebenfalls nur noch geringe (Abb. 41) bis keine (Abb. 43) Unterschiede (Abb. 43) feststellbar. Grünland / Direktsaat und Wald besitzen hingegen auch noch bei hoher Bodenfeuchte deutlich kleinere Abflussbeiwerte als die konservierende bzw. konventionelle Bewirtschaftungsvariante.

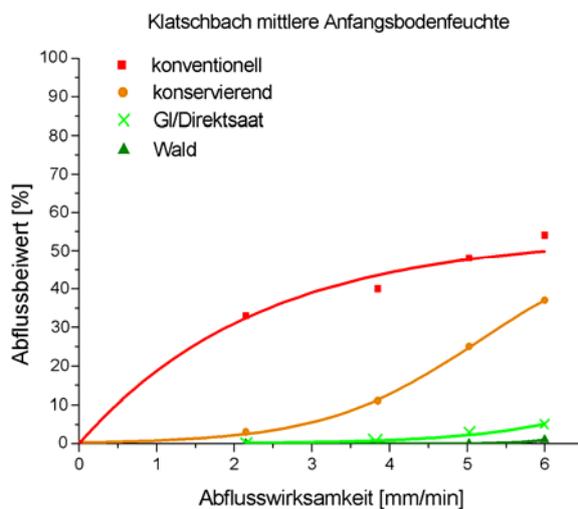


Abb. 40 Abflussbeiwerte Klatschbach in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte.

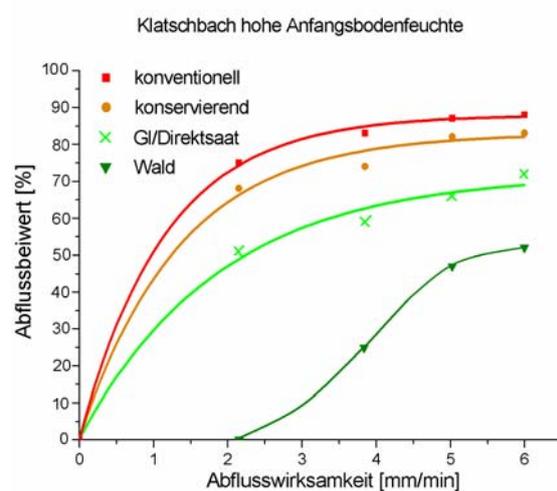


Abb. 41 Abflussbeiwerte Klatschbach in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit bei hoher Anfangsbodenfeuchte.

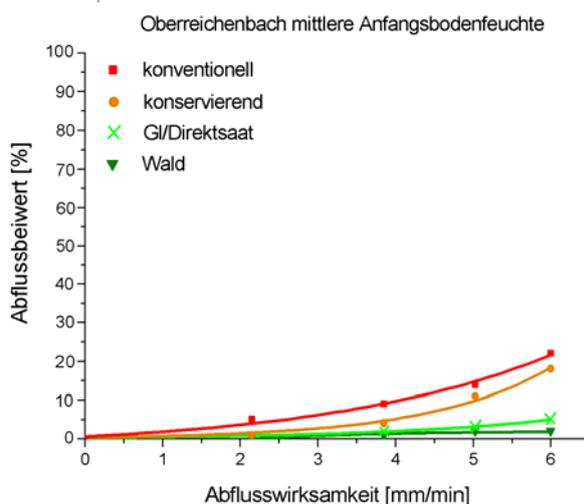


Abb. 42 Abflussbeiwerte Oberreichenbach in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte.

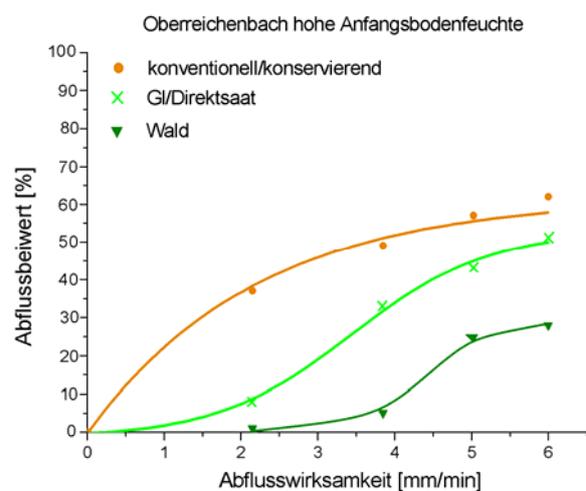


Abb. 43 Abflussbeiwerte Oberreichenbach in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit bei hoher Anfangsbodenfeuchte.

Die Kurvenverläufe werden dabei maßgeblich durch das Wasserretentionspotential der jeweiligen Szenarienkombination bestimmt. Dieses ist hier bei der Nutzung Wald in Kombination mit sandigeren Böden (Oberreichenbach) bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte am größten (Abb. 42) und führt damit zu den im Vergleich kleinsten Abflussbeiwerten. Das geringste Wasserretentionspotential besitzt demgegenüber die konventionelle Bewirtschaftung bei hoher Anfangsbodenfeuchte und schluffreichen Böden (UG Klatschbach) (Abb. 41) mit dementsprechend hohen Abflussbeiwerten.

Darüber hinaus unterscheiden sich die dargestellten Kurven in ihrem Verlauf. Konvexe Kurven sind typisch für Szenarienkombinationen mit geringem Wasserretentionspotential. Konkav-konvexe Kurven sind hingegen kennzeichnend für Szenarienkombinationen mit hohem Wasserretentionspotential.

Konkav-konvexe Kurvenverläufe zeigen im UG Klatschbach die Szenarien Wald, Gründland / Direktsaat und konservierende Bewirtschaftung bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte (Abb. 40). Im UG Oberreichenbach zeigen fast alle Szenarien, bis auf konventionell und konservierend bei hoher Anfangsbodenfeuchte ebenfalls einen konkav-konvexen Verlauf (Abb. 42 und Abb. 43)

Einen konvexen Kurvenverlauf, der durch einen zunächst steilen Anstieg des Abflussbeiwertes relativ zur Abflusswirksamkeit gekennzeichnet ist, zeigen zum Beispiel sämtliche Nutzungen im UG Klatschbach bei hoher Anfangsbodenfeuchte mit Ausnahme von Wald (Abb. 41). Mit weiter zunehmender Abflusswirksamkeit nähern sich diese Kurven einem Endwert an, was bedeutet, dass das Wasserretentionspotential infolge hoher Niederschlagsmengen zunehmend ausgeschöpft wird.

Betrachtet man für beide Einzugsgebiete sämtliche Kurven bei hoher Anfangsbodenfeuchte, wird deutlich, dass dieser Endwert (maximaler Abflussbeiwert) entscheidend vom Untersuchungsgebiet, und damit von der Bodenart abhängig ist. Während dieser Endwert im UG Klatschbach bei konventioneller Bewirtschaftung für die betrachteten Abflusswirksamkeiten bis 6 mm/min etwa bei einem Abflussbeiwert von 80 % liegt, erreicht er im UG Oberreichenbach etwa 60 %. Dieser Unterschied begründet sich im höheren k_f -Wert der Böden im UG Oberreichenbach.

Um den Einfluss der Bodenfeuchte besser zu visualisieren zu können, wurden in Abb. 44 die Kurven des Nutzungsszenarios konservierend (UG Klatschbach) exemplarisch für hohe und mittlere Anfangsbodenfeuchte gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass der Unterschied bei geringen Abflusswirksamkeiten zunächst zunimmt, ein Maximum erreicht und danach wieder geringer wird. Dies bedeutet, dass der Einfluss der Bodenfeuchte (zwischen mittel und hoch) bei Abflusswirksamkeiten von etwa 3 mm/min am größten ist. Dies entspricht etwa einem 20 jährigen Extremereignis.

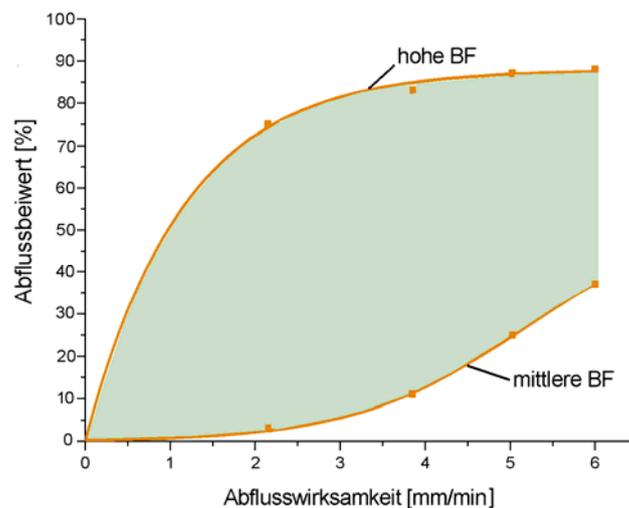


Abb. 44 Einfluss der Anfangsbodenfeuchte auf den Abflussbeiwert in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit am Beispiel der konservierenden Bewirtschaftung, UG Klatschbach.

Wie aus Abb. 45 hervorgeht, ist ein ähnlicher Zusammenhang auch für den Einfluss der Landnutzung zu erkennen.

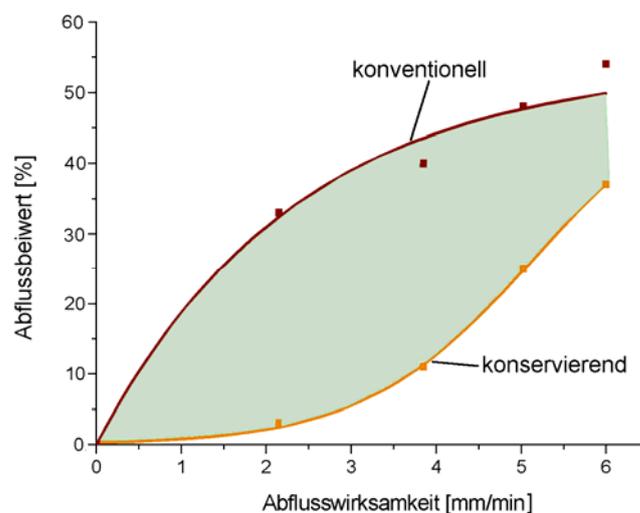


Abb. 45 Einfluss der Landnutzung auf den Abflussbeiwert in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit am Beispiel der konservierenden und konventionellen Bewirtschaftung, UG Klatschbach, mittlere Anfangsbodenfeuchte.

Einfluss der Simulationszeitpunkte

Der Einfluss des Simulationszeitpunktes auf den Abflussbeiwert ist beispielhaft für die Szenarien konventionell und konservierend für das UG Klatschbach bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte dargestellt. Um die Spannbreite der Unterschiede zu erfassen, wurden das Niederschlagsereignis mit der höchsten Jährlichkeit (100 jähriges Extremereignis) und das mit der geringsten Jährlichkeit (5 jähriges Ereignis) für den Vergleich herangezogen.

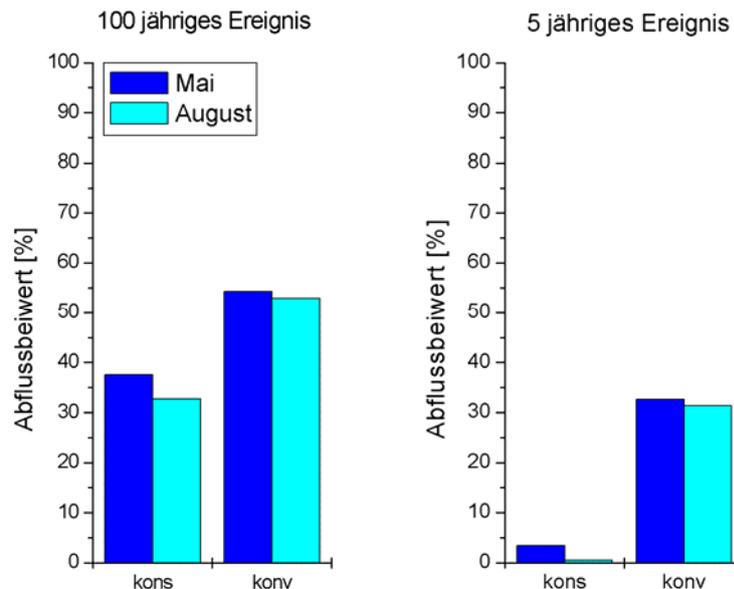


Abb. 46 Einfluss des Simulationszeitpunktes auf den Abflussbeiwert am Beispiel des 100- und des 5 jährigen Ereignisses im UG Klatschbach für die Szenarien konservierend (kons) und konventionell (konv) bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte.

Es zeigt sich, dass im Mai bei beiden Bewirtschaftungsmethoden geringfügig höhere Abflussbeiwerte berechnet wurden als im August. Dabei führt weniger die Jährlichkeit als die Art der Bewirtschaftung zu Unterschieden des Abflussbeiwertes zwischen den Simulationszeitpunkten (bei konservierender Bewirtschaftung 85 %, bei konventionellen Bewirtschaftung maximal 4 %). Ursache sind Unterschiede der Lagerungsdichte und der Skinfaktoren zwischen Mai und August, die zu Veränderungen der Speicherkapazität und dem k_f -Wert führen. Beispielsweise beträgt die Lagerungsdichte von Winterweizen (Ackerflächenanteil 44.8 %, s. Abb. 11) bei konservierender Bearbeitung im Mai 1460 kg/m^3 und im August 1480 kg/m^3 . Der Skinfaktor steigt von 11 (im Mai) auf 13 (im August).

Räumliche Verteilung der Abflussbildung

Im Folgenden soll der Frage nachgegangen werden, wie Bodenart und Landnutzung die Abflussbildung in ihrer räumlichen Verteilung beeinflussen. Abb. 47 zeigt beispielhaft die Verteilung des Niederschlagsüberschusses für das UG Oberreichenbach. Bei einheitlicher Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen als Grünland / Direktsaat lässt sich der Einfluss der Bodenarten (vgl. Abb. 48) deutlich erkennen. So liefern sandige Böden (in der Bodenkarte in

Grüntönen dargestellt) erwartungsgemäß geringere Niederschlagsüberschüsse als lehmige bzw. schluffige Böden (gelbe bis rötliche Farbtöne).

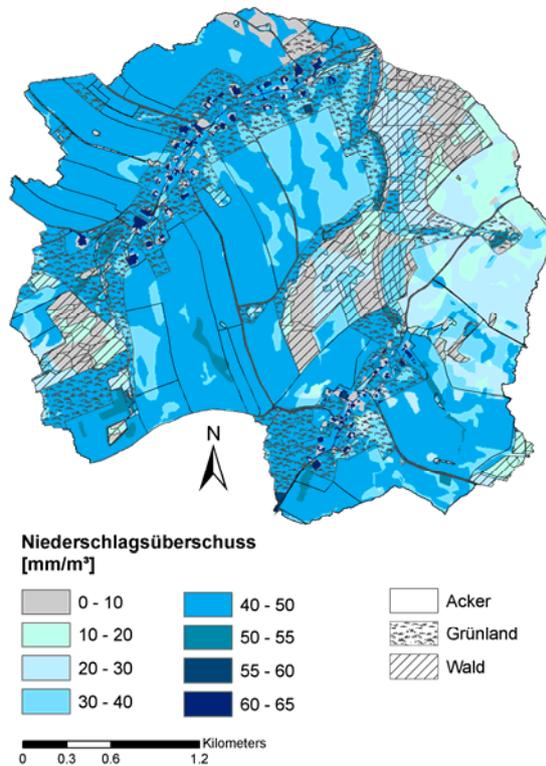


Abb. 47 Räumliche Verteilung der Niederschlagsüberschüsse im UG Oberreichenbach, Grünland / Direktsaat 50 jähriges Ereignis, mittlere Anfangsbodenfeuchte.

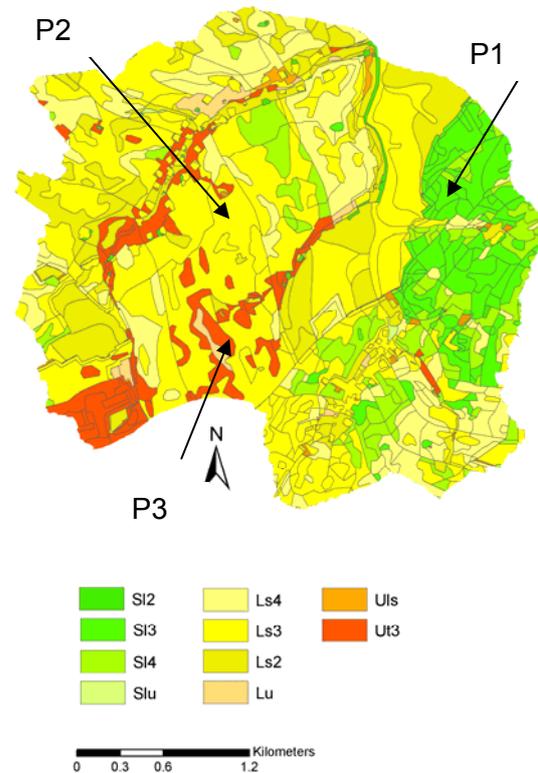


Abb. 48 Räumliche Verteilung der Bodenarten im UG Oberreichenbach mit den Standorten P1, P2 und P3.

Konkrete Werte des Niederschlagsüberschusses in Abhängigkeit von der Nutzung bei jeweils gleicher Bodenart zeigt Tab. 9 für die in der Bodenkarte (Abb. 48) eingezeichneten Standorte P1 bis P3 bezogen auf das 50 jährige Extremereignis bei hoher Anfangsbodenfeuchte.

Tab. 9 Einfluss der Bodenart auf den Niederschlagsüberschuss bei unterschiedlichen Nutzungen am Beispiel des 50 jährigen Extremereignisses (Abflusswirksamkeit 5.03 mm/min) und hoher Anfangsbodenfeuchte (UG Oberreichenbach)

Standort	Bodenart	Niederschlagsüberschuss in % des gefallen Niederschlages		
		Wald	Grünland / Direktsaat	konventionell
P1	SI3	14.4	37.8	52.2
P2	Ls3	28.8	55.8	62.9
P3	Ut3	39.6	62.9	97.1

Aus Tab. 9 geht hervor, dass die Bodenart die Abflussbildung eines Standortes entscheidend beeinflusst. Beispielsweise liefert Wald auf einem Schluffboden (Ut3) fast dreimal soviel

Abfluss wie auf einem sandigen Boden (Sl3). Acker zeigt hingegen auf einem Schluffboden etwa den 1.5 fachen Wert dessen, was er auf einem sandigen Boden liefert.

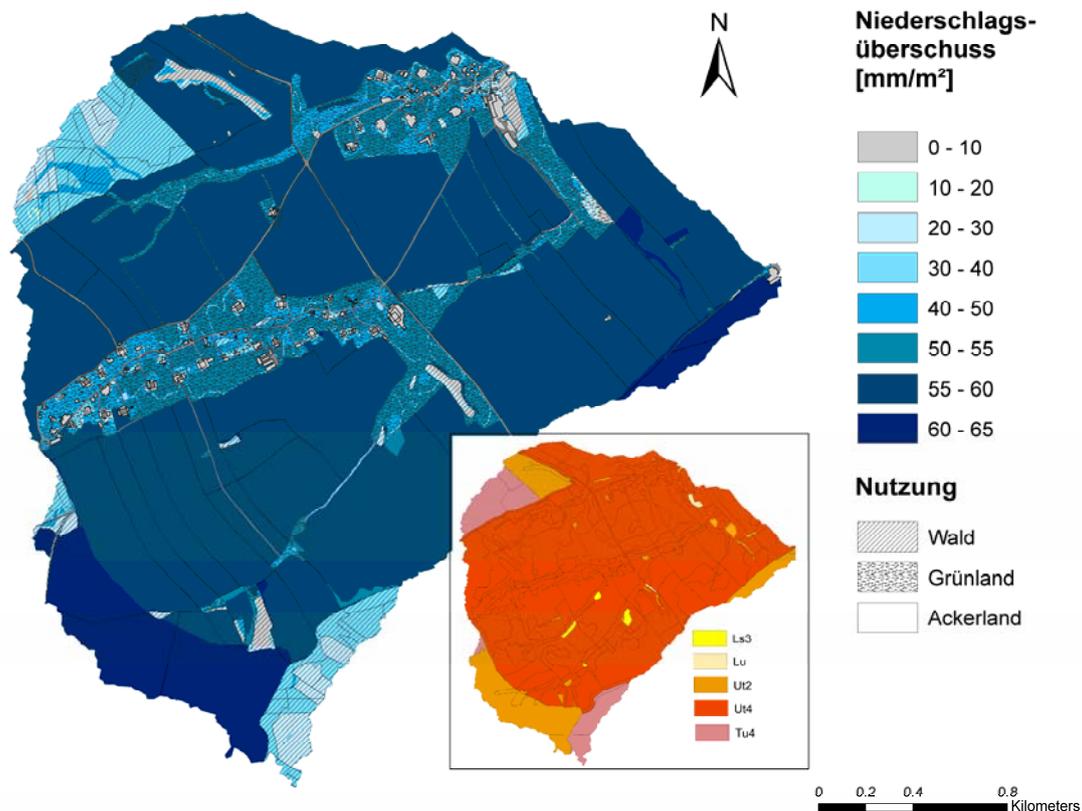


Abb. 49 Verteilung der Niederschlagsüberschüsse im UG Klatschbach, konventionelle Bewirtschaftung, Mai, hohe Anfangsbodenfeuchte unter Einbeziehung der Bodenkarte (verkleinerte Abbildung), 100 jähriges Extremereignis.

Für das UG Klatschbach sind die Einflüsse von Landnutzung und Bodenart in Abb. 49 dargestellt. Die geringsten Niederschlagsüberschüsse ergeben sich erwartungsgemäß für die Waldstandorte. Danach folgt Grünland / Direktsaat. Die höchsten Werte treten auf den Ackerflächen auf. Da das UG Klatschbach ein deutlich geringeres Bodenartenspektrum aufweist als das UG Oberreichenbach, sind die Unterschiede der Niederschlagsüberschüsse auf den Ackerflächen geringer. Es zeigt sich, dass auf den Flächen der Bodenart Ut2 höhere Abflüsse auftreten als auf Flächen der Bodenart Ut4. Die deutlich geringeren Niederschlagsüberschüsse auf den Tu4-Flächen begründen sich durch die dort befindlichen Wald-Standorte.

Abflusskonzentration

Der auf den Flächen entstehende Niederschlagsüberschuss kumuliert aufgrund des Reliefs in den Tiefenlinien (Abb. 50) und mündet schließlich im Vorfluter. Am Beispiel des Einzugsgebietes Klatschbach sind die kumulierten Abflüsse in ihrer räumlichen Verteilung, bezogen auf ein 100 jähriges Extremereignis dargestellt.

Um eine Vorstellung über die Größenordnung des Volumenstromes innerhalb der Tiefenlinien zu bekommen, ist dieser für den heraus vergrößerten Bereich (Abb. 50) angegeben. Mit dem Simulationsmodell EROSION 3D kann der Volumenstrom prinzipiell für jedes beliebige Rasterelement abgefragt werden.

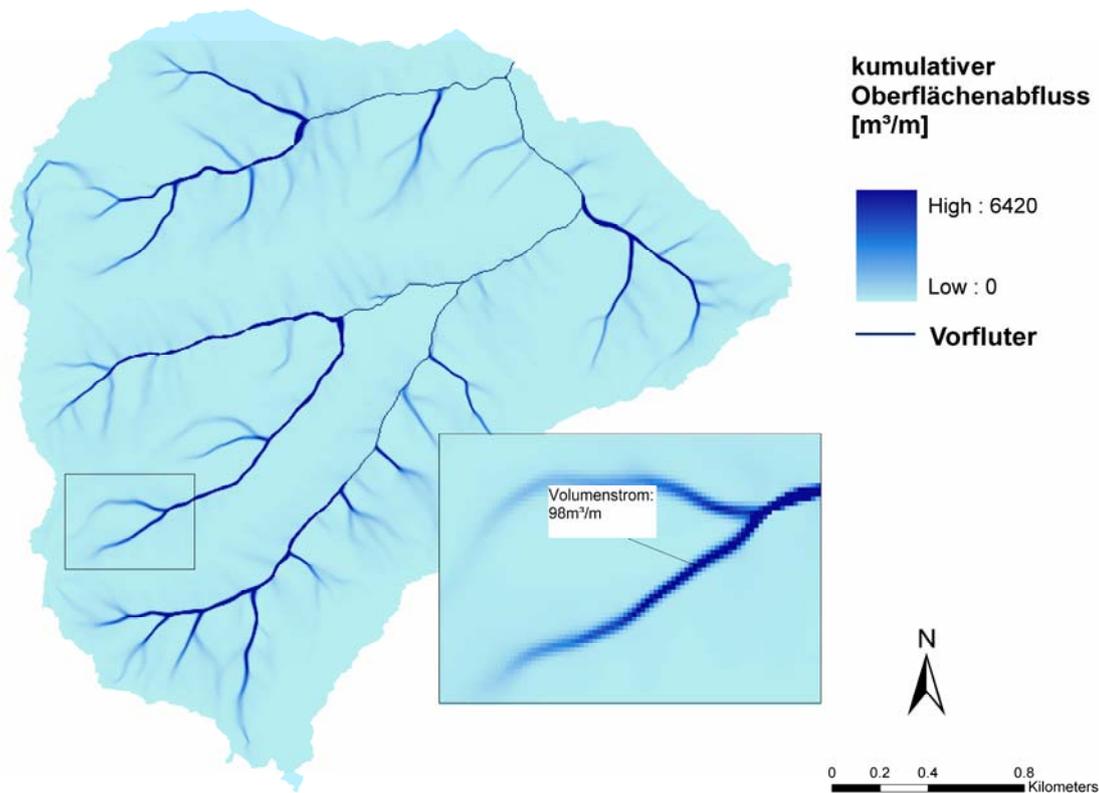


Abb. 50 Kumulierter Oberflächenabfluss im UG Klatschbach für das Szenario "konservierende Bewirtschaftung", 100 jähriges Ereignis, mittlere Anfangsbodenfeuchte.

6.2.1.2 Ergebnisse der Erosionsberechnungen

Analog zu den Ergebnissen der Abflussberechnung erfolgten die Erosionsberechnungen auf Grundlage der verschiedenen Szenarienkombinationen. Ziel ist es, die Erosionsgefährdung der beiden Untersuchungsgebiete zu bewerten. Aufgrund der Vielzahl der Ergebnisse beschränken sich die nachfolgenden Darstellungen auf die Ergebnisse des Simulationszeitpunktes Mai. Die kompletten Ergebnisse sind dem Anhang (Tab. 14 bis Tab. 21) zu entnehmen.

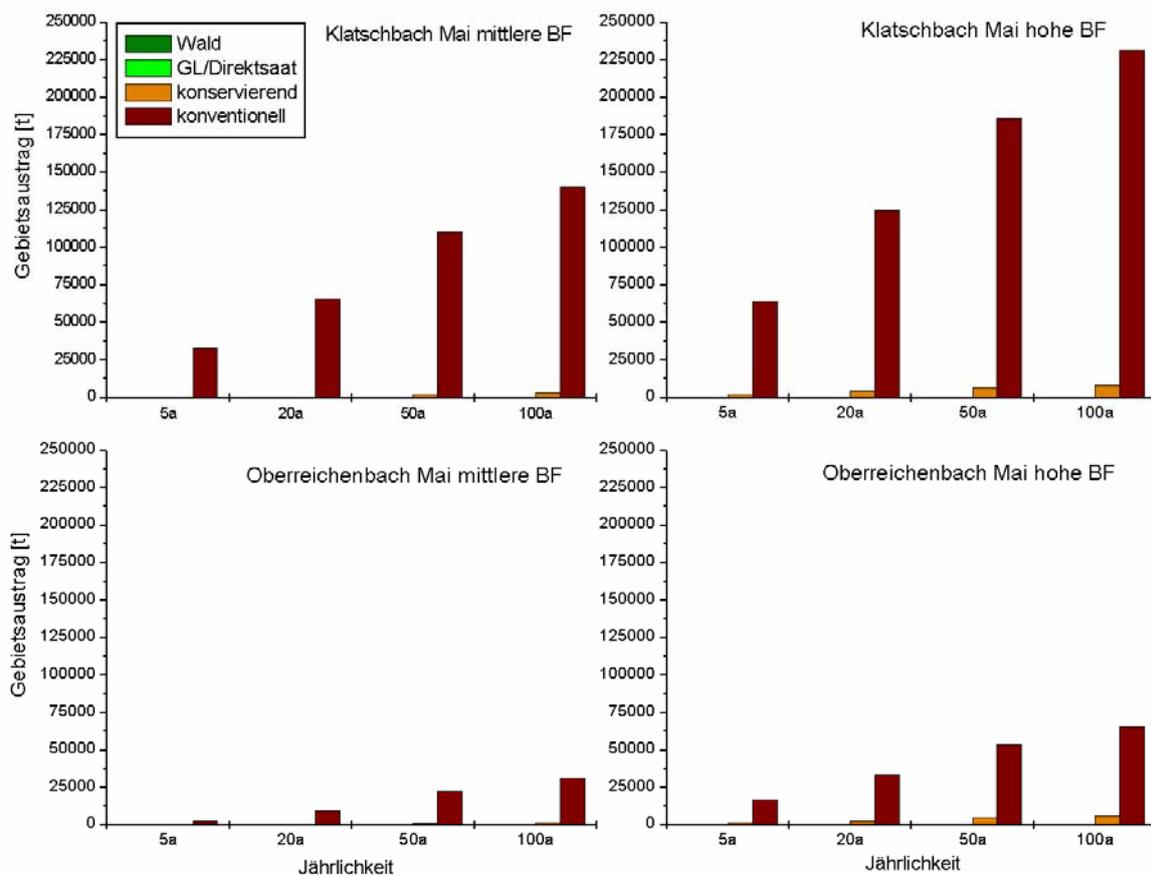


Abb. 51 Ergebnisse der Erosionsberechnungen für die UG's Klatschbach (oben) und Oberreichenbach (unten) bei Unterstellung mittlerer (links) und hoher Anfangsbodenfeuchte BF (rechts).

Abb. 51 zeigt den Gebietsaustrag beider Untersuchungsgebiete für mittlere und hohe Anfangsbodenfeuchte bei unterschiedlichen Jährlichkeiten des Starkregenereignisses. Daraus geht hervor, dass unter Wald und Grünland / Direktsaat fast kein Austrag erfolgt und dieser auch bei konservierender Bearbeitung sehr gering ist. Der erosive Sedimentaustrag ist damit im Wesentlichen ein Phänomen konventioneller Bewirtschaftung der Ackerflächen. Dabei steigt die ausgetragene Sedimentmenge erwartungsgemäß mit zunehmender Jährlichkeit des Ereignisses und zunehmender Anfangsbodenfeuchte an.

Das UG Klatschbach liefert um ein Mehrfaches höhere Gebietsausträge als das UG Oberreichenbach. Da Wald und Grünland / Direktsaat vernachlässigbar kleine Gebietsausträge liefern, beschränken sich die nachfolgenden Auswertungen auf die Szenarien konservierend und konventionell. In Abb. 52 sind für das UG Klatschbach die Bodenabträge für konventionelle und konservierende Bewirtschaftung (jeweils für hohe und mittlere Anfangsbodenfeuchte) gegen die Abflusswirksamkeit (s. Kapitel 5.5) aufgetragen. Abb. 53 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für das UG Oberreichenbach.

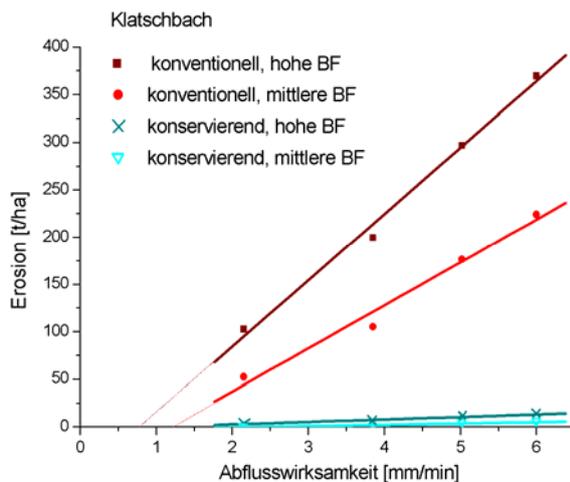


Abb. 52 Bodenabtrag in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit, UG Klatschbach, bei mittlerer und hoher Anfangsbodenfeuchte (BF).

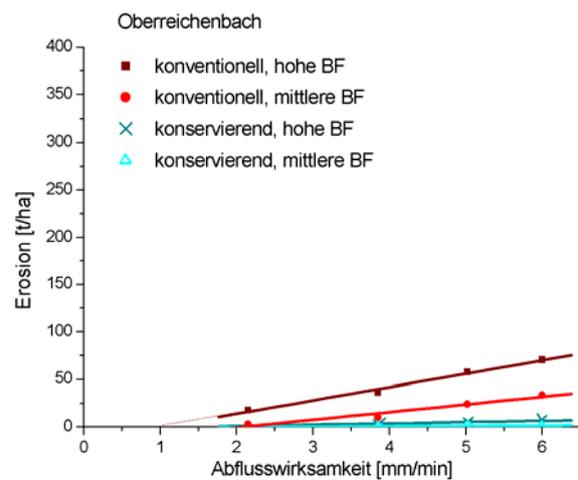


Abb. 53 Bodenabtrag in Abhängigkeit der Abflusswirksamkeit, UG Oberreichenbach, bei mittlerer und hoher Anfangsbodenfeuchte (BF).

Um Erosion auszulösen, bedarf es in Abhängigkeit von der Bewirtschaftungspraxis minimaler Abflusswirksamkeiten zwischen 0.8 und 2.0 mm/min, was im vorliegenden Fall Jährlichkeiten zwischen 2 und 5 Jahren entspricht. Aus den Schnittpunkten der Ausgleichsgeraden mit der x-Achse, lässt sich ableiten, wie hoch die Abflusswirksamkeit für das jeweilige Bewirtschaftungsszenario mindestens sein muss, um Bodenabtrag auszulösen. So wird im UG Klatschbach bei konventioneller Bodenbewirtschaftung und hoher Anfangsbodenfeuchte bereits bei Abflusswirksamkeiten von etwa 0.8 mm/min Erosion ausgelöst, während im UG Oberreichenbach dafür Abflusswirksamkeiten von etwa 1.0 mm/min notwendig sind. Dies entspricht den Erwartungen, da die Schluffböden im UG Klatschbach generell eine höhere Erosionsanfälligkeit zeigen, als die sandigeren Böden im UG Oberreichenbach. Bei konservierender Bewirtschaftung lösen erst Abflusswirksamkeiten ≥ 2 mm/min Erosion aus.

Weiter wird deutlich, dass im UG Klatschbach bei konventioneller Bewirtschaftung die Bodenabträge mit zunehmender Abflusswirksamkeit sehr viel stärker ansteigen als im UG Oberreichenbach. Bei konservierender Bewirtschaftung liegen die Erosionswerte beider UG in ähnlich geringer Größenordnung.

Räumliche Verteilung der Erosion

Nachdem die Erosionssituation der Gesamtuntersuchungsgebiete betrachtet wurde, soll im Folgenden auf die Verteilung von Erosion und Deposition innerhalb der Untersuchungsgebiete eingegangen werden.

Konventionelle Bewirtschaftung

Abb. 54 zeigt die Verhältnisse bei konventioneller Bewirtschaftung am Beispiel des UG Klatschbach. Gelbe bis rote Farben kennzeichnen Flächen, auf denen Erosion auftritt, grüne bis blaue Bereiche stellen Depositionsbereiche dar. Erwartungsgemäß zeigt sich, dass unter Wald und auf Grünlandstandorten die Erosion vernachlässigbar kleine Werte ($\leq 0.25 \text{ kg/m}^2$) annimmt, während auf den Ackerschlägen mit hohen bis extremen Abträgen ($> 25 \text{ kg/m}^2$) zu rechnen ist.

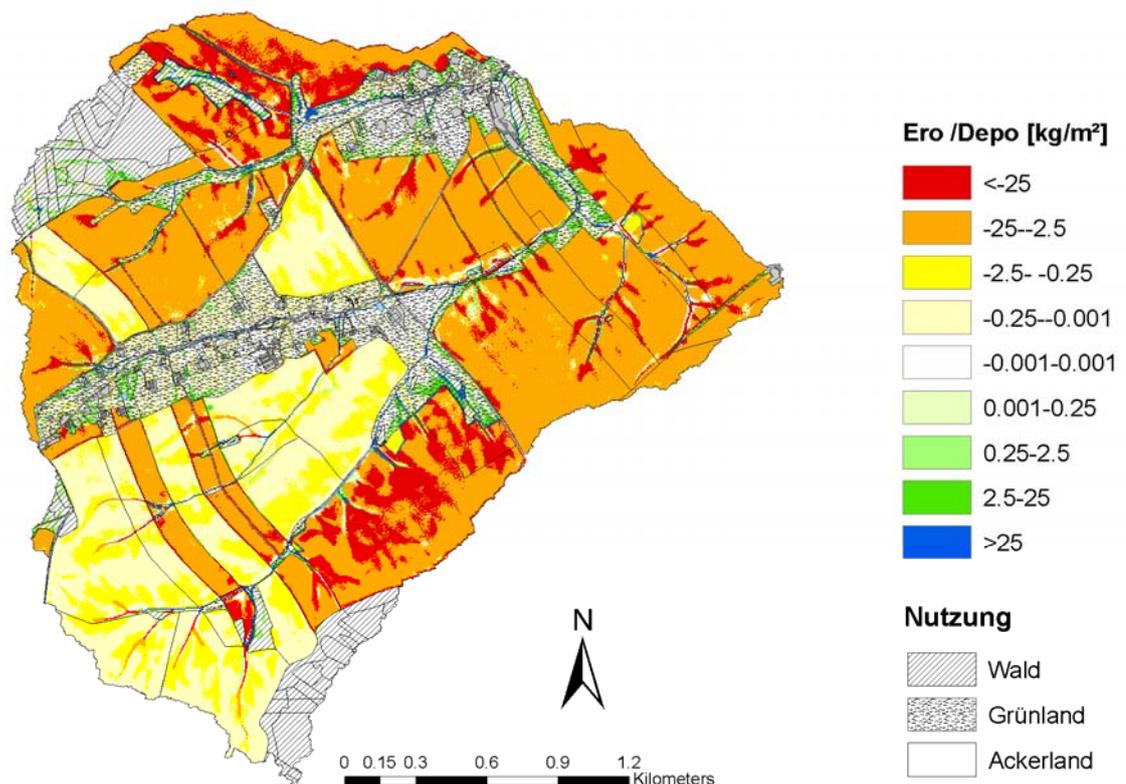


Abb. 54 Erosionsprognosekarte für konventionelle Bewirtschaftung, UG Klatschbach, 100 jähriges Ereignis, Mai, mittlere Anfangsbodenfeuchte.

Neben der ausgeprägten flächenhaften Erosion weist das UG Klatschbach deutliche Erosionsrinnen auf, welche sich infolge des kumulierenden Abflusses in den Tiefenlinien (s. Abb. 50) ergeben. Aufgrund der daraus resultierenden enormen Abtrags- und Transportwirkung des Wassers treten in diesen Rinnen die höchsten Bodenabträge ($> 25 \text{ kg/m}^2$) auf.

Depositionsbereiche befinden sich hingegen dort, wo der Oberflächenabfluss durch Nutzungswechsel oder abnehmendes Gefälle gebremst wird, wodurch sich dessen Geschwindigkeit und damit dessen Transportkapazität herabsetzen. Dies ist insbesondere an Übergängen von Acker zu Wald bzw. von Acker zu Grünland der Fall.

Abgesehen davon, dass nahezu das gesamte UG Klatschbach wegen des hohen Ackerflächenanteils in starkem Maße der Erosion ausgesetzt ist, stellt der Südosten des UG's den am stärksten betroffenen Teil dar. Hinzu kommt, dass der überwiegende Teil der Sedimente mit dem Oberflächenabfluss in den Vorfluter gelangt, da es an einem ausreichend breiten Pufferstreifen fehlt. Abb. 56 zeigt im Gegensatz dazu, wie durch einen breiten Pufferstreifen ein deutlicher Beitrag zur Minderung des Sedimenteintrages ins Gewässernetz geleistet werden kann. Hier kommt fast das gesamte mit dem Oberflächenabfluss transportierte Sediment zur Deposition (s. grüne Flächen entlang des Vorfluters in Abb. 56). Das dargestellte Beispiel stammt aus dem nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes.

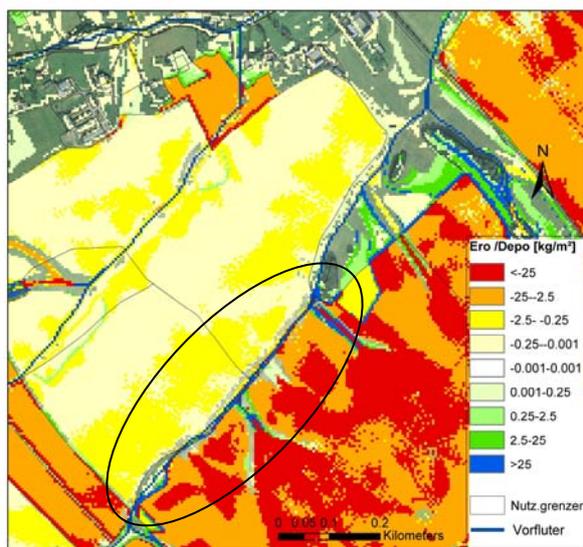


Abb. 55 Fehlender Pufferstreifen im Süden des UG Klatschbach, direkter Sedimenteintrag in den Vorfluter.

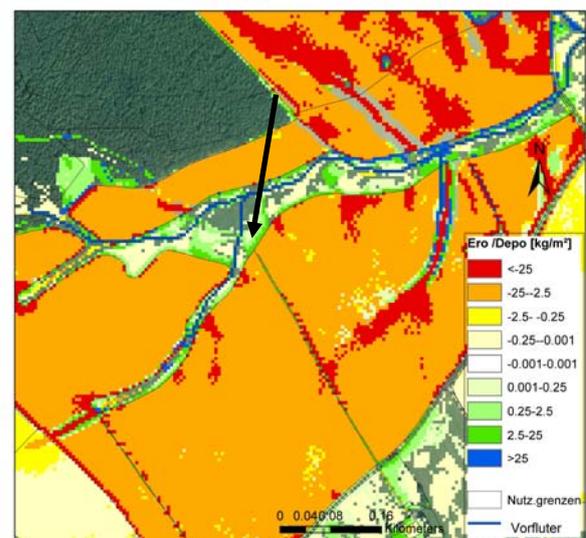


Abb. 56 Wirkung des Pufferstreifens im Norden des UG Klatschbach. Der schwarze Pfeil kennzeichnet die Depositionsflächen.

Konservierende Bewirtschaftung

In Abb. 57 ist korrespondierend zu Abb. 54 die Erosionskarte für konservierende Bewirtschaftung dargestellt. Aus dem Vergleich geht hervor, dass eine Umstellung auf konservierende Bewirtschaftung zu einer deutlichen Reduzierung der Erosion führt. Während bei konventioneller Bewirtschaftung (Abb. 54) flächenhafte Abträge von mehr als 25 t/ha auftreten, ergeben sich bei konservierender Bewirtschaftung (Abb. 57) maximal 2.5 t/ha.

Diese Unterschiede ergeben sich aufgrund des zusätzlichen Bedeckungsgrades der Mulchauflage bei konservierender Bewirtschaftung.

Am Beispiel der konservierenden Bewirtschaftung sind anhand von Abb. 57 und Abb. 58 die räumlichen Verteilungsmuster der Erosion für die Simulationszeitpunkte Mai und August vergleichend gegenübergestellt. Wie der Vergleich zeigt, liefern die Rapsflächen im Mai geringere Bodenabträge als im August. Die Mais- und Kartoffelflächen verhalten sich hingegen genau umgekehrt. Die mit Winterweizen und Sommergerste bestellten Felder zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Simulationszeitpunkten.

Der Einfluss des Simulationszeitpunktes ergibt sich demnach aus dem Bedeckungsgrad der Fruchtart, da mit wachsender Bedeckung die Abtragswirkung des fließenden Wassers aufgrund der erhöhten Rauigkeit der Bodenoberfläche abnimmt. Darüber hinaus reduzieren das Blattwerk der Pflanzen sowie die Mulchauflage, die Erosionswirkung der Tropfen. Im vorliegenden Beispiel bedeckt Raps im Mai (Abb. 57) den Boden zu 100 %, während er im August (Abb. 58) bereits abgeerntet ist und bei konservierender Bewirtschaftung lediglich eine Mulchauflage mit einem unterstellten Bedeckungsgrad von 30 % an der Oberfläche des Bodens zurückbleibt. Bei Mais und Kartoffeln nimmt hingegen der Bedeckungsgrad von Mai (32 %) bis August (100 %) deutlich zu. Die geringen Unterschiede bei Getreide lassen sich damit begründen, dass schon im Mai ein Bedeckungsgrad > 60 % erreicht wird (30 % davon Mulch) und die Erosion somit deutlich vermindert wird. Die Bedeckungsgrade der einzelnen Fruchtarten bezogen auf die Simulationszeitpunkte Mai und August sind in Anhang (Tab. 11) aufgelistet.

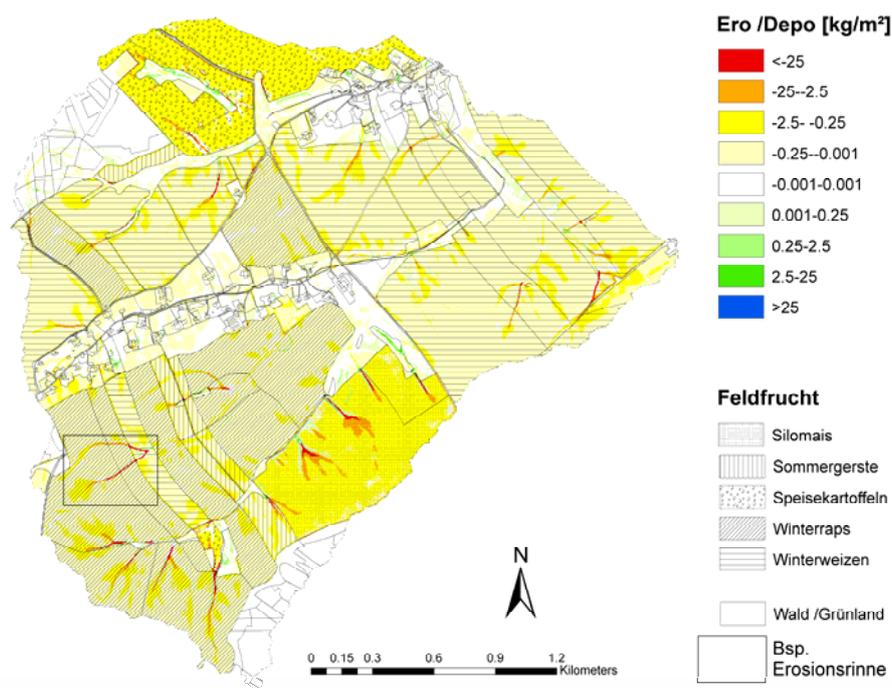


Abb. 57 Einfluss der Fruchtart im UG Klatschbach, Simulationszeitpunkt Mai, konservierende Bewirtschaftung, 100 jähriges Ereignis, mittlere Anfangsbodenfeuchte.

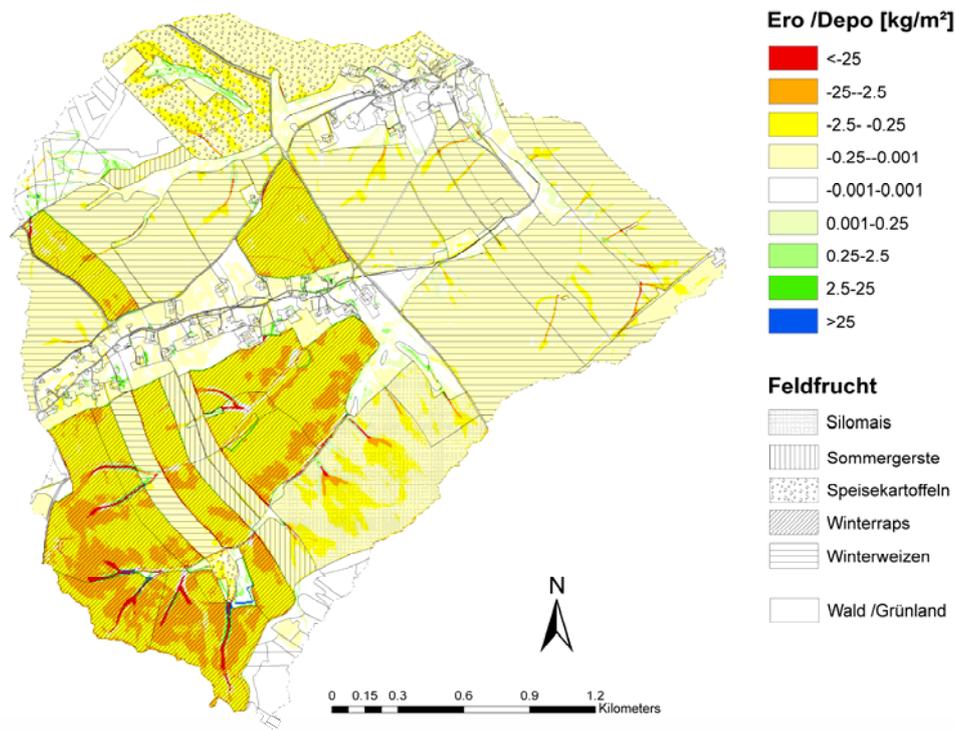


Abb. 58 Einfluss der Fruchtart im UG Klatschbach, Simulationszeitpunkt August, konservierende Bewirtschaftung, 100 jähriges Ereignis, mittlere Anfangsbodenfeuchte.

Bei Einzelschlag-bezogener Betrachtung sind die Bedeckungsgrade im Mai und August im vorliegenden Fall unterschiedlich. Allerdings gleichen sich diese Unterschiede bei Betrachtung der Gesamteinzugsgebiete wieder weitgehend aus. Deshalb zeigen die unterschiedlichen Simulationszeitpunkte bezogen auf den Gesamtaustrag nur geringe Unterschiede (Abb. 59).

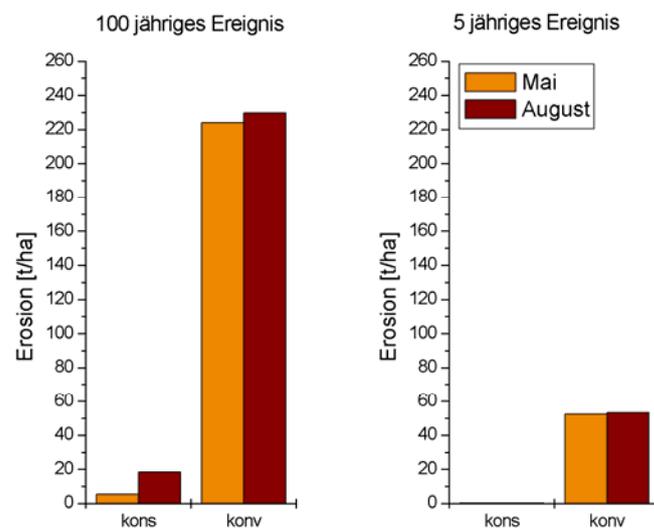


Abb. 59 Einfluss des Simulationszeitpunktes auf den Bodenabtrag bezogen auf das Gesamteinzugsgebiet am Beispiel des 100- und des 5 jährigen Ereignisses im UG Klatschbach für die Szenarien konservierend (kons) und konventionell (konv) bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte.

Trotz einer Umstellung der Bewirtschaftung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung, treten noch immer flächenhafte Bodenabträge zwischen 0.25 und 25 kg/m² auf. Die Betrachtung der räumlichen Verteilung zeigt ferner, dass insbesondere in den Tiefenlinien trotz konservierender Bodenbearbeitung noch erhebliche Bodenabträge auftreten (vgl. markierter Bereich in Abb. 57).

Beispielhaft ist in Abb. 60 ein durch lineare Erosion gekennzeichneter Bereich vergrößert dargestellt. Korrespondierend zum Volumenstrom von 98 m³/m (Abb. 50) werden bezogen auf das 100 jährige Extremereignis an der durch den Pfeil gekennzeichneten Stelle rund 2400 kg/m Sediment durch den Querschnitt der Erosionsrinne transportiert.

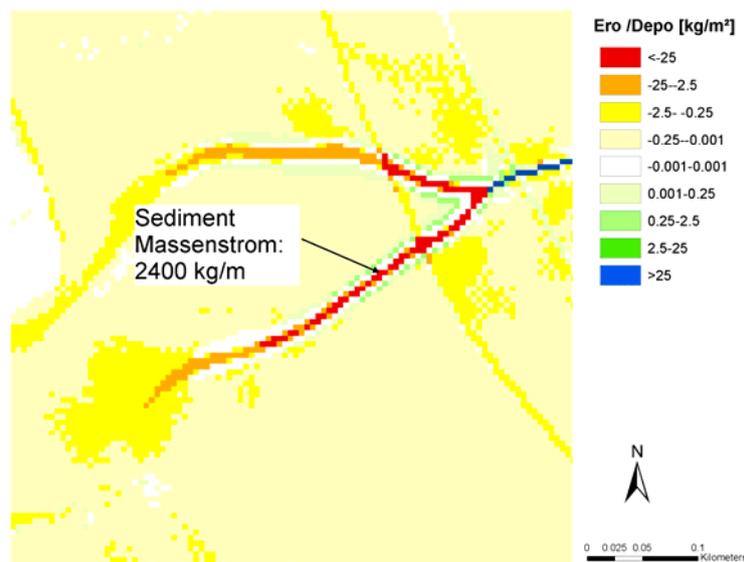


Abb. 60 Sediment-Massenstrom in einer Erosionsrinne (Ausschnitt s. Abb. 57) am Beispiel des Szenarios konservierend 100 jähriges Ereignis, mittlere Feuchte, UG Klatschbach, Mai.

Diese Betrachtung verdeutlicht, dass auch bei konservierender Bewirtschaftung zusätzliche Erosionsschutzmaßnahmen notwendig sind, um den Sedimenteintrag in den Vorfluter weiter zu reduzieren. In diesem Falle bieten sich „begrünte Tiefenlinien“ oder Gehölzstreifen an. Allerdings ist eine sorgfältige Dimensionierung notwendig, da es im Falle einer fehlerhaften Bemessung zu erheblichen randlichen Erosionserscheinungen kommen kann. Bei einer zu reichlichen Bemessungen gehen dagegen wertvolle Ackerflächen ohne zusätzlichen Schutzeffekt verloren. Das verwendete Modell EROSION 3D ist ein geeignetes Planungsinstrument, um Dimensionierungen dieser Art vorzunehmen.

Grünland / Direktsaat und Wald

Werden die Ackerflächen im UG Klatschbach flächendeckend in Grünland oder in Direktsaatflächen umgewandelt, treten selbst beim 100 jährigen Extremereignis fast keine Bodenabträge mehr auf (Abb. 61). Selbst auf den bei konventioneller Bewirtschaftung (Abb. 54) am stärksten betroffenen Bereichen im Südosten des Untersuchungsgebietes liegen die

Erosionsbeträge nun unter 0.25 kg/m^2 . In der zuvor betrachteten Tiefenlinie (Abb. 60) ergeben sich jetzt nur noch Abträge von etwa 2.5 kg/m^2 .

Im Vergleich zur konservierenden Bewirtschaftung zeigt sich, dass bei weiter reduzierter Bodenbearbeitungsintensität (Grünland / Direktsaat) die Erosion noch einmal deutlich verringert werden kann, so dass zusätzliche passive Erosionsschutzmaßnahmen (z.B. Begrünung von Tiefenlinien) nicht mehr erforderlich sind. Unter Wald findet kein nennenswerter Bodenabtrag statt.

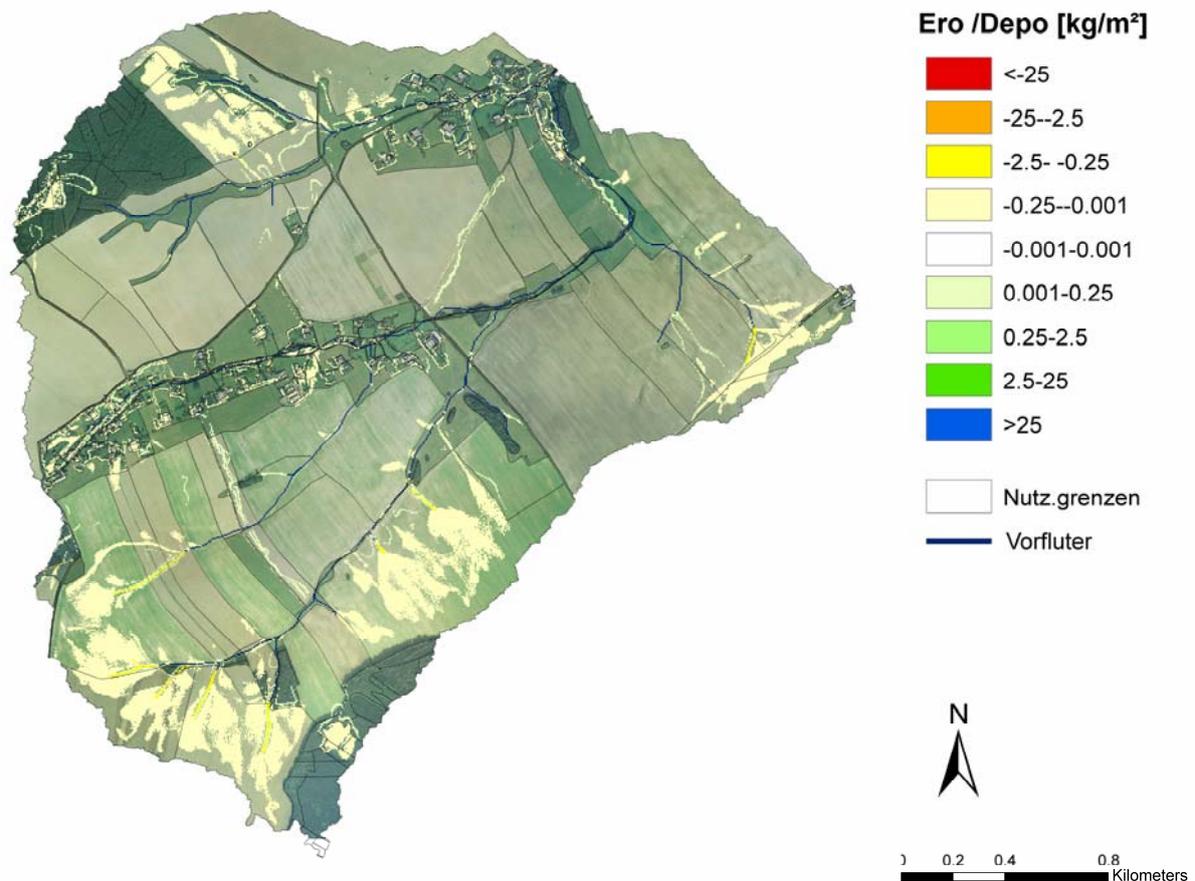


Abb. 61 Erosionsprognosekarte Grünland / Direktsaat 100 jähriges Ereignis, mittlere Anfangsbodenfeuchte.

Bewertung der Erosionsschutzmaßnahmen

Sowohl die gebietsbezogenen Betrachtungen als auch die Darstellung der Erosion innerhalb des Untersuchungsgebietes haben das Potenzial einer Bewirtschaftungsumstellung in Bezug auf den Erosionsschutz verdeutlicht. In Abb. 62 sind für das UG Klatschbach (100 jähriges Ereignis, hohe Anfangsbodenfeuchte) konkrete Zahlen genannt. So reduziert sich der Bodenabtrag bei einer Umstellung der Bodenbearbeitung von konventionell auf konservierend bereits um über 96.5 %. Bei Umstellung auf Grünland / Direktsaat sogar um 99.8 %. Unter Wald findet fast kein Bodenabtrag mehr statt.

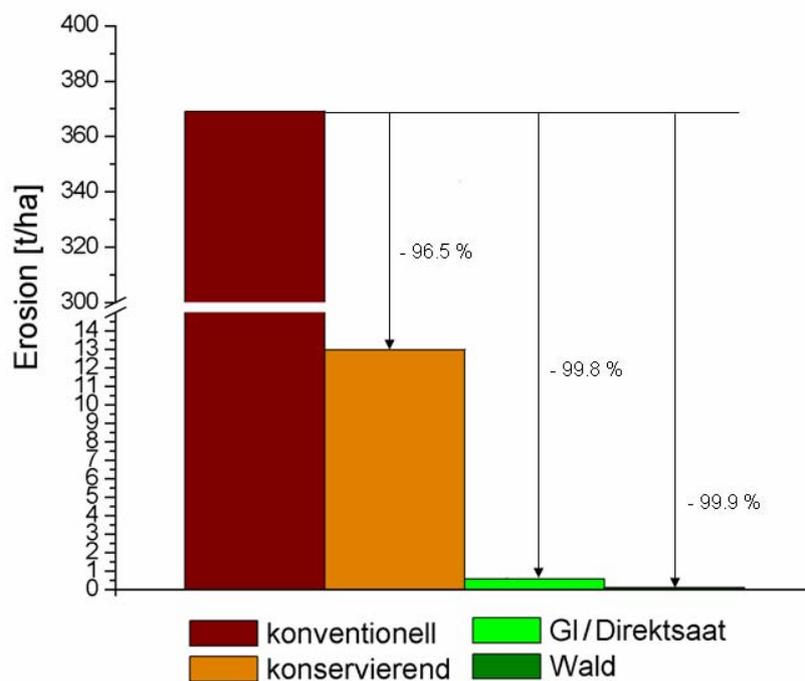


Abb. 62 Reduzierung der Bodenerosion durch Umstellung der Bodenbearbeitung bzw. durch Landnutzungsänderungen am Beispiel des UG Klatschbach, 100 jähriges Extremereignis, hohe Anfangsbodenfeuchte.

6.2.2 Reales Ereignis 2002

Die vorangegangenen Untersuchungen bezogen sich jeweils auf statistische Starkregenereignisse. Im Folgenden soll das Modell nun auf einen realen Starkregen angewendet werden. Hierfür wird das reale Ereignis vom 11.-13. August 2002 (Station Talsperre Saidenbach, Niederschlagsmenge 190 mm in 2 Tagen) herangezogen. Diese Niederschlagsstation wurde ausgewählt, da sie sich ebenfalls in Subregion 7 befindet und die geforderte hohe Auflösung der Niederschlagsdaten liefert. Dabei ist zu bemerken, dass an der Station „Talsperre Saidenbach“ mit 190 mm bei weitem nicht die Niederschlagsmengen gemessen wurden, wie beispielsweise auf den Kammlagen des Erzgebirges (Zinnwald Georgenfeld 406 mm).

Unter Verwendung des in Kapitel 5.5 erläuterten Verfahrens zur Bestimmung der Abflusswirksamkeit ergibt sich für das reale Ereignis 2002 eine Abflusswirksamkeit von 4.7 mm/min. Die Abflusswirksamkeit des realen Ereignisses liegt damit in ähnlicher Größenordnung wie das statistische Starkregenereignis 50 jähriger Wiederkehrzeit. Allerdings steigt die Abflusswirksamkeit ab etwa 50 jähriger Wiederkehrwahrscheinlichkeit nur noch geringfügig an (vgl. Kapitel 5.5), so dass auch ein Wiederkehrintervall von 100 Jahren (gemäß SLfUG 2004) möglich erscheint.

6.2.2.1 Abflussberechnungen

Die Ergebnisse der Abflussberechnungen für das reale Ereignis 2002 sind in Abb. 63 und Abb. 64 als kumulative Abflüsse in Abhängigkeit von der Nutzung aufgetragen. Außerdem ist der kumulative Gebietsniederschlag angegeben. Auf diese Weise kann die Entwicklung der Abflüsse in unmittelbarem Bezug zum Niederschlagsverlauf betrachtet werden. Abb. 63 bezieht sich auf das UG Klatschbach, Abb. 64 auf das UG Oberreichenbach. Die nutzungsabhängig angegebenen Abflussbeiwerte ergeben sich aus den aufsummierten Abflüssen und dem Gesamtniederschlag.

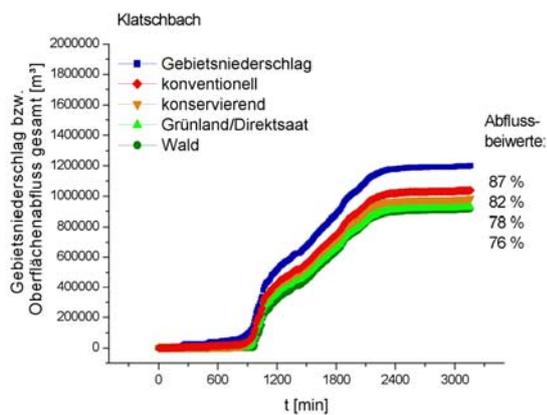


Abb. 63 Kumulierter Oberflächenabfluss im Vergleich zum Gebietsniederschlag unter Angabe der Abflussbeiwerte für das UG Klatschbach.

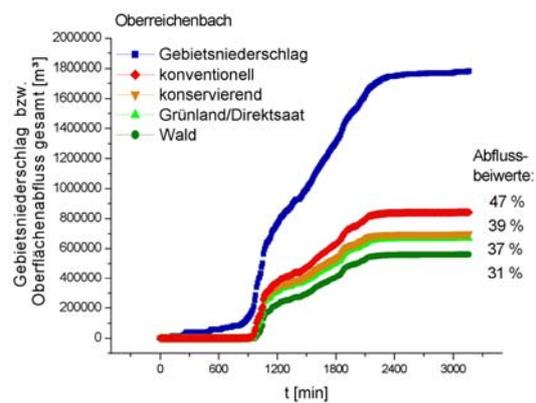


Abb. 64 Kumulierter Oberflächenabfluss im Vergleich zum Gebietsniederschlag unter Angabe der Abflussbeiwerte für das UG Oberreichenbach.

Erwartungsgemäß finden sich die analog zu den für die statistischen Starkregenereignisse festgestellten nutzungsbezogenen Abhängigkeiten in den für das reale Ereignis 2002 berechneten Ergebnissen wieder (s. Kapitel 6.2.1). So liefert Wald in beiden Untersuchungsgebieten deutlich geringere Abflüsse als Grünland / Direktsaat und dies wiederum geringere Abflüsse als konservierende bzw. konventionelle Bearbeitung. Die Unterschiede zwischen den Landnutzungen sind im UG Klatschbach kleiner als im UG Oberreichenbach. Das UG Klatschbach liefert auch bei dieser Simulation deutlich höhere Abflussbeiwerte als das UG Oberreichenbach. Im UG Klatschbach fließen bei sämtlichen Nutzungen mehr als 75 % des gefallenem Niederschlages als Oberflächenabfluss ab. Im UG

Oberreichenbach sind es lediglich 31 % (bei Wald) und 47 % (bei konventionelle Bewirtschaftung). Dies lässt sich, wie in Kapitel 6.2.1 bereits ausführlich diskutiert, auf die unterschiedlichen Bodenarten der Untersuchungsgebiete zurückführen.

Die Abflussbeiwerte, die für das UG Klatschbach berechnet wurden, stimmen gut mit Angaben des *SLFUG (2004)* überein, wonach aufgrund der hohen Vorsättigung der Böden in weiten Teilen Sachsens 60 – 90 % des Niederschlages oberflächlich abfließen. Die berechneten Werte für das UG Klatschbach liegen demnach in einer plausiblen Größenordnung.

Abb. 65 veranschaulicht den Einfluss der Nutzung anhand der Abflussganglinien. Zur besseren Übersichtlichkeit sind nur die Varianten „konventionelle Bewirtschaftung“ und „Wald“ für das UG Oberreichenbach dargestellt. Abb. 65 zeigt außerdem den Niederschlagsverlauf in 10 min-Intervallen. Der Abfluss unter Wald setzt demnach deutlich später ein als bei konventioneller Ackernutzung. Im weiteren Niederschlagsgeschehen verlaufen die Abflussganglinien von Wald und konventioneller Bewirtschaftung dann annähernd parallel, wobei der Abfluss unter Wald etwas kleiner ist gegenüber dem Abfluss der konventioneller Bewirtschaftung.

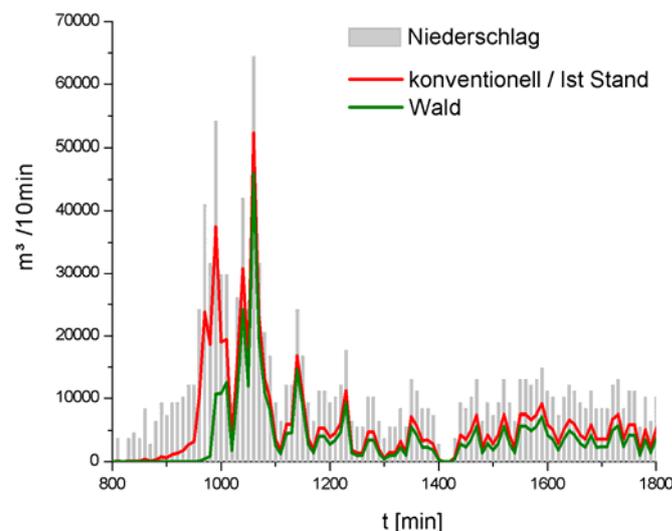


Abb. 65 Verlauf der Oberflächenabfluss- Ganglinien für die Szenarien „Konventionell“ und „Wald“ im Vergleich zur gefallenen Gebietsniederschlagsmenge (Ausschnitt des Hochwasser ereignisses 2002, Station Talsperre Saidenbach) UG Oberreichenbach.

Die Ergebnisse entsprechen der allgemeinen Beobachtung (z.B. *WAHREN ET AL. 2007*), dass insbesondere zu Ereignisbeginn unter Wald deutlich höhere Niederschlagsmengen abgepuffert werden können als auf Ackerflächen. Ursache hierfür ist vor allem die niedrigere Lagerungsdichte der Waldböden im A-Horizont, so dass ein größeres Speichervolumen für Wasser zur Verfügung steht. Nachdem dieses jedoch aufgefüllt ist, ist die Infiltration nur noch eine Funktion des k_f -Wertes des Unterbodens, welcher unter Wald infolge ausgeprägter kontinuierlicher Makroporen höher angenommen wird als unter konventionell

bewirtschafteten Ackerflächen. Die Einflüsse der Landnutzung auf den Abfluss sind daher zu Niederschlagsbeginn groß, nehmen dann aber mit zunehmender Niederschlagsdauer deutlich ab.

Vergleich mit den Ergebnissen der statistischen Niederschlagsereignisse

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Ergebnisse der statistischen Starkregenereignisse (5-100 jähriges Extremereignis) mit dem realen Ereignis 2002 sowohl für das UG Klatschbach (Abb. 66) als auch für das UG Oberreichenbach (Abb. 67) verglichen.

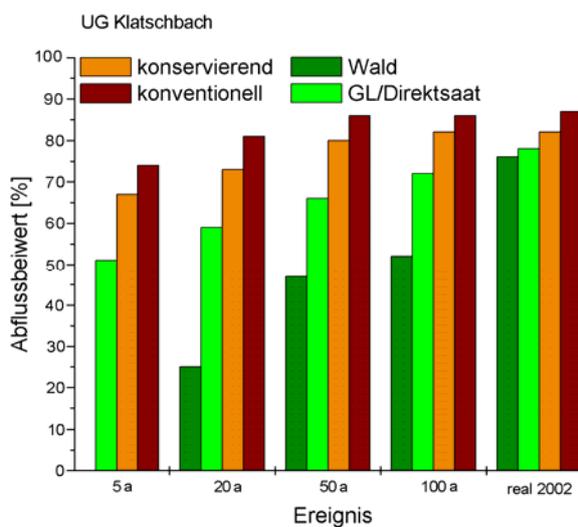


Abb. 66 Vergleich der Abflussbeiwerte des realen Ereignisses 2002 mit denen der statistischen Extremereignisse in Abhängigkeit der Nutzung für das UG Klatschbach.

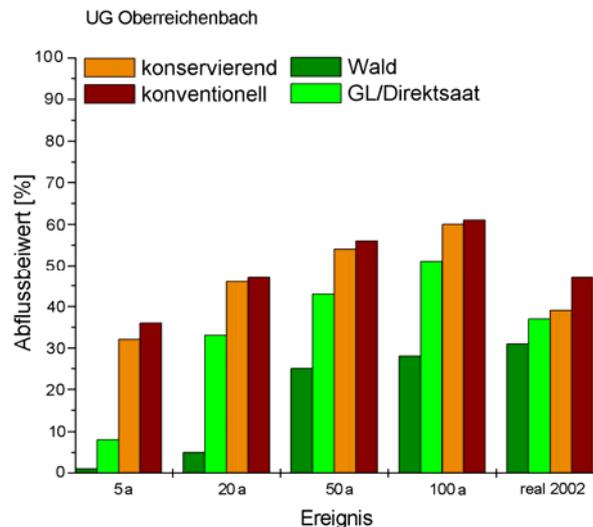


Abb. 67 Vergleich der Abflussbeiwerte des realen Ereignisses 2002 mit denen der statistischen Extremereignisse in Abhängigkeit der Nutzung für das UG Oberreichenbach.

Es wird deutlich, dass die Einflüsse der Landnutzung im Falle des realen Ereignisses 2002 deutlich weniger ausgeprägt sind als bei den statistischen Starkregenereignissen. Dies ist auf die deutlich größere Niederschlagsdauer und -menge des realen Ereignisses im Vergleich zu den statistischen Ereignissen zurückzuführen. Ein Vergleich der Abflussbeiwerte zeigt im übrigen, dass sich im UG Klatschbach die Beiwerte des realen und des 50 jährigen Ereignisses mit Bezug auf das Szenario konventionelle Bewirtschaftung kaum unterscheiden. Im UG Oberreichenbach ordnet sich das reale Ereignis zwischen dem 20 und dem 50 jährigen Extremereignis ein. Auch hinsichtlich der berechneten Abflusswirksamkeit von 4.7 mm/min (das 50 jährige Ereignis entspricht einer Abflusswirksamkeit von 5 mm/min) ordnet sich das reale Ereignis in der durch die Modellergebnisse gestützten Bandbreite ein. Die Ergebnisse sind somit konsistent.

6.2.2.2 Erosionsberechnungen

Die berechneten Gebietsausträge für das reale Hochwasserereignis 2002 zeigt Abb. 68. Dabei wurden ausschließlich die auf die Bewirtschaftungspraxis bezogenen Ergebnisse herangezogen, da die Szenarien Grünland / Direktsaat und Wald nur geringfügige Erosionswerte unter 1 t/ha lieferten. Im UG Klatschbach ist der Gebietsaustrag beider Bewirtschaftungsvarianten um ein Mehrfaches höher als im UG Oberreichenbach. Dabei liegt der Gebietsaustrag der konventionellen Variante im UG Oberreichenbach in ähnlicher Größenordnung wie bei der konservierenden Bewirtschaftung im UG Klatschbach.

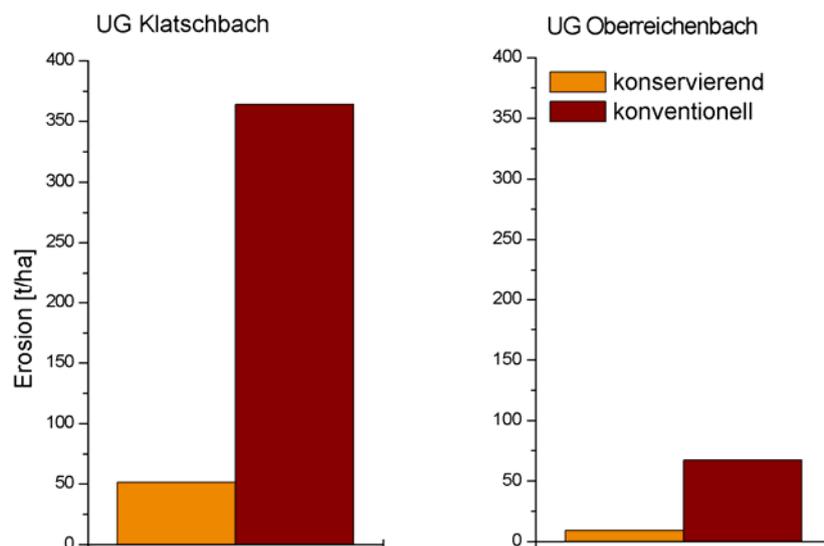


Abb. 68 Ergebnisse der Erosionsberechnungen für das reale Hochwasserereignis 2002 in Abhängigkeit der Bewirtschaftungsweise für das UG Klatschbach (links) und das UG Oberreichenbach (rechts).

Im Vergleich zu den statistischen Ereignissen liegen die berechneten Bodenabträge des UG's Klatschbach in der Größenordnung des 100 jährigen Extremereignisses. Für das UG Oberreichenbach ordnen sich die Werte des realen Ereignisses zwischen dem 50 jährigem und dem 100 jährigen Extremereignis ein und befinden sich damit in einem plausiblen Bereich.

6.2.3 Vergleich der Ergebnisse zwischen Ein-Schicht und Mehr-Schichten-Ansatz von EROSION 3D

Im folgenden Kapitel werden die Simulationsergebnisse der in dieser Arbeit erstmals eingesetzten Mehr-Schichten-Version des Modells EROSION 3D den Vergleichsrechnungen der vorausgegangenen Ein-Schicht-Version gegenübergestellt.

In der Ein-Schicht-Version des Modells gelten die auf den Oberboden bezogenen Parameter, auch wenn die Befeuchtungsfront über den Gültigkeitsbereich der Parameter weiter in die Tiefe vordringt. Dies kann bei lang anhaltenden Niederschlägen zu einer erheblichen Überschätzung der Wasseraufnahmefähigkeit der Böden führen, wenn das Wasserspeichervermögen und die Wasserleitfähigkeit im Oberboden deutlich größer sind als im Unterboden. Dies wiederum bewirkt gegenüber der Mehr-Schichten-Version höhere Bodenabträge.

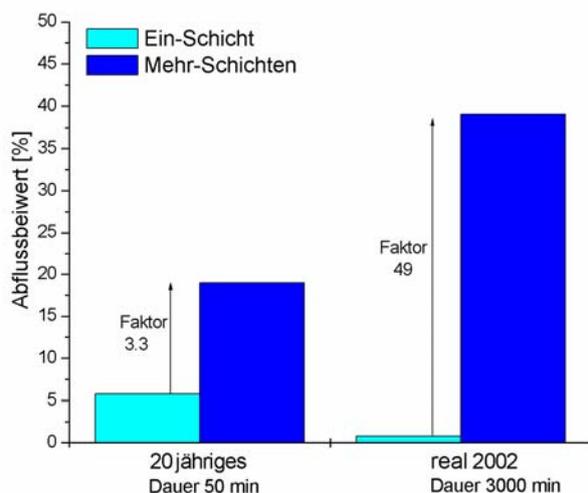


Abb. 69 Vergleich der Abflussbeiwerte des 20-jährigen und des realen Ereignisses 2002 bei Anwendung des Ein-Schicht- und des Mehr-Schichten-Ansatzes von EROSION 3D für UG Oberreichenbach, konservierende Bewirtschaftung.

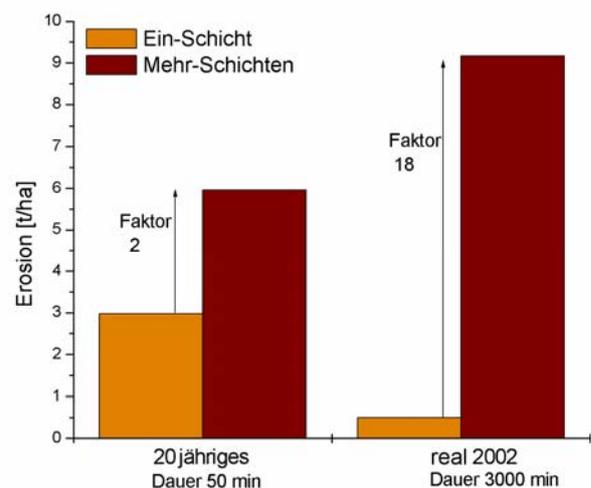


Abb. 70 Vergleich der Bodenabträge des 20-jährigen und des realen Ereignisses 2002 bei Anwendung des Ein-Schicht- und des Mehr-Schichten-Ansatzes von EROSION 3D für UG Oberreichenbach, konservierende Bewirtschaftung.

Die Ein-Schicht-Version des Modells berechnet einen deutlich geringeren Abflussanteil als die Mehr-Schichten-Version (Abb. 69) sowie einen geringeren Bodenabtrag (Abb. 70). Der Vergleich des 20-jährigen Starkregenereignisses (Niederschlagsdauer 50 min) mit dem realen Ereignis 2002 (Dauer von 3000 min) zeigt am Beispiel UG Oberreichenbach (konservierende Bewirtschaftung), dass die Unterschiede zwischen den Berechnungsergebnissen wie erwartet mit zunehmender Niederschlagsdauer größer werden.

Abb. 70 zeigt die analogen Ergebnisse für die Erosion. Hier ergeben sich für das 20 jährige Ereignis ebenfalls deutlich geringere Unterschiede als beim realen Ereignis 2002. Bei der Erosion sind die Unterschiede zwischen den Modellvarianten jedoch erwartungsgemäß nicht so drastisch wie beim Abfluss. Beim 20 jährigen Ereignis verdoppelt sich der Bodenaustrag für das gewählte Szenario gegenüber der Ein-Schicht Variante, beim realen Ereignis 2002 steigt dieser um den Faktor 18.

Der Vergleich der beiden Ansätze zeigt deutlich, dass der Fehler bei Verwendung der Ein-Schicht-Version mit zunehmender Niederschlagsdauer und Niederschlagssumme zunimmt. Die Ein-Schicht Version des Modells sollte daher nur, wie von vornherein vorgesehen, auf kurzzeitige Starkregenereignisse angewendet werden. Die Ein-Schicht-Version bietet dann den Vorteil einer weniger aufwendigen Parametrisierung und eines geringeren Rechenaufwandes.

6.2.4 Plausibilitätsbetrachtungen

In Deutschland existieren aufgrund des hohen Aufwandes nur sehr wenige umfassend untersuchte Einzugsgebiete. Die vorliegende Arbeit baut deshalb auf einem Forschungsprojekt auf, bei welchem gerade für hydrologisch unbeobachtete Untersuchungsgebiete Informationen hinsichtlich des Abfluss- und Erosionsverhaltens erlangt werden sollen. Für die beiden Untersuchungsgebiete existieren lediglich Lattenpegel, welche zu bestimmten Terminen abgelesen werden (BÜTTNER 2008, MNDL. MITTELUNG). Entsprechend existieren keine verwertbaren Abflussganglinien oder Abflussbeiwerte. Um dennoch die Plausibilität der mit EROSION 3D berechneten Ergebnisse zu prüfen, werden die im Folgenden näher erläuterten Möglichkeiten genutzt:

- Prüfung der berechneten Abflussbeiwerte durch Vergleich mit Ergebnissen des Curve-Number-Verfahrens und
- Prüfung der berechneten Bodenverluste durch Auswertung von Luftbildern.

6.2.4.1 Plausibilitätsprüfung der Abflussberechnungen mit dem Curve-Number Verfahren

Zur Plausibilitätsprüfung der von EROSION 3D berechneten Oberflächenabflüsse wird das Curve-Number (CN)-Verfahren herangezogen (vgl. Kapitel 5.6). Der Vergleich beider Methoden beschränkt sich auf die Nutzungen Wald, Grünland / Direktsaat und konventionelle Bewirtschaftung (Ackerland), da für konservierende Bewirtschaftung keine CN-Werte vorliegen. Da das CN-Verfahren nur für Starkregenereignisse sehr hoher Niederschlagsmengen (ca. 50 mm) konzipiert ist, erfolgen die Berechnungen ausschließlich

für das 50 jährige, das 100 jährige sowie das reale Ereignis 2002. Des Weiteren werden die Vergleichsrechnungen nur für hohe Anfangsbodenfeuchte durchgeführt.

In den Abbildungen Abb. 71 bis Abb. 73 sind die mit EROSION 3D berechneten nutzungs- und ereignisabhängigen Abflussbeiwerte den Ergebnissen des CN-Verfahrens gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass EROSION 3D höhere Abflussbeiwerte liefert als das CN-Verfahren. Ausnahmen ergeben sich für Wald, bezogen auf das 50 jährige und das 100 jährige Ereignis.

Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Methoden zeigt sich für das UG Klatschbach bezogen auf das reale Ereignis 2002 und zwar für alle drei betrachteten Nutzungsszenarien. Die Ergebnisse unterscheiden sich hier um weniger als 5 %.

Bezüglich der statistischen Starkregen ergibt sich für die Nutzungsform Wald die beste Übereinstimmung zwischen den Methoden. Deutlicher weichen die Abflussbeiwerte bei den Grünland / Direktsaat Szenarien voneinander ab. Die größten Unterschiede sind bei konventioneller Bewirtschaftung zu erkennen. Hier betragen die Unterschiede fast 21 %.

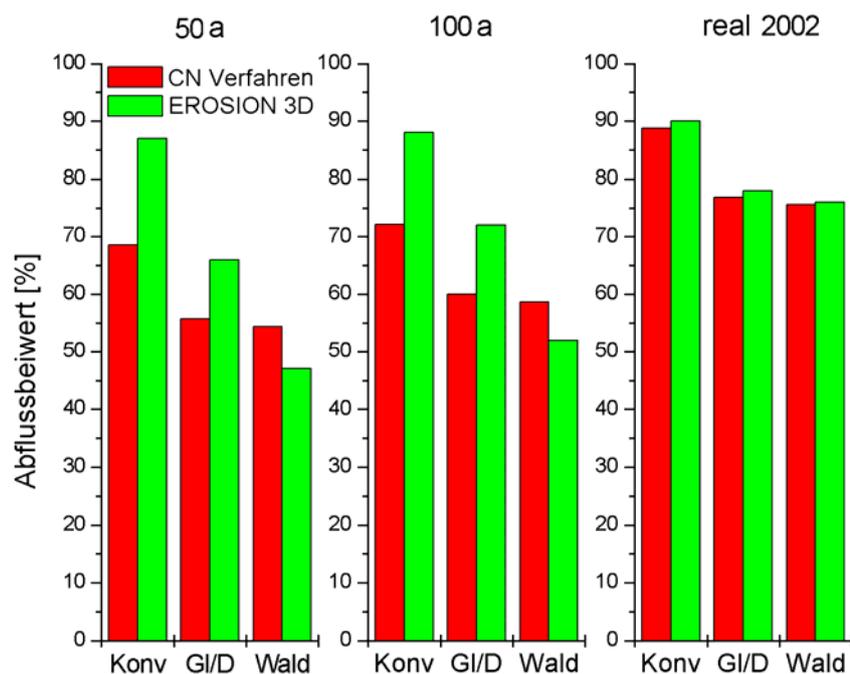


Abb. 71 UG Klatschbach: Gegenüberstellung der mit dem Curve Number Verfahren und EROSION 3D berechneten nutzungsabhängigen Abflussbeiwerte, bezogen auf drei verschiedene Starkregenereignisse.

Im Gegensatz zum UG Klatschbach ergeben sich im UG Oberreichenbach die größten Unterschiede im Falle des realen Ereignisses 2002. Das CN-Verfahren berechnet deutlich höhere Abflussbeiwerte (bis zu 46 % für Wald) als EROSION 3D.

Da der vom CN-Verfahren erfasste Direktabfluss sowohl den Oberflächenabfluss als auch den schnellen Interflow beinhaltet (vgl. Abb. 2), lassen sich die Unterschiede bezüglich des realen Ereignisses 2002 möglicherweise auf den höheren Anteil an Zwischenabfluss im UG Oberreichenbach erklären. Dies bedarf jedoch einer genaueren Überprüfung

Ein weiterer Aspekt, welcher die großen Unterschiede zwischen den Methoden erklären kann, ist die Sensitivität des CN-Verfahrens bezüglich der gewählten Bodengruppe. Wird dem UG Oberreichenbach anstelle von Bodengruppe B die Gruppe A zugeordnet (Abb. 73) ergeben sich deutlich geringere Unterschiede (maximal 18 %) zwischen den Methoden. Da die Zuordnung der Bodengruppe aufgrund der verbalen Beschreibung nicht eindeutig ist, sind hier entsprechende Unsicherheiten gegeben.

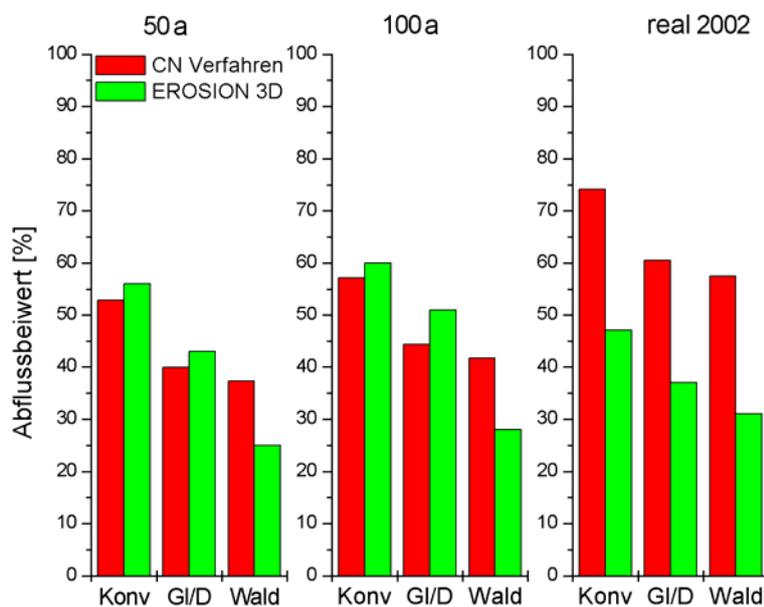


Abb. 72 UG Oberreichenbach: Gegenüberstellung der mit dem Curve Number Verfahren und EROSION 3D berechneten nutzungsabhängigen Abflussbeiwerte bezogen auf drei verschiedene Starkregenereignisse (Bodengruppe B).

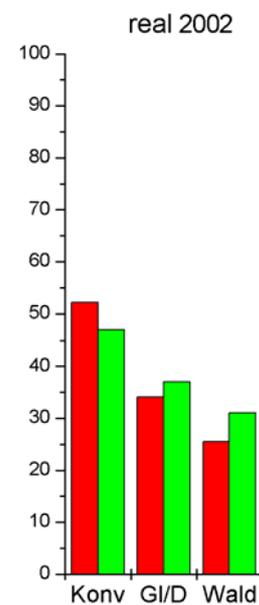


Abb. 73 Ergebnis des Methodenvergleichs bei Zuordnung von Bodengruppe A.

Für die beiden statistischen Ereignissen ergeben sich für das UG Oberreichenbach die besten Übereinstimmungen für konventionelle Bewirtschaftung (maximale Abweichung 5.5 %) sowie Grünland / Direktsaat (maximale Abweichung 13 %). Größere Unterschiede zwischen den Methoden zeigen sich bei Wald (um 33 %).

Die Abflussbeiwerte des CN-Verfahrens werden im Gegensatz zu EROSION 3D unabhängig von der Dauer und Intensität des Niederschlagsereignisses berechnet bzw. stützen sich auf tägliche Niederschlagssummen. Deutliche Unterschiede zwischen den Verfahren waren deshalb zu erwarten.

Dennoch kann festgestellt werden dass, die Abflussbeiwerte von EROSION 3D mit den Ergebnissen des CN Verfahrens konform gehen (mit Ausnahme der Ergebnisse des realen

Ereignisses 2002 für das UG Oberreichenbach). Die Unterschiede liegen bezogen auf die statistischen Ereignisse bei maximal 33 %. Somit kann von einer plausiblen Größenordnung der von EROSION 3D berechneten Werte ausgegangen werden.

6.2.4.2 Bewertung der Erosionsergebnisse

Zur Plausibilitätsprüfung der von EROSION 3D gelieferten Erosionsprognosekarten, insbesondere in Bezug auf das Auftreten sowie die Lage von Erosionsrinnen, wurde am 27. April 2008 eine eigene Befliegung der Untersuchungsgebiete mit einem Ultraleichtflugzeug durchgeführt. Trotz bereits erfolgten Feldaufganges der Ackerkulturen bzw. erst kürzlich erfolgter Saatbettbereitung, konnten eindeutige Erosionserscheinungen in den Untersuchungsgebieten nachgewiesen werden. Abb. 74 zeigt beispielhaft für den südöstlichen Teil des UG Oberreichenbach den Vergleich zwischen der Erosionsprognosekarte des Szenarios „Konventionelle Bewirtschaftung“ mit den beobachteten Erosionserscheinungen im Untersuchungsgebiet. Die markierten Standorte A und B, bei welchen es sich um Feldgehölze handelt, sind zur Orientierung eingezeichnet. Die Erosionskarte zeigt hier deutliche Depositionsflächen, die auf die erhöhte Rauigkeit infolge des Nutzungswechsels zurückzuführen sind. Sehr deutlich sind die im Luftbild mit schwarzen Pfeilen markierten Erosionsrinnen, in der Prognosekarte von EROSION 3D wieder zu finden. Eine durchgehende Erosionsrinne, welche etwas westlich vom Orientierungspunkt B beginnt und sich über den gesamten Ackerschlag bis hin zu Orientierungspunkt A zieht, wird in der Erosionsprognosekarte (Abb. 74) gut wiedergespiegelt. Die räumliche Verteilung der Erosionsrinnen welche durch das Modell EROSION 3D berechnet wurden, können demnach eindeutig verifiziert werden.

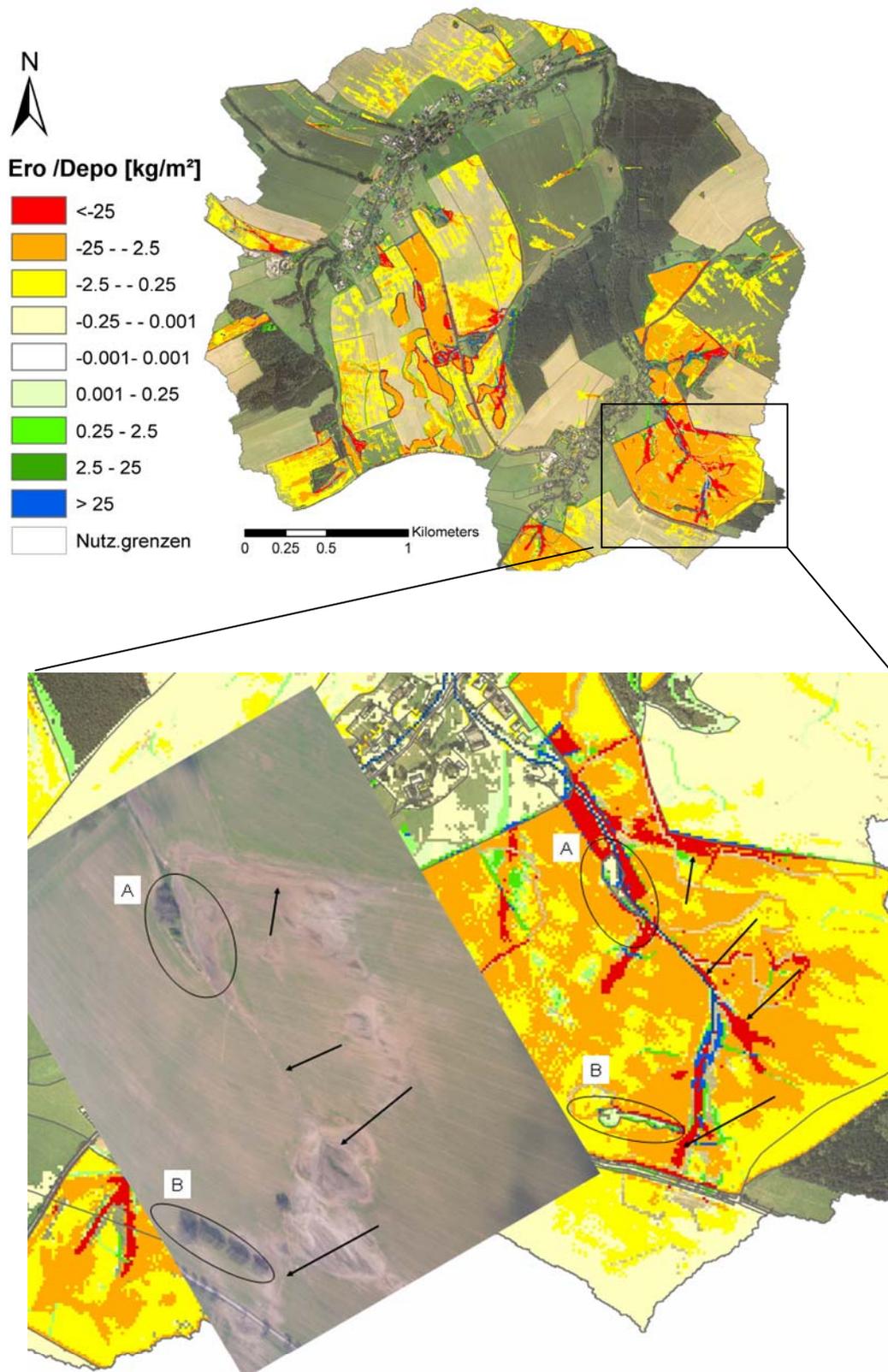


Abb. 74 Verifizierung der Erosionsprognosekarte durch Vergleich mit einem Luftbild. Übersichtskarte mit betreffendem Ausschnitt (oben). Gegenüberstellung Luftbild Erosionsprognosekarte, Szenario konventionell, Mai, mittlere Anfangsbodenfeuchte (unten). Foto: Seidel 2008.



Abb. 75 Vergrößerte Darstellung der Erosionserscheinungen im Südosten des UG Oberreichenbach. Foto: Seidel 2008.

In Abb. 75 ist eine vergrößerte Darstellung des in Abb. 74 gezeigten Luftbildes dargestellt. Die zuvor beschriebenen Erosionserscheinungen (Erosionsrinnen und Depositionsbereiche) sind anhand dieser Luftaufnahme noch deutlicher erkennbar.

6.2.5 Schlussfolgerungen

6.2.5.1 Einschätzung der Eignung des Modells EROSION 3D

Die um den Mehr-Schichten-Ansatz erweiterte Modellversion von EROSION 3D hat sich für die Bearbeitung der Aufgabenstellung, der zeitlich und räumlich hochaufgelösten Quantifizierung des Landnutzungseinflusses auf Abfluss und Erosion, als geeignetes Instrument erwiesen. Das Modell erlaubt eine plausible Differenzierung der Landnutzungsunterschiede zwischen Acker, Wald und Grünland. Die Kombination verschiedener Anfangsbodenfeuchten, Niederschlagsereignisse und Simulationszeitpunkte modifizieren in plausibler Weise die Berechnungsergebnisse.

Durch die Bereitstellung des EROSION 3D-Datenbankprozessors war die Parametrisierung der Modellgrößen auch für den Mehr-Schichten-Ansatz mit vergleichsweise geringem Zeitaufwand möglich. Ohne diese Automatisierung der Datenbankabfrage und Dateierstellung wäre das Vorhaben im durchgeführten Umfang nicht denkbar gewesen.

Für das UG Oberreichenbach entstanden allein durch die Verschneidung von Boden und Landnutzungskarte über 1.700 Elementarfläche mit jeweils 2 bis 4 Bodenschichten, die ohne Nutzung des Datenbankprozessors alle per Hand hätten parametrisiert müssen. Dies wäre bereits für nur eine einzige Szenarienrechnung ein extremer Zeitaufwand gewesen. Des Weiteren wurden dadurch Fehler, welche sonst durch analoge Übertragung der Parameterkatalog-Werte in den Parametersatz entstehen können, durch die Verwendung des Datenbankprozessors vermieden.

6.2.5.2 Grundlegende Defizite des Modellansatzes

Hydrophobizitäts- und Luftpolstereffekte können durch EROSION 3D bisher nicht abgebildet werden. Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass bei Annahme trockener Anfangsbedingungen (\leq PWP) sehr geringe Abflussmengen berechnet werden, die einer Plausibilitätsprüfung nicht standhalten. Es liegt nahe, die offensichtliche Unterschätzung des Abflusses bei trockenen Anfangsbedingungen auf die o.g. Defizite des Modells zurückzuführen.

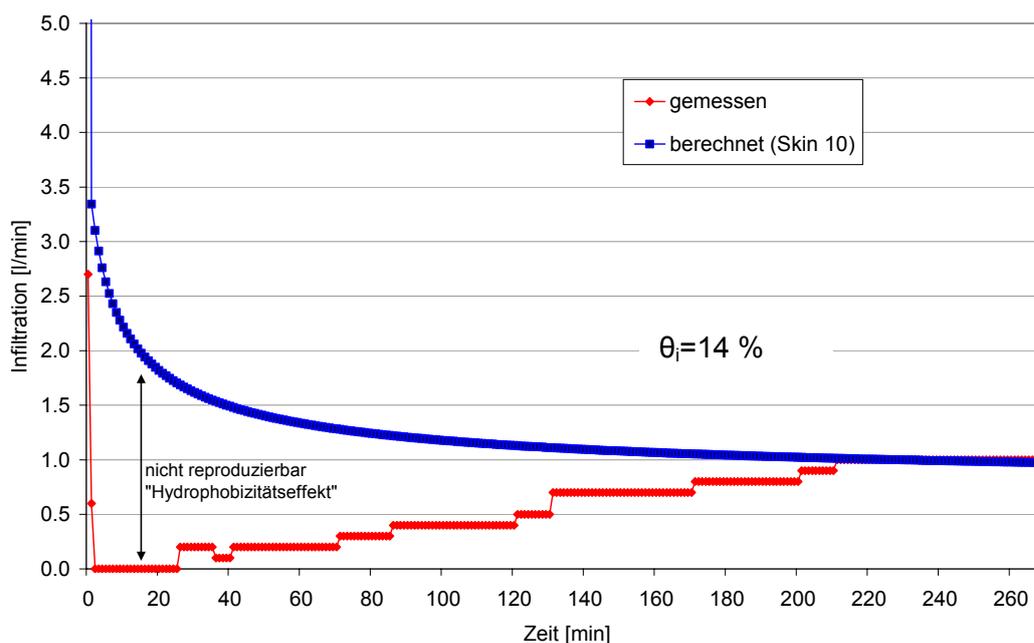


Abb. 76 Vergleich der gemessenen und angepassten Infiltrationskurve für einen durch Hydrophobizität gekennzeichneten Nadelwaldstandort (Standort 14 UG Klatschbach).

Der Einfluss der Hydrophobizität auf die Abflussbildung wird besonders am Beispiel der unter Nadelwald gemessenen Infiltrationskurven deutlich. Wie Abb. 76 zeigt, fällt die Infiltration zunächst steil ab, um dann allmählich wieder anzusteigen, bis die Endinfiltrationsrate erreicht ist. Die modellierte Infiltrationskurve folgt demgegenüber dem üblichen Verlauf, d.h. sie sinkt kontinuierlich bis zum Erreichen der Endinfiltrationsrate ab.

Die außerordentlich geringen Infiltrationsraten zu Beginn der Beregnung sind auf den hohen Benetzungswiderstand der Nadelstreu zurückzuführen. Erst wenn dieser Widerstand überwunden ist, steigt die Infiltration an. Die Anpassung der Skinfaktoren auf die Endinfiltrationsrate führt in jedem Falle zu einem Fehler, da den Nadelwaldstandorten ein zu hoher Skinfaktor zugewiesen wird. Den Nadelwäldern werden dadurch ähnlich gute Infiltrationseigenschaften unterstellt wie den Laubwäldern, die schon zu Beginn der Beregnung sehr hohe Infiltrationsraten aufweisen. Die Unterschiede zwischen Laub- und Nadelwald sind besonders bei kurzen Niederschlagsereignissen groß, nehmen jedoch mit zunehmender Niederschlagsdauer ab.

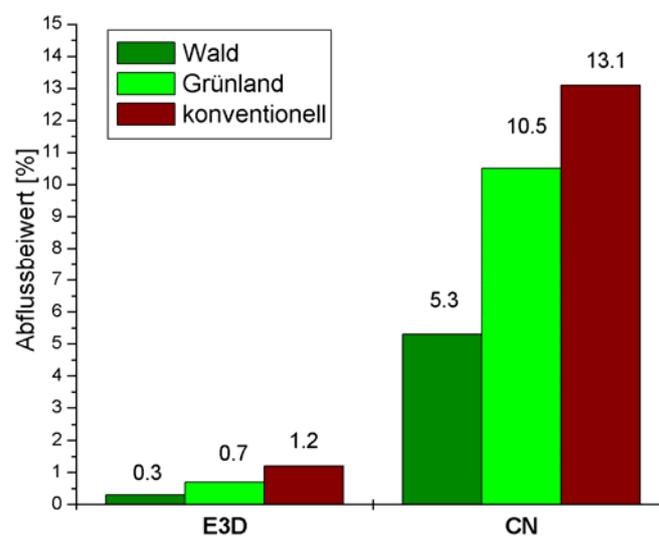


Abb. 77 Vergleich der Abflussbeiwerte bei Unterstellung einer geringen Anfangsbodenfeuchte (\leq PWP) für UG Oberreichenbach, 50 jähriges Extremereignis.

Der Hydrophobizitätseffekt ist ebenso wie der Luftpolstereffekt vor allem bei geringer Anfangsbodenfeuchte wirksam (KING 1981, DECKER & RITSEMA 1996). Dies zeigen auch Voruntersuchungen, bei denen die mit EROSION 3D für geringe Anfangsbodenfeuchte berechneten Abflussbeiwerte mit entsprechenden Werten des CN-Verfahrens verglichen wurden (Abb. 77). Danach unterschätzt EROSION 3D bezogen auf das UG Oberreichenbach (50 jähriges Extremereignis) den Abflussbeiwert für alle drei überprüften Landnutzungsszenarien um über 90 %. Entsprechend wurde auf weitere Simulationsrechnungen von Trockenszenarien verzichtet.

6.2.5.3 Defizite hinsichtlich der Parametrisierung

Streuauflage und Interzeptionsverlust

Bei der Parametrisierung von Waldböden blieben Auflagehorizonte stets unberücksichtigt. Das hat zur Folge, dass das Wasserretentionspotential bei den Modellrechnungen unterschätzt wird. Nach *HOFFMANN (1982)* und *BRECHTEL (1978)* werden für Streudecken unter Fichten bei Mächtigkeiten > 5 cm Speicherkapazitäten von ca. 5 mm angegeben, was einer Wassermenge von 5 l/m² entspricht. Demnach wären bezogen auf das 50 jährige Extremereignis 10 % des Niederschlagsanteils allein in der Streudecke speicherbar.

Ebenso wird die Interzeption (siehe 2.3.2.1) nicht berücksichtigt. Nach *MENDEL (2000)* hängt diese entscheidend vom Alter und der Dichte der Waldbestände ab. *BENECKE* und *VAN DER PLOEG (1978)* geben beispielsweise für Buchen (120 jähriger Bestand) eine maximale Interzeptionskapazität von 2.6 mm (nach 10 mm Niederschlag) und für Fichten (90 jähriger Bestand) 4.7 mm (nach 12 mm Niederschlag) an. Dementsprechend kann der maximale Niederschlagsrückhalt durch Interzeption und durch Speicherung in der Streuschicht zusammen ca. 10 mm erreichen. Daraus ergibt sich, dass die Interzeptionsverluste vor allem bei Starkregen mit geringer Niederschlagsmenge eine relevante Rolle spielen, bei lang anhaltenden intensiven Niederschlägen, wie dem Hochwasserereignis von 2002, ist diese Wirkung hingegen als vernachlässigbar einzuschätzen. Trotzdem wäre es für Berechnungen mit *EROSION 3D* wünschenswert, wenn die Interzeption für Waldgebiete, z.B. in Form eines Anfangsverlustes, berücksichtigt werden könnte.

Aufgrund des ereignisbasierten Ansatzes von *EROSION 3D* wird der Transpirationsverlust, welcher für Waldflächen besonders bedeutsam ist, nicht berücksichtigt. Dies ist jedoch von Bedeutung, da aufgrund der hohen Transpirationsleistung der Bäume der Bodenspeicher erheblich geleert, und damit zusätzliches Speichervolumen für Niederschlagswasser geschaffen wird (s. Kapitel 2.3.2.4). Die Anfangsbodenfeuchte unter Wald müsste demnach im Vergleich zu Freiland geringer angesetzt werden. Bezogen auf die Modellergebnisse würden sich die Abflussmengen unter Wald entsprechend verringern. Um dieses Defizit bei der Parametrisierung zu beseitigen, wäre eine Kopplung mit kontinuierlichen Wasserhaushaltsmodellen, wie z.B. *WASIM ETH (SCHULLA 1997)*, möglich.

7 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, anhand zweier unbeobachteter Teileinzugsgebiete der Striegis, die Abflussbereitschaft und Erosionsgefährdung bei Unterstellung verschiedener Landnutzungsszenarien zu quantifizieren.

Die methodische Umsetzung erfolgte dabei mit Hilfe des Simulationsmodells EROSION 3D. Dieses, in der hier erstmals eingesetzten Version des um einen Mehr-Schichten-Ansatz erweiterten Infiltrationsmodells, ermöglicht eine Differenzierung der Bodensäule in beliebig viele Schichten. Mit Hilfe des vom Modell prognostizierten Oberflächenabflusses ist es möglich, flächenbezogene forst- und landwirtschaftliche Maßnahmen des dezentralen Hochwasser- und Erosionsschutzes zu bewerten (VON WERNER ET AL. 2004).

Bei den modellierten Landnutzungsszenarien handelt es sich um die Nutzungsvarianten „konventionelle Bewirtschaftung“, „konservierende Bewirtschaftung“, „Grünland / Direktsaat“ und „Wald“. Diese wurden mit zwei Anfangsbodenfeuchten, vier Niederschlagsereignissen und zwei Jahreszeitenvarianten verschnitten. Für die sich daraus ergebenden Szenarienkombinationen wurden Oberflächenabfluss und Gebietsaustrag mit Hilfe des o. g. Computermodells berechnet und vergleichend bewertet.

Im ersten Arbeitsschritt erfolgte die Beschaffung und umfangreiche Bearbeitung der Datengrundlagen für die Modellrechnungen. Dabei ging es insbesondere um die Erstellung der digitalen Geländemodelle auf Basis von Laserscanner Daten (Befliegung FA. MILAN 2004), die Auswertung von digitalen Bodenkarten (RBS und BK_{konz}), die Aufbereitung von Niederschlags-Ereignisdateien auf Grundlage von Daten des Deutschen Wetterdienstes (statistische Ereignisse mit Wiederkehrzeiten von 5, 20, 50 und 100 Jahren, reales Ereignis vom August 2002) und schließlich die Erstellung der digitalen Landnutzungskarten auf Grundlage von Orthophotos, InVeKoS Feldblockdaten und den Daten der CIR-Biototypenkartierung.

Aufbauend auf den Datengrundlagen konnte nun mit Hilfe des EROSION 3D-Datenbankprozessors die Parametrisierung der verschiedenen Berechnungsszenarien durchgeführt werden. Die Parametersetzung des Oberbodens basierte weitestgehend auf den Daten des Digitalen Parameterkataloges Sachsen (MICHAEL ET AL. 1996). Dieser für die Parametrisierung von Ackerflächen konzipierte Parameterkatalog wies allerdings bezüglich der Landnutzungen Grünland und Wald Datenlücken bzw. nur grobe Schätzwerte auf. Um diese Landnutzungen adäquat parametrisieren zu können, wurden in beiden Untersuchungsgebieten auf jeweils drei Grünland-, Nadelwald- und Laubwaldstandorten Berechnungsversuche zur Bestimmung der Modellparameter durchgeführt.

Zur Bewertung des Niederschlagseinflusses auf Oberflächenabfluss und Erosion wurde eine neue Größe zur Charakterisierung von Starkregen eingeführt. Bisher erfolgte die Bewertung lediglich anhand von Wiederkehrintervallen, die jedoch kein physikalisches, sondern nur ein statistisches Maß darstellen. Die neu eingeführte Größe wurde als „Abflusswirksamkeit“ bezeichnet und vereint Niederschlagsintensität und Niederschlagsdauer zu einer einzigen Kenngröße.

Einfluss der Landnutzung

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass der Einfluss der Landnutzung auf Abfluss und Erosion mit zunehmend anthropogener Überprägung von Wald über Grünland / Direktsaat, konservierende Bewirtschaftung hin zur konventionellen Bewirtschaftung zunimmt.

Der Nutzungseinfluss auf den Abfluss sinkt dabei mit zunehmender Jährlichkeit des Niederschlagsereignisses. Während sich im Falle des 5 jährigen Extremereignisse der Abflussbeiwert zwischen vollständiger Bewaldung (UG Oberreichenbach) und konventioneller Bewirtschaftung um 100 % unterscheidet, liegt der Unterschied beim realen Ereignis 2002 nur noch bei etwa 20 %.

Da bedeutender Bodenabtrag nur im Zusammenhang mit landwirtschaftlicher Nutzung (unzureichende Bodenbedeckung) auftritt, ergeben sich für Wald sowie Grünland / Direktsaat bei allen betrachteten Starkregenereignissen erwartungsgemäß vernachlässigbar kleine Erosionsraten. Die höchsten Bodenabträge wurden für konventionelle Bewirtschaftung berechnet. Bezogen auf das 100 jährige Extremereignis liegen die Bodenabträge im UG Klatschbach bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte bei ca. 224 t/ha. Eine Umstellung auf konservierende Bewirtschaftung bewirkt im Bergleich zur konventionellen Variante eine Verminderung der Erosion um ca. 95 %.

Die relativen Unterschiede zwischen den verschiedenen Nutzungsszenarien sind im Allgemeinen bei hoher Anfangsbodenfeuchte deutlich geringer als bei mittlerer Feuchte.

Einfluss des Starkregenereignisses

Die auf Basis der statistischen Starkregenereignisse durchgeführten Abflussberechnungen zeigen, dass der Oberflächenabfluss mit steigender Abflusswirksamkeit bzw. Jährlichkeit der Ereignisse zunimmt.

Im UG Klatschbach weist beispielsweise Wald bei hoher Anfangsbodenfeuchte und 5 jährigem Ereignis fast keinen Abfluss auf, während der Abflussbeiwert beim 100 jährigen Ereignis auf 52 % ansteigt. Für konventionelle Bewirtschaftung wurde für das 5 jährige

Extremereignis ein Abflussbeiwert von 75 % und für das 100 jährige Ereignis von 88 % berechnet.

In den für das reale Ereignis 2002 berechneten Ergebnissen finden sich die bereits für die statistischen Starkregenereignisse festgestellten nutzungsbezogenen Abhängigkeiten wieder. Die Modellrechnungen für das reale Ereignis von 2002 ergaben weiterhin, dass im UG Klatschbach bei sämtlichen Nutzungen mehr als 75 % des gefallen Niederschlages als Oberflächenabfluss abfließen. Im UG Oberreichenbach sind es lediglich zwischen 31 % (für Wald) und 47 % (für konventionelle Bewirtschaftung).

Die berechneten Werte für Erosion und Abfluss ordnen sich im Vergleich zu den statistischen Ereignissen im Bereich des 100 jährigen Ereignisses (UG Klatschbach) bzw. des 50 jährigen Extremereignisses (UG Oberreichenbach) ein. Dies entspricht auch der für das reale Ereignis 2002 berechneten Abflusswirksamkeit, die sich ebenfalls im Bereich des 50 jährigen Ereignisses der Subregion 7 wieder findet.

Einfluss der Anfangsbodenfeuchte

Steigende Bodenfeuchte wirkt sich verschärfend auf Abfluss- und Erosion aus. So wurde bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte für das UG Oberreichenbach (konventionelle Bewirtschaftung) und 100 jährigem Extremereignis ein Abflussbeiwert von 22 %, bei hoher Anfangsbodenfeuchte dagegen ein Wert von 62 % berechnet. Für die gleiche Szenarienkombination ergeben sich dabei Bodenabträge von 33 t/ha bei mittlerer und 70 t/ha bei hoher Anfangsbodenfeuchte.

Konventionelle und konservierende Bodenbearbeitung unterscheiden sich in ihrer Wirkung auf den Oberflächenabfluss bei mittlerer Anfangsbodenfeuchte deutlich stärker als bei hoher Anfangsbodenfeuchte, wo nur noch geringe bis keine Unterschiede feststellbar sind. Grünland / Direktsaat und Wald zeigen hingegen auch noch bei hoher Bodenfeuchte deutlich kleinere Abflussbeiwerte als die konservierende bzw. konventionelle Bewirtschaftungsvariante.

Einfluss der Gebietscharakteristik / Bodenarten

Die Untersuchung des Einflusses der Untersuchungsgebiete (Bodenarten) auf die räumliche Verteilung der Abflussbildung ergab im UG Klatschbach, aufgrund der dort vorliegenden schluffreichen Böden, deutlich höhere Abflüsse und Erosionsraten als im UG Oberreichenbach, wo sandigere Böden dominieren. Beispielsweise liefert Wald auf einem Schluffboden (Ut3) fast dreimal soviel Abfluss wie auf einem sandigen Boden (SI3). Acker zeigt hingegen auf einem Schluffboden etwa den 1.5 fachen Wert dessen, was er auf einem sandigen Boden liefert.

Entsprechend ergeben sich für das UG Klatschbach mehr als doppelt so hohe Abflussbeiwerte im Vergleich zum UG Oberreichenbach. Die entsprechenden Bodenabträge liegen im UG Klatschbach bei 3.5 t/ha und im UG Oberreichenbach bei 1.2 t/ha. Damit sind im UG Klatschbach für das genannte Beispiel fast dreimal höhere Erosionswerte als im UG Oberreichenbach zu verzeichnen.

Einfluss des Simulationszeitpunktes

Der Simulationszeitpunkt zeigt erwartungsgemäß nur für die Szenarien konventionell und konservierend unterschiedliche Abflüsse und Bodenabträge, da beide im Wesentlichen vom Bedeckungsgrad der Kulturart abhängen. Im Allgemeinen sinkt mit zunehmender Bestandsentwicklung (Bedeckungsgrad) die Verschlammungsneigung des Bodens, so dass mehr Niederschlagswasser infiltrieren kann und die Erosion gleichzeitig sinkt. Beispielsweise ergeben sich im Mai auf Maisflächen die höchsten Bodenabträge, auf Rapsflächen hingegen im August. Auf Grünland / Direktsaatflächen sowie auf Wald-Standorten wurden erwartungsgemäß keine Unterschiede zwischen den Simulationszeitpunkten festgestellt.

Fazit Modellrechnungen

Die Modellrechnungen der vorliegenden Arbeit bestätigen, dass die Landnutzung maßgeblichen Einfluss auf den Oberflächenabfluss und auf den Sedimenteintrag in Gewässer nimmt. Maßnahmen wie eine Erhöhung des Wald- sowie Grünland / Direktsaatanteils wirken sich reduzierend auf Oberflächenabfluss und Bodenerosion aus. Mit zunehmender Abflusswirksamkeit eines Starkregenereignisses sowie steigender Anfangsbodenfeuchte reduziert sich der Landnutzungseinfluss auf den Oberflächenabfluss erheblich. Die Wirkung auf die Bodenerosion bleibt hingegen auch bei Starkregenereignissen hoher Abflusswirksamkeit erhalten.

Es konnte bestätigt werden, dass eine konservierende Bewirtschaftung im Vergleich zur konventionellen Variante die Erosion um mehr als 95 % reduzieren kann. Eine signifikante Abflussreduzierung konnte nur für das UG Klatschbach nachgewiesen werden. Als noch wirksamer für den Hochwasser- und Erosionsschutz erwies sich jedoch Grünland / Direktsaat. Hier ergaben sich für beide Untersuchungsgebiete, selbst bei hoher Anfangsbodenfeuchte und Verwendung des 100 jährigen Extremereignisses, Abflussminderungen von mindestens 17 % und Erosionsminderungen von über 98 %.

Um den Wasserrückhalt in den Einzugsgebieten zu erhöhen und damit Abfluss und Erosion wirksam zu reduzieren, können folgende Handlungsempfehlungen aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit abgeleitet werden:

- Erhöhung des Waldanteils in den Untersuchungsgebieten,
- Umstellung der Ackerbewirtschaftung auf Grünland / Direktsaat,
- Anlegen von ausreichend breiten Gewässerrandstreifen (sofern lediglich eine Umstellung auf konservierende Bewirtschaftung erfolgt) und
- Begrünung der Tiefenlinien (bei konservierender Bewirtschaftung)

Plausibilitätsprüfung

Die Plausibilitätsprüfung der von EROSION 3D berechneten Abflussbeiwerte erfolgte aufgrund fehlender Abflussdaten mit Hilfe des international anerkannten Curve-Number-Verfahrens. Der Vergleich zeigt, dass die von EROSION 3D berechneten Werte weitgehend in der Größenordnung der nach CN Verfahren ermittelten Beiwerte liegen.

Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Methoden zeigte sich für das UG Klatschbach bezogen auf das reale Ereignis 2002, und zwar für alle drei betrachteten Nutzungsszenarien. Die Ergebnisse unterscheiden sich hier um weniger als 5 %.

Die größten Abweichungen ergaben sich im UG Oberreichenbach, ebenfalls für das reale Ereignis. Hier kam es bei den Waldszenarien zu einem Unterschied der Abflussbeiwerte von 46 %.

Ebenso wie für die Oberflächenabflüsse fehlen auch zur Bodenerosion gemessene Vergleichsdaten. Einen zumindest qualitativen Eindruck der in den Untersuchungsgebieten aktuell ablaufenden Bodenumlagerungen liefern eigens angefertigte Luftaufnahmen. Die mit dem Modell simulierte räumliche Verteilung von Erosion und Deposition lässt sich außerordentlich gut mit den Luftaufnahmen in Übereinstimmung bringen, so dass die Plausibilität der Modellergebnisse unterstellt werden darf.

Ein Ergebnisvergleich der Mehr-Schichten- und der Ein-Schicht-Variante zeigt, dass der Fehler bei Verwendung der Ein-Schicht-Variante mit zunehmender Niederschlagsdauer und Niederschlagssumme zunimmt. Die Ein-Schicht-Version des Modells sollte daher nur, wie von vornherein vorgesehen, auf kurzzeitige Starkregenereignisse angewendet werden.

Einschätzung Mehr-Schichten-Ansatz und Modellverbesserungen

Der Mehr-Schichten-Ansatz erlaubt eine differenzierte Abbildung der Landnutzungseinflüsse auf den Oberflächenabfluss und Erosion.

Mit vorliegender Arbeit konnte gezeigt werden, dass das Modell EROSION 3D in der Lage ist, zeitlich und räumlich hochaufgelöste Eingangsdaten zu verarbeiten und entsprechend hochaufgelöste Ergebnisse zu Oberflächenabfluss und Erosion / Deposition zu liefern.

Um die Parametrisierung der verschiedenen Landnutzungen zu verbessern und damit noch realitätsnähere Ergebnisse erzielen zu können, wird empfohlen weitere Messkampagnen zur Bestimmung von Modellparametern, insbesondere der Skinfaktoren durchzuführen. Dadurch könnten die Einflüsse von Verschlammung und Sekundärporen noch besser abgebildet werden. Defizite bestehen in dieser Hinsicht noch für Wald- und Grünlandstandorte.

Zudem wird eine verbesserte Bestimmung tiefendifferenzierter Anfangsbodenfeuchten in Abhängigkeit von Witterung, Nutzung und Lage im Relief durch Kopplung mit kontinuierlichen Wasserhaushaltsmodellen z.B. WASIM ETH (SCHULLA 1997) empfohlen.

Für eine Verbesserung der Abflussprognosen für Trockenszenarien muss das Modell EROSION 3D hinsichtlich der Berücksichtigung von Luftpolster- und Hydrophobizitätseffekten weiterentwickelt werden.

8 Abstract

With respect to flood and erosion prevention it is crucial to know how land use and management will effect runoff and soil loss. In order to quantify these effects, the application of models is absolutely necessary.

By using the physically based simulation model "EROSION 3D" the water retention potential of different land uses was investigated referring to two small subcatchments of the Striegis river in Saxony (Germany). Results show, that forest produces less runoff and erosion compared to all other land use options. The highest flood and erosion is linked to arable land when combined with conventional tillage. Grassland is inbetween. With increase of initial soil moisture and precipitation (intensity and duration) runoff and erosion of different land use scenarios equalise. In order to enhance the water retention potential within the catchments it is suggested to increase the forest and to decrease arable land. Also conservation tillage is efficient to reduce erosion, but significant effects on runoff reduction not always could be verified. However direct tillage (or grassland) has proved to be effective to reduce both, runoff and erosion.

9 Symbole und Einheiten

Nachfolgend sind die im Text verwendeten Symbole und entsprechende Einheiten aufgelistet. Handelt es sich um modellspezifische Größen, so ist dies an entsprechender Stelle vermerkt.

A	mittlerer jährlicher Bodenabtrag USLE	[t/ha*a]
A	Direktabfluss	[mm]
b	Parameter der CAMPBELL Gleichung	[-]
c	Konzentration der suspendierten Teilchen in der Flüssigkeit	[m ³ /m ³]
C	Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor USLE	[-]
CL	Bedeckungsgrad der Bodenoberfläche (EROSION 3D)	[-]
Corg	Gehalt an organischem Kohlenstoff	[M %]
D	Teilchendurchmesser	[m]
E	Erosionskennzahl EROSION 3D	[-]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
GS	Grobskelettgehalt	[%]
i	Infiltrationsrate (Volumenstrom)	[m/s]
i	Infiltrationsrate (Massenstrom)	[kg/m ² *s]
la	Anfangsverlust	[mm]
K	Bodenerodierbarkeitsfaktor (USLE)	[-]
ks	gesättigte hydr. Leitfähigkeit	[kg s/m ³]
k	hydraulische Leitfähigkeit	[kg*s/m ³]
ks,GW	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters	[mm/min]
L	Hanglängenfaktor (USLE)	[-]
m	Parameter der VAN GENUCHTEN Gleichung	[-]
N	Niederschlagsmenge	[mm]
n	Parameter der VAN GENUCHTEN Gleichung	[-]
n	Rauhigkeitsbeiwert nach Manning-Strickler	[s/m ^{1/3}]
P	Erosionsschutzfaktor (USLE)	[-]
q _{s,in}	Sedimentstrom in das betrachtete Segment	[kg/(m*s)]
q _{s,out}	Sedimentstrom aus dem betrachteten Segment	[kg/(m*s)]
q	Abflussvolumenstrom	[m ³ /(m*s)]
q	Abflussrate	[m ³ /(m*s)]
q	Abflussrate	[m ³ /(m*s)]
q _{crit}	kritische Abflussrate	[m ³ /(m*s)]

q_{in}	Zufluss aus darüber liegendem Hangsegment	$[m^3/(m*s)]$
$q_{s,pot}$	potentieller Feststoffmassenstrom	$[kg/(m*s)]$
$q_{s,max}$	maximaler Feststoffmassenstrom (Transportkapazität)	$[kg/(m*s)]$
q_{GW}	Grundwasserabstrom	$[m^3/(m^2*s)]$
r	Niederschlagsintensität	$[m/s]$
r	Niederschlagsintensität	$[mm/h]$
$r\alpha$	Niederschlagsintensität bezogen auf die Hangneigung α	$[m/s]$
R	Niederschlagsfaktor (USLE)	$[-]$
S	Hangneigungsfaktor (USLE)	$[-]$
S	Hangneigung	$[m/m]$
S	maximales Retentionsvermögen (CN Verfahren)	$[mm]$
S	Sandgehalt	$[M \%]$
T	Tongehalt	$[\%]$
T	Tongehalt	$[kg/kg]$
t	Zeit	$[s]$
T	Zeitintervall	$[s]$
U	Schluffgehalt	$[kg/kg]$
x	Länge des Hangsegments	$[m]$
y	Breite des Rasterelements	$[m]$
x_f	Eindringtiefe der Befeuchtungsfront	$[m]$
α	Hangneigungswinkel	$[^\circ]$
α	Hangneigung	$[m/m]$
δ	Schichtdicke des Abflusses	$[m]$
δ_p	Standardabweichung des mittleren Partikeldurchmessers	$[m]$
Θ_{Ψ_m}	Wassergehalt, dem Matrixpotential Ψ_m zugeordnet	$[m^3/m^3]$
Θ_S	Sättigungswassergehalt	$[m^3/m^3]$
Θ_0	Anfangswassergehalt	$[m^3/m^3]$
Θ_r	Restwassergehalt bei pF 4,2	$[m^3/m^3]$
φ_q	durch Oberflächenabfluss übertragener Impulsstrom	$[N/m^2]$
φ_r	durch Tropfenimpuls übertragener Impulsstrom	$[N/m^2]$
φ_{crit}	kritischer Impulsstrom	$[N/m^2]$
η	Viskosität der Flüssigkeit	$[kg/(m*s)]$
κ	Depositionskoeffizient EROSION 3D	$[-]$
ρ_b	Lagerungsdichte	$[kg/m^3]$
ρ_q	Flüssigkeitsdichte	$[kg/m^3]$

ρ_p	Dichte der Partikel	[kg/m ³]
ρ_q	Flüssigkeitsdichte des Niederschlages	[kg/m ³]
v_r	mittlere Fallendgeschwindigkeit der Tropfen	[m/s]
v_p	Sinkgeschwindigkeit	[m/s]
v_q	mittlere Fließgeschwindigkeit des Abflusses	[m/s]
w_p	Massenstrom	[kg/(m ² *s)]
ψ_g	Gravitationspotential	[J/kg]
ψ_m	Matrixpotential	[J/kg]
ψ_{m_s}	Matrixpotential bezogen auf den Wassergehalt in der Transportzone	[J/kg]
ψ_{m_0}	Matrixpotential bezogen auf den Anfangswassergehalt	[J/kg]
Ψ_m	Matrixpotential	[hPa]

10 Quellenverzeichnis

- AD HOC- ARBEITSGRUPPE BODEN* (Arbeitsgemeinschaft der Geologischen Landesämter in der Bundesrepublik Deutschland) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). Hannover, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 438 S.
- ABBOTT, M.B., J.C. BATHURST, J.A. CUNGE, P.E. O'CONNELL AND J. RASMUSSEN* (1986): An introduction to the european hydrological system - Systeme hydrologique europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. - Journal of hydrology, 87: 61-77.
- ABELE, J., KIPGEN, R., PRELLBERG, D.* (1995): Hochwasser an Mosel und Saar – Synthese der hydrologischen Untersuchungen und Vorschläge für vorbeugende Strategien.- Internationale Arbeitsgruppe „Hochwasserschutz an Mosel und Saar“, Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz, 84 S.+Anlagen.
- ALEGRE, J.C., CASSEL, D.K., AMEZQUITA, E.* (1991): Tillage systems and soil properties in Latin America. Soil Tillage Research 20 (2-4), 147-163.
- ARNOLD, J.G., SRINIVASAN, R., MUTTIAH, R.S., WILLIAMS, J.R.* (1998). Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1: Model development. J. Am. Water Res. Assoc. 34 (1), 73-89.
- AUERSWALD, K.* (1987): Sensitivität erosionsbestimmender Faktoren. - Wasser und Boden, 1:34-38.
- AUERSWALD, K., FLACKE, W., NEUFANG L.* (1988): Räumlich differenzierende Berechnung großmaßstäblicher Erosionsprognosekarten - Modellgrundlagen der ABAG. - Z. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde, 151: 369-373.
- AUERSWALD, K.* (1993): Bodeneigenschaften und Bodenerosion - Wirkungswege bei unterschiedlichen Betrachtungsmaßstäben. -Relief Boden-Paläoklima 8, Gebrüder Borntraeger, Berlin und Stuttgart, 208 S.
- AUSSENAC, G.* (1968): Interception de precipitations par le couvert forestier.- annals des Sciences Forestieres 25/3, 135-156.
- AZOOZ, R.H., M.A.* (1996): Soil infiltration an hydraulic conductivity under long term no-tillage and conventional tillage systems. Can. J. Soil Sci, 76 (2), 143-152.
- BALAZS, A.* (1983): Ein kausalanalytischer Beitrag zur Quantifizierung des Bestandes- und Nettoniederschlages von Waldbeständen. -Beiträge zur Hydrologie, Kirchzarten, 180 S.
- BARNER, J.* (1961): Die Wechselwirkungen von Wald und Wasser im Lichte amerikanischer Forschungen. -Mitteilungen des Arbeitskreises „Wald und Wasser“ 4, Koblenz, 64 S.
- BASTIAN, O.* (2003): Naturraumbedingungen in Sachsen. In: Klausnitze, B., Reinhardt, T. B. (Hrsg.): Beiträge zur Insektenfauna Sachsens.- Mitt. Sächs. Entomologen, Suppl. 1, S. 16-23.
- BATES, C. G., HENRY, A.J.* (1928): Forest and streamflow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado.- Mo. Weather Rev. 30, 79 S.
- BATHURST, J.C., WICKS, J.M., O CONNELL, P.E.* (1995): The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system.-In Singh, V.P. (ed): Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Colorado, S 563-594.
- BAUMGARTNER, A., LIEBSCHER, H-J.* (1996): Lehrbuch der Hydrologie: Band 1: Allgemeine Hydrologie- quantitative Hydrologie. 2.Auflage, Berlin, Stuttgart, Borntraeger Verlag.

- BEASLEY, D.B., HUGGINS, L.F. (1982): ANSWERS - User's manual. Dept. of Agr. Eng., Purdue University, West Lafayette.
- BEISECKER, R. (1994): Einfluss langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge, die Wasserinfiltration und die Stoffverlagerung eines Löss- und eines Sandbodens. Institut für Ökologie, Technische Universität Berlin, Bodenökologie und Bodengenese, Heft 12. Berlin
- BENECKE, P., VAN DER PLOEG, R. R. (1978): Wald und Wasser- I. Komponenten des Wasserhaushaltes von Waldökosystemen. Forstarchiv 49, 26-32.
- BENECKE, P., FLÜGGEN, C. (1989): Untersuchungen zur Grundwasserabsenkung auf Kiefernbestände niedersächsischer Standorte. –Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 160/5. 83-91.
- BENNE, I., HEINEKE, H-J., NETTELMANN, F. (1990): Die DV gestützte Auswertung der Bodenschätzung. In: Technische Berichte zum NIBIS, (Hrsg.): Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.
- BENNETT, J.P. (1974): Concepts of mathematical modeling of sediment yield. Water Resources Research 10 (3): 485-492.
- BERNHARDT, A., HAASE, G., MANNSFELD, K., RICHTER, H., SCHMIDT, R. (1986): Naturräume der sächsischen Bezirke. Sächsische Heimatblätter 4/5 (Sonderdruck): 16-22.
- BORCHERT, H. (1988): Bodenphysikalische Veränderungen eines Lössbodens bei langjähriger pflugloser Bewirtschaftung. Bayer. Landwirtsch. Jahrb. 65, 813-824.
- BORK, H.-R. (1988): Bodenerosion und Umwelt. Verlauf, Ursachen und Folgen der mittelalterlichen und neuzeitlichen Bodenerosion, Bodenerosionsprozesse, Modelle und Simulationen. In: Landschaftsgenese und Landschaftsökologie. Band 13, TU Braunschweig, 249 S.
- BORK, H.-R. ET AL. (1998): Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa-Wirkungen des Menschen auf Landschaften. Justus Perthes Verlag Gotha GmbH,. 1. Auflage. Gotha.
- BORST, H.L., MCCALL, A.G., BELL, F.G. (1945): Investigations in erosion control an reclamation of eroded land at the Northwest Appalachian Conservation Experiment Station, Zanesville, Ohio 1934-42.- USDA, SCS, Technical Bulletin 888,93 S.
- BRADEN, H. (1985): Ein Energiehaushalts- und Verdunstungsmodell für Wasser- und Stoffhaushaltsuntersuchungen landwirtschaftlich genutzter Untersuchungsgebiete. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 42, 294-299.
- BRANDT, M., WILDHAGEN, H. (1997): Verwertung von Grünguthäcksel zur Verminderung der Bodenerosion.- Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 85, III, 1439- 1442.
- BREBURDA, J., RICHTER, G. (1998): Kurze Geschichte der Bodenerosion und ihre Erforschung in Mitteleuropa. In: Richter, G. (Hrsg.): Bodenerosion- Analyse und Bilanz eines Umweltproblems, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 21-29.
- BRECHTEL, H.-M. (1978): Möglichkeiten der Steuerung des Wasserhaushaltes von Deponien durch Pflanzendecken. -Aktuelle Probleme der Deponietechnik 8, Abfallseminar an der TU Berlin, Band 3, Abfallwirtschaft an der Technischen Universität Berlin, 186-220.
- BRONSTERT, A. (1994) Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen (Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe , Heft 46). Karlsruhe.
- BROWNING, G.M., NORTON, R.A., MCCALL, A.R., BELL (1948): Investigation in erosion control and the reclamation of eroded land at the Missouri Valley Loss Conservation Experiment Station Clarinda, Iowa, 1931-42.- USDA, SCS, Technical Bulletin 959.

- BURGER H. (1922):* Physikalische Eigenschaften der Wald- und Freilandböden.- Mitteilungen der Schweizerischen Centralanstalt für das forstliche Versuchswesen 23 (1), 1-221.
- BURGER H. (1937):* Entwässerung und Aufforstung- Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden .-Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Zürich, Band 10, H 1, 100 S.
- BÜTTNER, U. (2008):* Landeshochwasserzentrale, mündliche Mitteilung.
- CAMPBELL, G. S. (1985):* Soil physics with basic. Amsterdam. Elsevier.
- CHANG, C., LINDWALL, C.W. (1989):* Effect of long-term minimum tillage. Can. J. Soil Sci. 69: 443-449.
- CHANG, C., LINDWALL, C.W. (1990).* Comparison of the Effect of Long Term Tillage and Crop Rotation on Physical Properties of a Soil. Canadian Agriculture Engineering (32): 53-55.
- COMIA, R.A., STENBERG, M., NELSON, P., RYDBERG, T., HAKANSSON, I. (1994).* Soil and crop responses to different tillage systems. Soil Tillage Res. 29: 335-355.
- CRAMER, F. (2000):* Abschlussbericht zum Projekt: "Entwicklung eines Informationssystems zur Erosionsminderung im Wassereinzugsgebiet der Jahna, einem Nebenfluss der Elbe in Sachsen. Dresden.
- DANISH HYDRAULIC INSTITUTE. (1993):* MIKE SHE short description, Hørsholm.
- DBG (DEUTSCHE BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT) (2005):* Exkursionsführer zur Jahrestagung 2005 der DBG in Marburg. DBG Band 1995. Oldenburg, DBG, 211 S.
- DEINLEIN, R., BÖHM, A. (2000):* Modeling Overland Flow and Soil Erosion for a Military Training Area in Southern Germany. In: Schmidt, J. (Ed.): Soil Erosion-Application of Physically Based Models.Springer.Berlin.
- DE ROO, A.P.J. (1993):* Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems. Dissertation. Universität Utrecht.
- DE ROO, A.P.J., WESSELING, C.G., CREMERS, N.H.D.T., OFFERMANS, R.J.E, RITSEMA, C.J., VAN OOSTINDIE, K. (1994):* LISEM: a new physically-based hydrological and soil erosion model in a GIS-environment, theory and implementation. - In: Olive, L.J., R.J. Loughran und J.A. Kesbys (Eds.), Variability in stream erosion and sediment transport, IAHS, Canberra, 1994, Vol. 224: 439-448. Information Systems. Dissertation. Universität Utrecht.
- DIEPENBROCK, W., ELLMER, F., LEON, J. (2005):* Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. Grundwissen Bachelor. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- DIKAU, R. (1986):* Experimentelle Untersuchungen zu Oberflächenabfluß und Bodenabtrag von Meßparzellen und landwirtschaftlichen Nutzflächen. -Heidelberger Geographische Arbeiten 66, 127-146.
- DIKAU, R. (1988):* Oberflächenabfluß und Bodenabtrag von Meßparzellen des Versuchsgebietes „Hollmuth“. -Heidelberger Geographische Arbeiten 66, 127-146.
- DILS, R.E. (1953):* Influence of forest cutting and mountain farming on some vegetation, surface soil and runoff characteristics.-USDA, Forest Service, Southeastern Forest Experimental Station Paper 24, Asheville, N.C.
- DVWK (1985):*Niederschlag-Starkregenauswertung nach Wiederkehrzeit und Dauer, DVWK Fachauschuss „Niederschlag“, Bonn.
- DVWK (1991):* Starkniederschläge in der Bundesrepublik Deutschland. Erläuterungen und ergänzungen zu Kostra. Kommissionsvertrieb Verlag Paul Parey. Hamburg und Berlin.
- DYCK, S., PESCHKE, G. (1995):* Grundlagen der Hydrologie. Berlin, Verlag für Bauwesen, 536 S.

- DOUGLAS, J.T., GOSS, M.J. HILL, D. (1981): Measurements of pore characteristics in a clay soil under ploughing and direct drilling, including use of radioactive tracer (144 Ce) technique. *Soil Tillage Research*, 1, 11-18.
- DOUGLAS, J.T., JARVIS, M.G., HOWS, K.R., GOSS, M.J. (1986): Structure of a silty soil in relation to management. *Journal of Soil Science*, 3, 137- 151.
- DREES, L.R., KARATHANASIS, A.D., WILDING, L.P. BLEVINS, R.L. (1994): Micromorphological characteristics of long term and no till and conventionally tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am.Proc.*4, 60-64.
- DULEY, F.L., HAYS, O.E. (1932): The effect of the degree of slope on runoff and erosion .- *Journal of Agricultural Research* 45/6, 349-360.
- DUNNE, T., BLACK, R.D. (1970): Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed, *Water Resour. Res.*, 6:1296-1311.
- EBERMAYER, E. (1897): Untersuchungsergebnisse über die Menge und Verteilung der Niederschläge in den Wäldern. *Forstl.-Naturwiss. Zschr.* 6, 283—302.
- ECKHARDT, K.,HAVERKAMP, S., FREDE, H.-G. (2002): SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. Vol 27, ISSUES 9-10, Pages 641-644.*
- EICHHORN, H., TEBRÜGGE F., FREDE, H.G., HARRACH, T. (1991): Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristigen Auswirkungen auf das Ökosystem Boden (in German). *Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung* 32: 65–70.
- ENGLER (1919):Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. *Mitteilungen der Schweizerischen Zentralanstalt für das Forstliche Versuchswesen. Band XII. Zürich.*
- EU (EUROPÄISCHE UNION) (1992): Verordnung (EWG) Nr. 3508/92 des Rates vom 27. November 1992 zur Einführung eines integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems für bestimmte gemeinschaftliche Beihilferegelungen. Brüssel, EU.
- FELDWISCH, N. (1999) Einflüsse land- und forstwirtschaftlicher Maßnahmen auf den Hochwasserabfluß- Wissenstand, Skalenprobleme, Modellansätze. *DVWK Materialien* 7/ 1999.
- FOHRER, N. (1995): Auswirkungen von Bodenfeuchte, Bodenart und Oberflächenbeschaffenheit auf Prozesse der Flächenerosion durch Wasser. *Bodenökologie und Bodengenese. Berlin: Institut für Ökologie*, 19, 188.
- FOHRER, N., HAVERKAMP, S., ECKHARDT, K., FREDE, H.-G. (2001): Hydrologic Response to Land Use Changes on the Catchment Scale. *Phys. Chem. Earth, Vol 26, No. 7-8. 577-582.*
- FOHRER, N., HAVERKAMP, S., FREDE, H.-G. (2005): Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions.- Development of sustainable landuse concepts for low mountain range areas. *Hydrol. Proc.*, 19 (3): 659-672.
- FLACKE, W., AUERSWALD, K. NEUFANG, L. (1990): Combining a modified soil loss equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. - *Catena*, 17: 383-397.
- FLANAGAN D.C., NEARING M.A. (1995): USDA –Water Erosion Prediction Project (WEPP),- Technical Documentation. NSERL Report No. 10, Ed. National Soil Erosion Research Laboratory, USDA-ARS-MWA, West Lafayette.

- FREDE, H.-G., GÄTH, S., LÜTKEMÖLLER, D., BEISECKER, R. (1992):* Differenzierte Porensysteme in ihrer Auswirkung auf den Luft- und Wasserhaushalt. In Friebe, B. (Hrsg.): Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungsmaßnahmen auf das Ökosystem Boden (Beiträge zum 3. Symposium in Gießen, Institut für Landtechnik) Niederkleen, 97-106.
- FREUND, K.L. (1992):* Grundlagen, Ziele und Durchführung der Bodenschätzung. IN: Mitt. Deutscher Bodenkundl. Ges. 67, 213-219.
- FRIELINGHAUS, M., BARKUSKY, D. (1989):* Wassererosion auf Moränenstandorten infolge intensiver Bodenbearbeitung und Belastung durch Mechanisierungsmittel.- Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, 133-141.
- FRIELINGHAUS, M., BRANDHUBER, R., SCHMIDT, W. (2000):* Vorsorge gegen Bodenerosion im Bodenschutzrecht. In: Wasser & Boden 53/9 S. 25-31. Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin
- GATTKER, CH. (2006):* Modellvergleiche zur Untersuchung struktureller Unsicherheiten – Anwendung objektorientierter Methoden in der hydrologischen Modellierung. Dissertation. Fakultät für Bauingenieurwesen. Potsdam.
- GEOGNOSTICS (2005):* Datenbank-Prozessor-Benutzerhandbuch.
- GERLINGER, K. (1997):* Erosionsprozesse auf Lössböden: Experimente und Modellierung.- Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe 194, 236 S.
- GERMANN, P.F. (1990):* Macropores and hydrological hillslope processes. In: Anderson M.B., Burt T.P. (Ed.): Process Studies in Hillslope Hydrology, John Wiley and Sons, 327-363.
- GREEN, W.H., AMPT, G.A. (1911):* Studies on soil physics I: The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Science 4, 1-24.
- GRUNDWÜRMER, J. (1991):* Erfahrungen mit dem Erosionsschutz in der landwirtschaftlichen Praxis. In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Bd. 3 Bodenerosion. Parey – Verlag, Hamburg, Berlin.
- HAMPL, U., (1995):* Bodenschutz ist Hochwasserschutz. Ökologie & Landbau. 23, H 90, 38-39S.
- HAMPL, U. (2005):* 10 Jahre differenzierte Grundbodenbearbeitung im ökologischen Landbau - Methoden und Ergebnisse, S. 13-14, In: Beiträge zur 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Hrsg. J. Heß u. G. Rahmann, Universität Kassel, Kassel.
- HARTGE, K.H. (1978):* Einführung in die Bodenphysik. Enke, Stuttgart.
- HAYS, O.E., MCCALL, A.G., BELL, F.G. (1949):* Investigations in erosion control and reclamation of eroded land at the Upper Mississippi Valley Conservation Experiment, near La Crosse, Wisconsin, 1933-43.-USDA, SCS, Washington, Technical Bulletin 973, 87 S.
- HELBIG, M. (2007):* Bestimmung des k_f -Wertes im Freiland und Labor -ein Methodenvergleich. TU Bergakademie Freiberg. Fachbereich Boden- und Gewässerschutz. Diplomarbeit. Freiberg.
- HELMING, K., ROTH, C.H., BOHL, H. (1994):* Dynamische Eigenschaften der Bodenoberfläche und ihre Bedeutung für die Bildung von Oberflächenabfluss und Erosion, Ergebnisse aus Labor und Felduntersuchungen. In: Sommer, C., Brunotte J., Ortmeier, B. (Hrsg.): Einführung von Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung in die Praxis, Institut für Betriebstechnik, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode, 157-181.

- HENSEL, H., BORK, H.-R. (1988):* EDV-gestützte Bilanzierung von Erosion und Akkumulation kleinen Einzugsgebieten unter Verwendung der modifizierten Universal Soil Loss Equation. - *Landschaftsökologisches Messen und Auswerten*, 2, 2: 107-136.
- HERRMANN, A., KOLL, J., LEIBUNDGUT, CH., MALOSZEWSKI, P., RAU, R., RAUERT, W., SCHÖNIGER, M., STICHLER, W. (1989):* Wasserumsatz in deinem kleinen Einzugsgebiet im paläozoischen Mittelgebirge.- *Landschaftsökologie und Umweltforschung* 17, Institut für Geographie und Geoökologie der TU Braunschweig.
- HEWLETT, J.D. (1982):* Principles of forest hydrology. Athens (Georgia).
- HEWLETT, J.D., HIBBERT, A.R (1967):* Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas, In: W.E. Sopper and H.W. Lull (ed), *Forest Hydrology*, Pergamon Press, 275-290.
- HÖLTING, B. (1996):* Hydrogeologie: Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. 5.Auflage, Stuttgart: Enke.
- HOFFMANN, H.D. (1982)* Die Interzeption einer Fichtenstreudecke im Freiland und Bestand. In Haar, U. de & Hoffmann (Hrsg.): *Wasser aus dem Wald –Wasser für den Wald,- Beiträge zur Hydrologie*, Sonderheft 4, 103-116.
- HORN, R., (1998):* Verdichtungsgefährdung und Regenerationsfähigkeit von Ackerböden – Ergebnisse eines interdisziplinären DFG-Forschungsprogrammes. *Bodenschutz*, 3, S. 71-72.
- HORNE, D.J., ROSS, C.W. HUGHES, K.A., (1992):* 10 years of maize rotation under three tillage systems on a silt loam in New Zealand. 1. A comparison of some soil properties. *Soil Till. Res.* 22 (1-2), 131-143.
- HORTON, R.E. (1933):* The role of infiltration in the hydrological cycle- *Trans. Am. Geophys. Union* 14, 446-460.
- INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZE DES RHEINS (1999):* Wirkungsabschätzung von Wasserrückhalt im Untersuchungsgebiet des Rheins. Koblenz.
- JETTEN, V., DE ROO, A., FAVIS-MORTLOCK, D (1999):* Evaluation of field-scale and catchment scale soil erosion models. *Catena* 37 (1999) 521-541.
- JORDAN, G., VAN ROMPAEY, A., SZILASSI, P., CSILLAG, G., MANNAERTS, C., WOLDAI, T. (2005)* Historical land use changes and their impact on sediment fluxes in the Balaton basin (Hungary). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 108, S. 119-133.
- JOSCHKO, M., BRUNOTTE, J. (1992):* Mulchsaat zu Zuckerrüben und die Entwicklung der Regenwurmdichte. In: *Einführung von Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung in die Praxis*, 4. Zwischenbericht.
- KAINZ, M. (1991):* Schutzmaßnahmen gegen Bodenerosion. In: *Berichte über die Landwirtschaft*. Sonderheft 205. Paul Parey Verlag Hamburg.
- KAINZ, M., AUERSWALD, K., VÖHRINGER, R., (1992):* Comparison of german and swiss rainfall simulators-utility labour demands and costs. -*Z.f. Pflanzenernährung und Bodenkunde* 155, 7-11.
- KARL, J., PORZELT, M. (1976):* Vergleichende Messungen von Abfluss und Bodenabtrag. *Wasser+Abwasser- Bau Intern* 3, 46-48.
- KARL, J. (1979):* Der Einfluss von Standort und Bodennutzung auf Oberflächenabfluß und Bodenabtrag.- *Schriftenreihe des DVWK 40 (Gewässerpflege- Bodennutzung- Landschaftsschutz)*, 268-281.
- KARL, J. (1981):* Bodenerosion durch Oberflächenabfluss. -*Berichte über Landwirtschaft, Neue Folge*, 197. Sonderheft (Beachtung ökologischer Grenzen bei der Landbewirtschaftung), 54-59.

- KARL, J., PORZELT, M., BUNZA, G. (1985): Oberflächenabfluß und Bodenerosion bei künstlichen Starkregen. -DVWK-Schriften 71, 37.102
- KING, P.M. (1981): Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. Australian Journal of Soil Research 19, pp. 275- 285.
- KIRWALD, E. (1969): Wasserhaushalt und Untersuchungsgebiet, gewässerkundliche Untersuchungen im Untersuchungsgebiet der Ruhr in den Jahren 1951-1965.- Band I Forschungsarbeiten des Ruhrtalsperrenvereins Essen, Vulkan Verlag Essen, 404 S.
- KLAGHOFER, E. (1985): Einfluß der landwirtschaftlichen Bodennutzung auf den Oberflächenabfluss bei Starkregen.-Z.F. Kulturtechnik und Flurbereinigung 28. 102-108.
- KNISEL, W.G. (1980): CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. Rep.No.26. US Department of Agriculture.
- KÖPPEN W.P. (1936): Das geographische System der Klimate. In: Köppen, W. & R. Geiger(Hrsg.):Handbuch der Klimatologie. Bd. 1, Teil C. Berlin.
- KTBL (1998): Arbeitspapier 266, Bodenbearbeitung und Bodenschutz- Schlussfolgerungen für die gute fachliche Praxis, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL).
- KÜNSTLE, E., MITSCHERLICH, G. (1977): Photosynthese, Transpiration und Atmung in einem Mischbestand im Schwarzwald- IV. Teil: Bilanz.-Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 148/12, 227-239.
- KUNTZE, H., ROESCHMANN,G., SCHWERDTFEGER, G., (1994) Bodenkunde, 4. Auflage, Stuttgart.
- LADEFOGED, K. (1963): Transpiration of trees in closed stands. - Physiologia plantarum 16, 378-414.
- LAMBERT, B (1998): Hydrologisch-bodenkundliche Beobachtungen und Berechnungsversuche auf Lössäckern im Kraichgau 1996-1998.- Landeskulturgesellschaft BIOPLAN, Sinsheim Steinsfurt, unveröffentlichte Gutachten für die Bundesanstalt für Gewässerkunde.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) (Ed.) (1995): Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz . Stuttgart.
- LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN (1997): Bodenkarte des Freistaates Sachsen 1 : 50 000 (BK50), L5146 Freiberg.
- LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN (2005): ATKIS DLM.
- LANG, W, (1970): Ökologische und hydrologische Untersuchungen in verschieden stark durchforsteten Fichten- und Lärchenbeständen des Schwarzwaldes.- Dissertation an der Universität Freiburg/Br., 85 S.
- LAWS, J.D., PARSONS, D.A. (1943): The relation of raindrop size to intensity. Transactions American Geophysical Union, Part 3, 21, S. 709-721.
- LENHART, T., FOHRER, N., POHLERT, T., BREUER, L., FREDE, H.-G. (2003): Modellierung des Stoffhaushalts in mesoskaligen Einzugsgebieten. Mitteilung. Dsch. Bodenkundl. Gesellsch., 102: S.669-670.
- LEHNHARDT, F. (1985): Einfluß morpho-pedologischer Eigenschaften auf Infiltration- und Abflussverhalten von Waldstandorte.- DVWK Schriften 71. 231-260.
- LEYTON, L., REYNOLDS, E.R.C., THOMPSON, F.B. (1967): Rainfall interception in forest and moorland.-In. Sopper, W.E. & H.W. Lull (Ed.): Forest Hydrology, 163-178.

- LIPIEC, J., KUS, J., SŁOWISKA-JURKIEWICZ, NOSALEWICZ, A. (2006): Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil & Tillage Research* 89 (2006) 210-220.
- LVERMGEO (LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION SACHSEN-ANHALT (2008) <http://www.lvermgeo.sachsen-anhalt.de/de/leistungen/landesaufnahme/dsm/atki-dsm.htm>
- MARKART, G., KOHL, B. (1995): Starkregensimulation und bodenphysikalische Kennwerte als Grundlage der Abschätzung von Abfluss- und Infiltrationseigenschaften alpiner Boden-/Vegetationseinheiten.- Bericht der Forstlichen Bodenversuchsanstalt, Wien 89, 38 S.
- MASUCH, K. (1961): Über Wechselbeziehungen zwischen Hochwasser und Bodennutzung.- *Gerland Beiträge zur Geophysik* 70/4, 233-254.
- MAURER, TH. (1997): Physikalisch begründete, zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten. Dissertation. Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Univeristät Fridericiana zu Karlsruhe.
- MÄGDEFRAU, K. & WUTZ, A. (1951): die Wasserkapazität der Moos- und Flechtendecke des Waldes. -*Forstwissenschaftliches Centralblatt* 70, 103-117.
- MANIAK, U. (2005): Hydrologie und Wasserwirtschaft, Eine Einführung für Ingenieure. Springer Verlag.
- MENDEL, H.-G., FISCHER, P., HERRMANN, A. (1997): Hochwasser: Gedanken über Ursachen und Vorsorge aus hydrologischer Sicht. -Bericht BfG-1022 der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 53 S.
- MENDEL, H.G. (2000): Elemente des Wasserkreislaufs. Eine kommentierte Bibliographie zur Abflussbildung. 1. Auflage. Analytica. Berlin.
- MICHAEL, A. SCHMIDT, J., SCHMIDT, W. (1996): Band II - Parameterkatalog Sachsen, Anwendung. In: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): EROSION 2D/3D – Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Freiberg.
- MICHAEL, A (2000): Anwendung des physikalisch begründeten Erosionsprognosemodells EROSION 2D/3D- Empirische Ansätze zur Ableitung der Modellparameter. Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der TU Bergakademie Freiberg. Dissertation.
- MIELKE, L. N., DORAN, J. W., RICHARDS, K. A. (1986): Physical environment near the surface of ploughed and no-tilled soils. *Soil & Tillage Research* 7, 355-366.
- MILAN FLUG GMBH (2004): Erstellung von zwei hochaufgelösten digitalen Höhenmodellen (1 m Raster) auf der Grundlage des Laserscanverfahrens für zwei Teileinzugsgebiete der Striegis (Oberreichenbacher Bach, Klatschbach). Kamenz, Milan, 27 S. unveröffentlicht.
- MITSCHERLICH, G., MOLL, W. (1970): Untersuchungen über die Niederschlags- und Bodenfeuchtigkeitsverhältnisse in einigen Nadel- und Laubwaldholzbeständen in der Nähe von Freiburg/ Br.- *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 141/3, 49-60.
- MITSCHERLICH, G. (1971): Wissenschaft und Fortschritt aufgezeigt am Beispiel: Wald und Wasser.- *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 141/ 10, 237-246.
- MOLCHANOV, A. A. (1963): The hydrological role of forests – Übersetzung der Originalarbeit von 1960 aus dem Russischen, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem (2. Auflage der Übersetzung: 1966), 407 S.
- MOLLENHAUER, K., MÜLLER, S., WOHLRAB, B. (1985): Oberflächenabfluss und Stoffabtrag von landwirtschaftlich genutzten Flächen- Untersuchungsergebnisse aus dem Untersuchungsgebiet einer Trinkwassertalsperre.- *DVWK Schriften* 71, 103-183 und *Berichte zur Landeskultur* 5, Gießen, 105-183.
- MOORE, R.P.C., BURCH, G.J. (1986): Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects. *Trans. ASAE* 29(6): 1624-1630.

- MOORE, I.D., GRAYSON, R.B. (1991): Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. - *Water Resources Research*, 27, 6: 1177-1191.
- MOORE, I.D., TURNER, A.K., WILSON, J.P., JENSON, S.K., BAND, L.E. (1991): GIS and landsurface-subsurface process modelling. - In: Conference on integrating GIS and environmental modelling, Boulder, CO, 1991.
- MORGAN, R.P.C., QUINTON, J.N., RICKSON, R.J. (1992): EUROSEM: Documentation manual (Version 1). Silsoe College, Silsoe
- MORGAN, R.P.C., QUINTON, J.N., RICKSON, R.J. (1993): EUROSEM: A user guide (Version 2). Silsoe College, Silsoe.
- MOSTAGHIMI, S., DILLAHA, T.A., SHANHOLTZ, V.O. (1987): Runoff, sediment and phosphorus losses from agricultural lands as affected by tillage and residue levels, Optimum erosion control at least coast. - Proceedings of the national symposium on conservations systems, ASAE, Michigan, 236-243.
- MÜLLER, D.H., WENDT, R.C., DANIEL, T.C. (1984): Soil and water losses as affected by tillage and manure applications. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 48, 896-900.
- NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., SRINIVASAN, R., WILLIAMS, J.R. (2002): Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2000. GSWRL Report 02-02, BRC Report 02-06. Texas Water Resources Institute TR-192: College Station, TX. 438 pp.
- NIEHOFF, D. (2002): Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala. Dissertation. Universität Potsdam.
- PATT, H., JÜRGING, P., KRAUS, K. (2004): *Naturnaher Wasserbau: Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern*. Springer Verlag Berlin Heidelberg. 2.Auflage.
- PETELKAU, H. (1983): Ursachen, Entstehung und Prinzipien zur Einschränkung von Bodenstrukturschäden.-Beurteilung und Verbesserung der Bodenstruktur, Tag.-Ber. 215 der Akad. Der Landwirtsch.-Wiss. der DDR, 39-48.
- PARSONS, A.J., ABRAHAMS, A. D., SIMANTON, J.R. (1992): Microtopography and soil surface materials on semi arid, Piedmont hillslopes, Southern Arizona. *J. Arid Environments*, 2: 107-116.
- PLATE, E., PFAUD, A., PASCHKE, G. (1986): Auswirkungen der Waldschäden auf die Wasserwirtschaft aus quantitativer Sicht.- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Institut für Wasser und Abfallwirtschaft, 179 S.
- PIERCE, F.J., FORTIN, M.C., STATON, M.J. (1994): Periodic plowing effects on soil properties in a no-till farming system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58 (6), 1782-1787.
- POLSTER, H. (1950): Die physiologischen Grundlagen der Stofferzeugung im Walde - Untersuchungen über Assimilation, Respiration und Transpiration unter Hauptholzarten. -Bayrischer Landwirtschaftsverlag GmbH München, 96 S.
- POTTER, K.W. (1991): Hydrological impacts of changing land management practices in a moderate-sized agricultural catchment. *Water resources research* 27/5, 845-855.
- PREUSCHEN, G. (1994): Landnutzung und Abfluß. *Ökologie und Landbau. Wald-Wasser-Leben*. 22.Jg. S. 19-24.
- RAKMANOV, V.V. (1966): Role of forests in water conservation– Übersetzung der Originalarbeit von 1962 aus dem Russischen (vodookhrannaya rol'lesov), Israel Program for scientific translations, Jerusalem, 192 S.
- REFSGAARD, J.C., STORM, B. (1995): MIKE SHE. In: Singh, V.P (ed) *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, pp. 809-846.

- REICHE, E.-W. (1998) Bodenschätzungs-Standard-Auswertung Schleswig Holstein (BOSSA-SH)-Übersetzung und Auswertung der Profilbeschreibung der Bodenschätzung als Grundlage für die Bodenbewertung in der Landschaftspflege. Ministerium für Umwelt, Natur und Forsten Schleswig-Holstein, Kiel.
- RENARD, K. G. , FERREIRA, V.A. (1993): RUSLE model description and database sensitivity. J. of Environmental Quality, 22 (3) , S. 458-466.
- RICHTER , G. (1998): Bodenerosion und Kulturlandschaft. In: Bodenerosion –Analyse eines Umweltproblems (Hrsg.) Richter, G. , Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt.
- ROTH, C., BRUNOTTE, J., SOMMER, C. (1990): Die Bedeutung von Verschlammungen und Verdichtungen auf Lössböden für die Auslösung von Bodenabtrag durch Wassererosion. - Zuckerrübe 39, 50-53.
- ROTH, C.H., HELMING, K. (1994): Effect of seedbed preparation on dynamics of surface sealing, runoff and interrill soil loss on loess soils. - Proceedings 13. in. Conf. ISTRO, Aalborg, Dänemark, Vol.1, 117-122.
- RÜTTIMANN, M., SCHRAUB, D., PRASUHN, V., RÜEGG, W., (1995): Measurement of runoff and soil erosion on regularly cultivated fields in Switzerland-some critical considerations.- Catena 25,127-139.
- RUTKOVSKI, V.I. (1948) Klimatologische und hydrologische Rolle des Waldes .-Trudy Zego Vsesojuznogo Geograficeskogo S'ezda 2.
- SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., BRÜMMER, G., HARTGE, K.H., SCHWERTMANN, U. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Auflage, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart
- SCHIFFLER, G.R. (1992): Experimentelle Erfassung und Modellierung der Infiltration stärkerer Niederschläge unter realen Feldbedingungen (Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe , Heft 40). Karlsruhe.
- SCHMIDT, J. (1991): A mathematical model to simulate rainfall erosion. - Catena Suppl., 19: 101-109.
- SCHMIDT, J. (1996): Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter, landwirtschaftlicher Nutzflächen. Berliner Geographische Abhandlungen, 61. Berlin, Institut für Geographische Wissenschaften der Freien Universität, 148 S.
- SCHMIDT, J., VON WERNER, M., MICHAEL, A., SCHMIDT, W. (1999): Planung und Bemessung von Erosionsschutzmaßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. In: Wasser & Boden, 51/12, 19-24. Blackwell Wissenschafts-Verlag. Berlin.
- SCHMIDT, J. (2003) Entwicklung des Simulationskonzepts für die Erweiterung des Infiltrationsmodells (Mehr-Schichten-Ansatz) und die Oberflächenabflussbewegung (Speicher-kaskade). Projektbericht, unveröffentlicht. Freiberg.
- SCHMIDT, T (2003): Einfluss des Mikroreliefs auf die Erodierbarkeit des Bodens und Veränderung des erosionswirksamen Niederschlagsspektrums durch die Krone am Beispiel einer Raupenharvesterbefahrung im Steilhang. Freiburger bodenkundliche Abhandlungen, 41. Freiburg im Breisgau : Inst. für Bodenkunde und Waldernährungslehre, 129 S.
- SCHMIDT, W., STAHL, H. (1996): Bodenerosion durch Wasser- Ein Maßnahmenkatalog . Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.) 2.Auflage. Erfurt.
- SCHMIDT, W., ZIMMERLING, B., NITZSCHE, O., KRÜCK, ST. 2001. Conservation tillage - A new strategy in flood control. 287-293. In J. Marsalek et al. (Hrsg.) Advances in urban stormwater and agricultural runoff source controls. NATO Science series 74. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.

- SCHMIDT, W. (2006A)*: Auswirkungen einer einjährigen konservierenden Bodenbearbeitung auf den Bodenschutz. In: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.) Bodenportal http://www.landwirtschaft.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/7087_7089.htm.
- SCHMIDT, W. (2006B)*: Auswirkungen einer einjährigen konservierenden Bodenbearbeitung auf den Bodenschutz. In: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.) Bodenportal: http://www.forsten.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/7087_7092.htm#Trockenrohdichte.
- SCHMIDT, W. (2008)*: Bewirtschaftungsmethoden. In Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.) Bodenportal: <http://www.forsten.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/7141.htm>.
- SCHOBEL, S., SCHNEIDER, R., SCHRÖDER, D. (1999)*: Beitrag der Bodennutzung zum Hochwasserschutz.- Rundgespräch Dezentraler Hochwasser- und Bodenschutz, 22.Oktober, Geographisches Institut der Universität Heidelberg
- SCHROEDER, M. (1984)*: Die Interzeptionsmessungen an der Großlysimeteranlage St. Arnold.- Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 28, 95-97.
- SCHRÖDER, R. (1998)*: Modellierung von Verschlämmung und Infiltration in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. Bonn: Dissertation der Mathematisch Naturwissenschaftlichen Fakultät.
- SCHULLA, J. (1997)*: Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Diss ETH 12018, Verlag Geographisches Institut ETH Zürich.
- SCHWARZ, O. (1986)*: Zum Abflussverhalten von Waldböden bei künstlicher Beregnung. -In: Einsele (Hrsg): Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbruch. VCH Weinheim, DFG Forschungsbericht, 161-179.
- SCHWARZ, O. (1985)*: Direktabfluss, Versickerung und Bodenabtrag in Waldbeständen, Messungen mit einer transportablen Beregnungsanlage in Baden Württemberg.-DVWK Schriften 71, 185-230.
- SCHWERTMANN, U. (1981)*: Die Vorausschätzung des Bodenabtrags durch Wasser in Bayern. München.
- SCHWERTMANN, U., VOGL, W., KAINZ, M. (1987)*: Bodenerosion durch Wasser. Ulmer, Stuttgart.
- SCS-USDA (SOIL CONSERVATION SERVICE- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE) (1972)*: National Engineering Handbook, Sec. 4, Hydrology. Washington, D.C.: USDA.
- SCS-USDA (SOIL CONSERVATION SERVICE- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE) (1985)*: National Engineering Handbook, Sec. 4, Hydrology. Washington, D.C.: GPO.
- SEMME, H., HORN, R. (1995)*: Auswirkungen konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch –mechanische Kenngrößen von Ackerböden . In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (Ed.): Einführung von Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung in die Praxis. Darmstadt. 205-211.
- SIDIRAS, N., KAHNT, G., KÜBLER, E. (1988)*: Einfluß von Bodenbearbeitung, Kulturart und Zwischenfruchtanbau auf den Bodenabtrag und den Oberflächenabfluss –Journal of Agronomy and Crop Science 160, 22-28.
- SLFL (SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT)/GEOGNOSTICS (2004)*: Abschätzung des Oberflächenabflusses und der Wasserinfiltration auf landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Hilfe des Modells EROSION 3D. Endbericht des FuE-Vorhabens. Leipzig/Berlin, SLfL/Geognostics, 115 S.

- SLFL (SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT)/GEOGNOSTICS (2005)*: Erarbeitung der digitalen Datengrundlage für die Anwendung von EROSION 3D auf mesoskaliger Maßstabsebene mit Durchführung einer Erosionssimulation für das zu bearbeitende Gebiet. Endbericht des FuE-Vorhabens der SLfL. Leipzig/Berlin, SLfL/GeoGnostics, 88 S.
- SLFL (SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT) (2006)*: Dezentraler Hochwasserschutz, Vorbeugende Maßnahmen im ländlichen Raum. 31S.
- SLFUG (SÄCHSICHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE) (2004)*: Ereignisanalyse: Hochwasser August 2002 in den Osterzgebirgsflüssen. Dresden, SLfUG, 188 S.
- SLFUG (2005)*: Karte der Bodenregionen und -landschaften Sachsen. <http://www.umwelt.sachsen.de/lfug>.
- SLFUG (2008)*: Informationen zur Bodenkonzeptkarte www.umwelt.sachsen.de/lfug/boden_1457.html
- SLTV (SÄCHSISCHE LANDESTALSPERRENVERWALTUNG) (2002)*: Niederschlags- und Abflussdaten für die Vorsperre Hölzelbach der Talsperre Saidenbach im Zeitraum Januar-Dezember 2002. Lengefeld, Talsperrenmeisterei Saidenbach
- SMITH, R.E., PARLANGE, J.Y. (1978)* A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resources Research*, 14, 533-538.
- SMITH, R.E. (1992)*: OPUS: An Integrated Simulation Model for Transport of Nonpoint-Source Pollutants at the Field Scale, Vol. I. Documentation. U.S.D.A. Agr. Res. Serv., ARS-98.
- SMUL (SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT) (2003)*: Tagungsband Hochwasserkonferenz 27. November 2002 in Dresden. Dresden, SMUL, 106 S.
- SMUL (SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT) (2005)*: WWW-Informationen zur CIR/BTK. Quelle: www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/f-umweltschutz_6736.html (Umweltdatenkatalog Sachsen).
- SOKOLLEK, V. (1978)*: Untersuchungen über den Einfluss der Landnutzung auf Oberflächenabfluss und Versickerung.- Jahresbericht der Ökologischen Forschungsstation der Universität Gießen 1976/77,119-136.
- SOKOLLEK, V. (1983)*: Der Einfluß der Bodennutzung auf den Wasserhaushalt kleiner Einzugsgebiete in unteren Mittelgebirgslagen. -Dissertation, Universität Gießen, 196 S.
- SRU-RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN (1998)*: Flächendeckend wirksamer Grundwasserschutz- ein Schritt zur dauerhaft umweltgerechten Entwicklung (Sondergutachten). Bundesdrucksache 13/10196. Bonn: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH, 1998.
- STROBL, TH, ZUNIC, F. (2006)*: Wasserbau: Aktuelle Grundlagen, Neue Entwicklungen. Berlin, Heidelberg.
- STRUDLEY, M.W., GREEN, T.R., ASCOUGH, J.C. (2008)*: Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of science. *Soil and Tillage Research* 99 (2008) 4-48.
- SYMADER, W. (1995)*: Schmerzliches Lernen. -Rheinzeitung Koblenz vom 16./17. September, S.12.
- TEBRÜGGE, F., EICHHORN, H. (1992)*: Die ökologischen und ökonomischen Aspekte von Bearbeitungssystemen. In: Friebe, B. (Hrsg.): Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden. Wiss. Fachverlag Dr. Fleck, Niederkleen, 7-20.

- TEBRÜGGE, F., ABELSOVA, J. (1998): Auswirkungen der Pflug-Bodenbearbeitung und Direktsaat auf biogene Durchporung und ungesättigte Infiltrationsleistung des Bodens. Landtechnik, 1, p.
- TEIWES, K. (1988) Einfluss von Bodenbearbeitung und Fahrverkehr auf physikalische Bodeneigenschaften schluffreicher Ackerböden (Dissertation des Fachbereichs Agrarwissenschaften an der Universität Göttingen). Göttingen-
- THIERFELDER, CH., AMÉZQUITA, E., STAHR, K. (2005): Effects of intensifying organic manuring and tillage practices on penetration resistance and infiltration rate. Soil & Tillage Research 82, 211-226.
- TOLDRIAN, H. (1974): Wasser Abfluss und Bodenabtrag in verschiedenen Waldbeständen. – Allgemeine Forstzeitschrift 29/49. 1107-1109.
- US-SCS U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE (1985): SCS National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. USDA Washigton D.C.
- VAN GENUCHTEN, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America. Journal 44, 892-898.
- VAN OOST, K., GOVERS, G., DESMET, P. (2000): Evaluating the effects of changes in landscape structures on soil erosion by water and tillage. Landscape Ecology 15. pp. 577-589.
- VAN ROMPAEY, A., VERSTRAETEN, G., VAN OOST, K., GOVERS, G., POESEN, J. (2001): Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. Earth Surface Processes and Landforms 26 (11), 1221-1236.
- VEREECKEN, H. ET AL. (1989): Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. Soil science 148, 389-403.
- VOGT, J. (1958): Zur historischen Bodenerosion in Mitteldeutschland. Petermanns Geographische Mitteilungen 102, 199– 203.
- VON WERNER, M. (1995): GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Untersuchungsgebieten. Berlin, Institut für Geographische Wissenschaften der Freien Universität, 123 S.
- VON WERNER, M. (2002): Untersuchung prinzipieller Handlungsmöglichkeiten des landwirtschaftlichen Hochwasser- und Bodenschutzes im Hölzelbach-Untersuchungsgebiet für das katastrophale Niederschlagsereignis vom 11. bis 13. August 2002 Ist-Stands-Analyse und Szenarienvergleich mit Hilfe des Simulationsmodell EROSION 3D. Forschungsbericht.
- VON WERNER, M. (2004): Abschätzung des Oberflächenabflusses und der Wasserinfiltration auf landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Hilfe des Modells EROSION 3D. Forschungsbericht.
- VORONKOV, N.A., KOZHEVNIKOV, S.A., PAVLUSHKIN, L.T., SHOMPOLOVA, V.A. (1976): Hydrologic and meteorological role of forest plantations of various tree species.-Soviet Hydrology, Selected Papers 15/1, 75-79.
- WAGENBRETH, O., STEINER, W. (1982): Geologische Streifzüge, Verlag VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- WAHL, N.A., BENS, O., BUCZKO, U., HANGEN, E., HÜTTL, R.F. (2004): effects of conventional and conservation tillage on soil hydraulic properties of a silty-loamy soil. Physics and Chemistry of the Earth 29, 821-829.
- WAHREN, A., Schwärzel, K., Feger, K.H., Münch, A., Dittrich, I. (2007): Identification an model based assessment of potential water retention cased by land use changes. Advances in Geosciences, 11, 49-56.

- WEIHE, J. (1968):* Niederschlagszurückhaltung durch Wald.- Allgemeine Forstzeitschrift 23, 522-524.
- WEIHE, J. (1979):* Der Regenniederschlag im Wald. -Schriftenreihe des DVWK 41, 10-23.
- WENDT, R.C., BURWELL, R.E. (1985):* Runoff and soil losses from conventional, reduced and no till corn.-Journal of Soil and water conservation 33/5, Columbia Missouri, 450-454.
- WILLIAMS, J.R. (1985):* The physical components of EPIC. - In: El-Swaify, S.A., W.C. Moldenhauer und A. Lo (Eds.): Soil erosion and conservation: 272-284. Ankeny.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. (1978):* Predicting rainfall-erosion losses from cropland -a guide to conservation planning. Agricultural handbook, Vol. 537. USDA, Washington, D.C.
- WITTE, W., KRAHE, P. LIEBSCHER, H-J. (1996):* Rekonstruktion der Witterungsverhältnisse im Mittelrheingebiet von 1000 n. Chr. bis heute anhand historischer hydrologischer Ereignisse.- Bericht II-9 der KHR, Internationalen Kommission für die Hydrologie des rheingebietes, Koblenz, 69 S.
- WOOLHISER, D.A., SMITH, R.E., GOODRICH, D.C. (1990):* KINEROS, a kinematic runoff and erosion model, Documentation and user manual. USDA ARS.
- YOUNG, R.A., ONSTAD, C.A. BOSCH, D.D., ANDERSON, W.P. (1987):* AGNPS, Agricultural non-point-source pollution model. A watershed analysis tool. USDA.
- ZILLMANN, E. (1999):* Versuch der Lokalisierung und Interpretation von Feldheterogenitäten anhand von optischen Satellitenaufnahmen. Diplomarbeit. Institut für Landschaftsentwicklung der Technischen Universität Berlin.
- ZIMMERLING, B. (2002) IN:* Sieker et. al. (Hrsg) : Endbericht zum DBU Projekt AZ 15877 „Innovativer Ansatz eines vorbeugenden Hochwasserschutzes durch DEZENTRALE Maßnahmen im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft sowie der Landwirtschaft im Untersuchungsgebiet der Lausitzer Neiße“.
- ZIMMERLING, B. (2004):* Berechnungsversuche zum Infiltrationsverhalten von Ackerböden nach Umstellung der konventionellen auf konservierende Bodenbearbeitung. Dissertation. Universität Hannover.
- ZINKE, P.J. (1967):* Forest interception studies in the United States.- In: Sopper, W.E. & Lull H.W. (Ed.): Forest Hydrology, 137-161.
- ZUIDEMA, P. K. (1985):* Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen. Schriftenreihe: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 79. Zürich, VAW, 150 S.

DIGITALE DATEN

SLFUG (2004A) Bkkonz (Digitale Konzeptbodenkarte) 1: 50000

Bodenflächen und Synoptischen Leitprofile der UG Oberreichenbacher Bach und Klatschbach

SLFUG (2004B): RBS (Digitale Reichsbodenschätzung) 1: 10000 (verändert nach Bräunig, A.)

Bodenflächen und Schichtenverzeichnisse der UG Oberreichenbacher Bach und Klatschbach

SMUL (2004): InVeKoS, Darstellung Feldblöcke (Kulturarten)

Datenzuschnitt der Bearbeitungsgebiete Oberreichenbach und Klatschbach

(LVERMA) LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN (2002) Orthophotos

Datenzuschnitt der Bearbeitungsgebiete Oberreichenbach und Klatschbach

SMUL (1992): CIR/ Biotoptypenkartierung 1992

Datenzuschnitt der Bearbeitungsgebiete Oberreichenbach und Klatschbach

LVERMA (LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN) (2004): ATKIS DLM 25

Datenzuschnitt der Bearbeitungsgebiete Oberreichenbach und Klatschbach

LVERMA (LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN) (2004): ATKIS DGM 25

Datenzuschnitt der Bearbeitungsgebiete Oberreichenbach und Klatschbach

DIN Normen :

DIN 19683. Bestimmung der Korngrößenverteilung nach Köhn

DIN ISO 10694. Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse).

DIN ISO 11272. Bodenbeschaffenheit. Bestimmung der Trockenrohdichte. 2001

DIN 38414-2 Bestimmung der Feldfeuchte

Anhang

A 1 Profilaufnahmen der Beregnungsstandorte

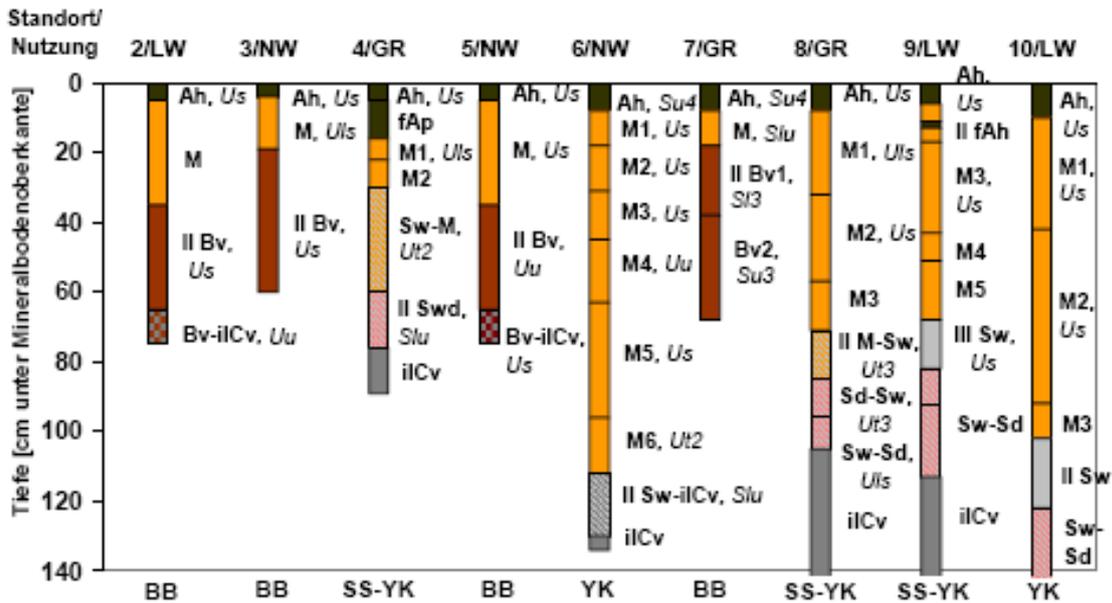


Abb. 78 Bodenprofile der Beregnungsstandorte im UG Oberreichenbach (Quelle: Helbig 2007)

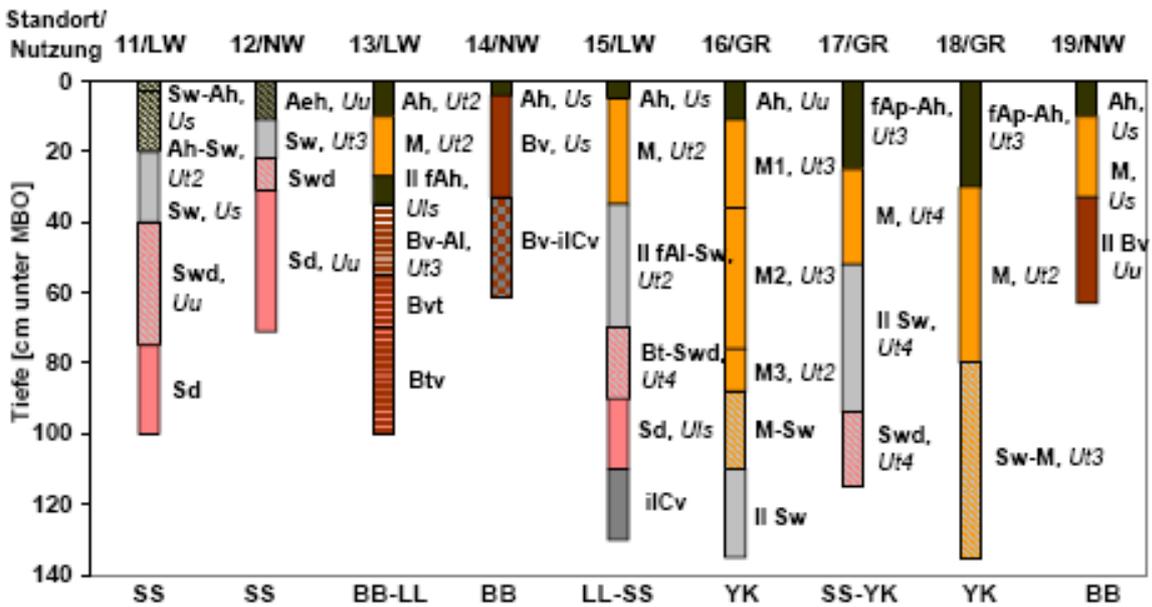


Abb. 79 Bodenprofile der Beregnungsstandorte im UG Oberreichenbach (Quelle: Helbig 2007)

Tab. 10 Kurzcharakterisierung der Beregnungsstandorte

Standortnr.	UG	Relief	Nutzung
1	Oberreichenbach	Unterhang	Nadelwald
2	Oberreichenbach	Unterhang	Laubwald
3	Oberreichenbach	Unterhang	Nadelwald
4	Oberreichenbach	Unterhang	Intensiv-Grünland
5	Oberreichenbach	Unterhang	Nadelwald
6	Oberreichenbach	Unterhang	Nadelwald
7	Oberreichenbach	Unterhang	Intensiv-Grünland
8	Oberreichenbach	Unterhang	Intensiv-Grünland
9	Oberreichenbach	Unterhang	Laubwald
10	Oberreichenbach	Kuppe	Laubwald
11	Klatschbach	Kuppe	Laubwald
12	Klatschbach	Unterhang	Nadelwald
13	Klatschbach	Unterhang	Laubwald
14	Klatschbach	Unterhang	Nadelwald
15	Klatschbach	Unterhang	Laubwald
16	Klatschbach	Unterhang	Intensiv-Grünland
17	Klatschbach	Unterhang	Intensiv-Grünland
18	Klatschbach	Unterhang	Intensiv-Grünland
19	Klatschbach	Unterhang	Nadelwald

A 2 Infiltrationskurven der Berechnungsstandorte

Infiltrationskurven der Grünlandstandorte

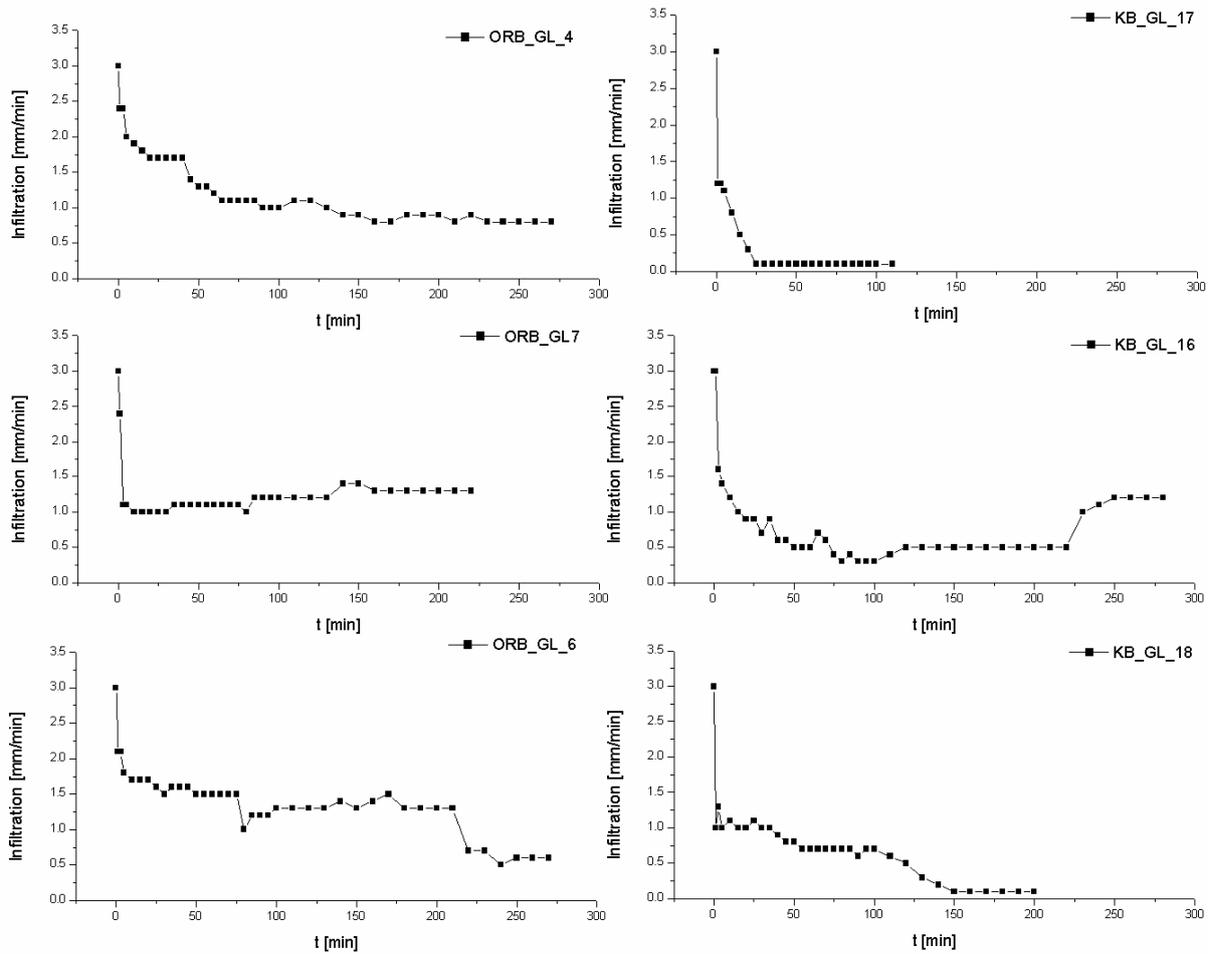


Abb. 80 Infiltrationskurven der Berechnungsstandorte auf Grünland (links: UG Oberreichenbach, rechts: UG Klatschbach)

Infiltrationskurven der Laubwaldstandorte

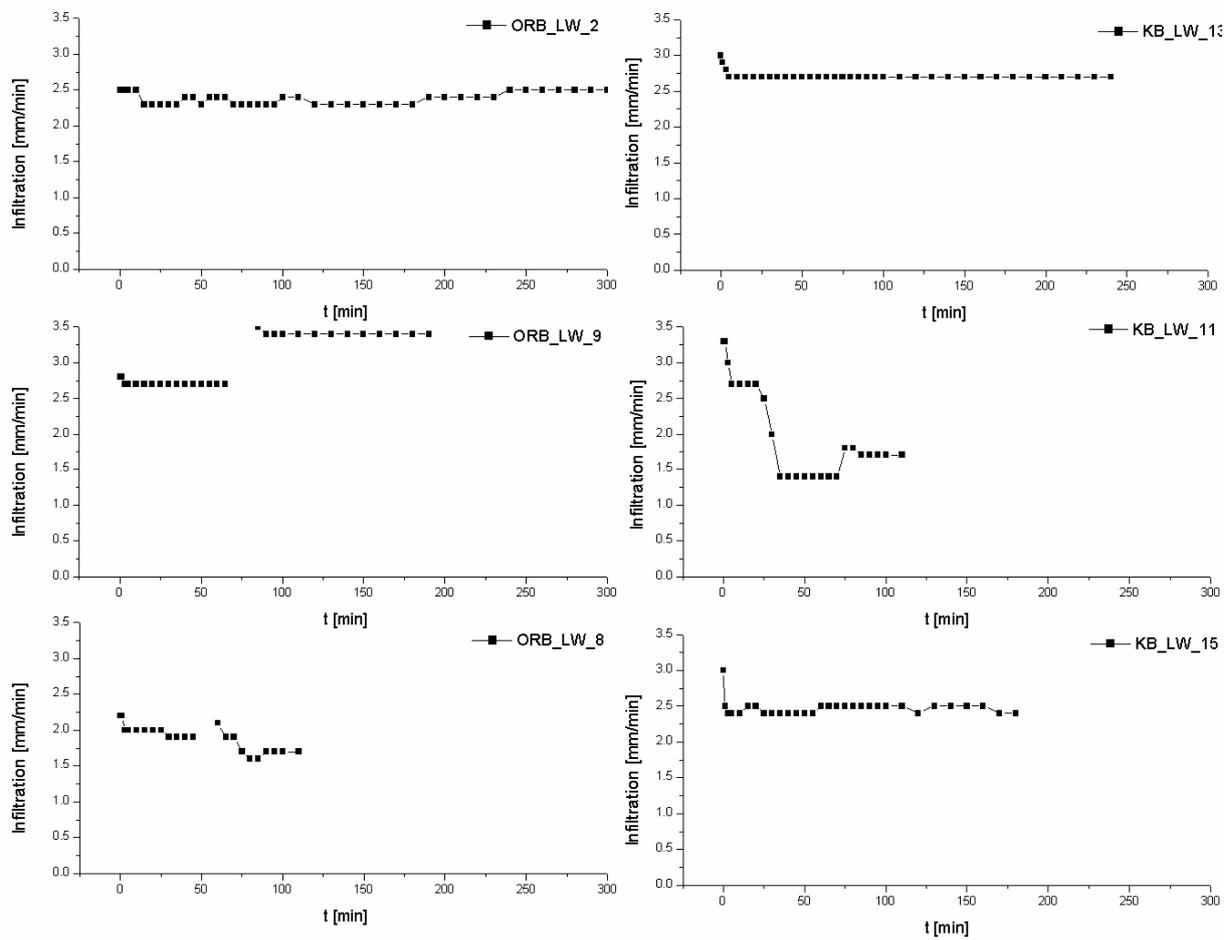


Abb. 81 Infiltrationskurven der Beregnungsstandorte unter Laubwald (links UG Oberreichenbach, rechts: UG Klatschbach)

Infiltrationskurven der Nadelwaldstandorte

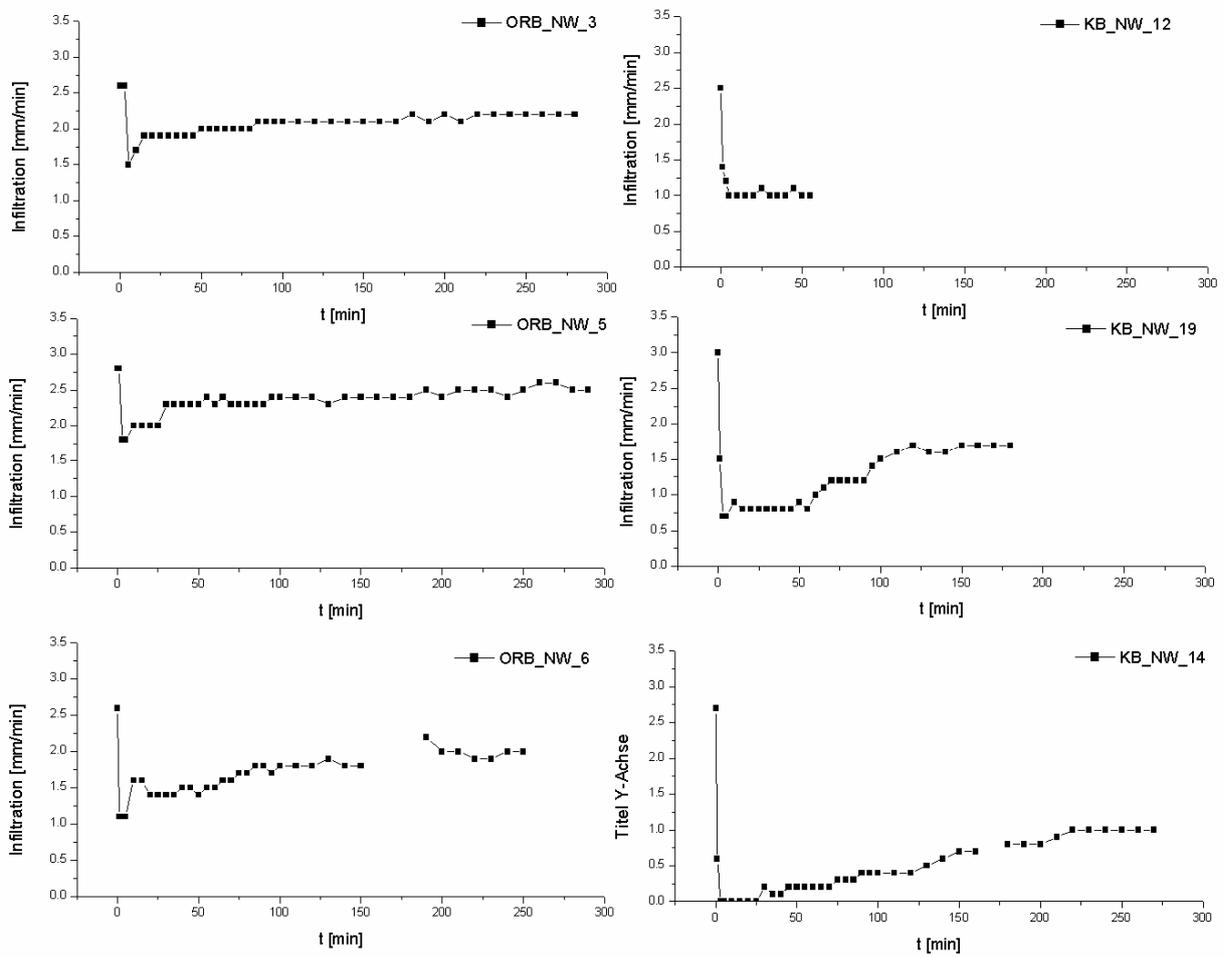


Abb. 82 Infiltrationskurven der Beregnungsstandorte unter Nadelwald (links: UG Oberreichenbach, rechts: UG Klatschbach)

A 3 Bedeckungsgrade der Ackerkulturen

Bedeckungsgrade der betrachteten Ackerkulturen bezüglich der Simulationszeitpunkte Mai und August

Da der Bedeckungsgrad der Ackerfrüchte zum Zeitpunkt des Eintreffens des Starkregenereignisses von entscheidender Bedeutung ist, wurde dieser für die relevanten Kulturen in Abhängigkeit vom Simulationszeitpunkt in Tab. 11 angegeben.

Eine Sonderstellung nimmt hier der Raps ein, da er bereits im Frühsommer geerntet wird und deshalb, im Gegensatz zu allen anderen Kulturen, im August den geringsten Deckungsgrad aufweist.

Tab. 11 Bedeckungsgrade der Ackerkulturen bei konventioneller Bewirtschaftung bezüglich der Simulationszeitpunkte (Quelle: Parameterkatalog Sachsen, *MICHAEL ET AL. 1996*)

Fruchtart	Bedeckungsgrad im Mai [%]	Bedeckungsgrad im August [%]
Silomais	2	82
Kartoffel	8	90
Zuckerrübe	9	100
Winterraps	100	2
Winterweizen	60	84
Wintergerste	74	98
Sommergerste	33	90
Sommerweizen	90	90

Bei Annahme konservierender Bewirtschaftung wird aufgrund der ständigen Mulchbedeckung bei sämtlichen Fruchtarten ein zusätzlicher Bedeckungsgrad von 30 % angesetzt.

A 4 Parametrisierung UG Klatschbach

Tab. 12 Wertebereiche der Parameter in Abhängigkeit der Nutzung (UG Klatschbach)

Schicht	Boden-art	WG mittel [Vol%]	WG hoch [Vol%]	Rauh. [s/m ^{1/3}]	E-wid. [N/m ²]	Deckg [%]	Corg [M%]	Ld [kg/m ³]	Skin [-]
Acker konventionell									
1	Ut4, Tu4	27.5-34.0	39.0-41.0	0.005-0.099	0.0003-0.008	2-100	1.5-1.8	1300-1490	0.06-0.1
2	Ut4	24.0-34.0	28.0-41.0	/	/	/	0-0.6	1500-1800	1
3	Ut4	13.0-34.0	14.0-41	/	/	/	0	1600-1800	1
Acker konservierend									
1	Ut4, Tu4	30.0-35.0	39.0-41.0	0.01-0.1	0.0015-0.0115	32-100	1.5-1.8	1450-1530	2.5-15
2	Ut4	25.5-35.0	28.0-41.0	/	/	/	0-0.6	1500-1800	2.5-15
3	Ut4	14.0-35.0	14.0-41.0	/	/	/	0	1600-1800	1
Grünland/Direktsaat									
1	Ut4, Tu4	27.5-34.0	39.0-41.0	0.3	0.05	90	1.8	1388	37
2	Ut4	24.0-34.0	28.0-41.0	/	/	/	0-0.6	1500-1800	53
3	Ut4	13.0-34.0	14.0-41.0	/	/	/	0	1600-1800	1
Laubwald									
1	Ut4, Tu4	27.5-34.0	39.0-41.0	0.9	0.15	100	4.6	1227	47
2	Ut4	24.0-34.0	28.0-41.0	/	/	/	0-0.6	1500-1800	207
3	Ut4	13.0-34.0	14.0-41.0	/	/	/	0	1600-1800	1
Nadelwald									
1	Ut4, Tu4	32.0-34.0	40.0-41.0	0.9	0.15	100	5.3	1142	14
2	Ut4	32.0-34.0	40.0-41.0	/	/	/	0-0.6	1500-1800	67
3	Ut4	34.0	41.0	/	/	/	0	1600-1800	1

A 5 Beispieldatensatz Eingabeparameter EROSION 3D

Tab. 13 Beispiel eines Eingabeparameterdatensatzes für EROSION 3D

POLY_ID	LAYER_ID	LAYERTHICK	BLKDENSITY	CORG	SKINFACTOR	INITMOIST	ROUGHNESS	ERODIBIL	COVER	FT	MT	GT	FU	MU	GU	FS	MS	GS	ROCKFRAGM
1	0	0.3	1480	1.7	0.8	30	0.017	0.006	74	0	21	0	10	15	20	8	15	11	0
1	1	0.2	1550	0	1	30	0	0	0	0	21	0	10	15	10	14	14	16	5
1	2	100000	1600	0	1	26	0	0	0	0	14	0	9	10	6	20	20	21	75
2	0	0.3	1480	1.5	0.1	32	0.017	0.0008	74	0	10	0	14	14	50	5	4	3	0
2	1	0.3	1700	0.581	1	32	0	0	0	0	10	0	14	14	50	5	4	3	0
2	2	100000	1800	0	1	32	0	0	0	0	10	0	14	14	50	5	4	3	93
3	0	0.3	1385	2.7	8	18	0.3	0.04	90	0	6	0	5	9	4	15	55	6	0
3	1	0.2	1700	0.581	1	18	0	0	0	0	6	0	5	9	4	15	55	6	0
3	2	100000	1700	0	1	13	0	0	0	0	2	0	2	2	1	15	53	25	0
4	0	0.3	1385	2.7	8	30	0.3	0.05	90	0	21	0	10	15	10	14	14	16	0
4	1	0.15	1550	0	1	30	0	0	0	0	21	0	10	15	10	14	14	16	0
4	2	0.2	1600	0	1	30	0	0	0	0	21	0	8	7	8	19	19	18	0
4	3	100000	1650	0	1	24	0	0	0	0	10	0	6	9	10	35	20	10	18
5	0	0.3	1385	2.7	8	30	0.3	0.05	90	0	21	0	10	15	10	14	14	16	20
5	1	0.2	1550	0	1	30	0	0	0	0	21	0	10	15	10	14	14	16	18
5	2	0.15	1600	0	1	30	0	0	0	0	21	0	8	7	8	19	19	18	18
5	3	100000	1650	0	1	26	0	0	0	0	14	0	9	10	6	20	20	21	80

POLY_ID	Nummer der Elementarfläche	ROUGHNESS	Rauhigkeit [s/m ^{1/3}]
LAYER_ID	Schicht der Elementarfläche	ERODIBIL	Erosionswiderstand [N/m ²]
LAYERTHICK	Schichtmächtigkeit [m]	COVER	Deckungsgrad [%]
BLKDENSITY	Lagerungsdichte [kg/m ³]	FTGS	Feinton-....Grobsandfraktion [M%]
CORG	org. Kohlenstoffgehalt [M%]	ROCKFRAG	Grobbodengehalt [M%]
SKINFACTOR	Skinfactor [-]		
INITMOIST	Anfangsbodenfeuchte [Vol%]		

A 6 Ergebnisse der Abfluss- und Erosionsprognosen

A 6.1 Modellergebnisse UG Klatschbach

Simulationszeitpunkt Mai – mittlere Anfangsbodenfeuchte

Tab. 14 Modellergebnisse Klatschbach, Mai, mittlere Anfangsbodenfeuchte

LN	NS	P_Sum [mm]	Gebiets_P [m ³]	Abfluss- koeff	Abfl.BW [%]	Austrag [t/ha]
GL / D	5a	24.1	150864.07	0.000	0.0	0.00
GL / D	20a	41.5	259786.68	0.001	0.1	0.00
GL / D	50a	55.6	348051.55	0.028	2.8	0.02
GL / D	100a	65.1	407520.79	0.046	4.6	0.03
GL / D	Real 2002	190.8	1194392.74	0.487	48.7	0.39
kons	5a	24.1	150864.07	0.034	3.4	0.22
kons	20a	41.5	259786.68	0.113	11.3	0.95
kons	50a	55.6	348051.55	0.251	25.1	3.65
kons	100a	65.1	407520.79	0.375	37.5	5.32
kons	Real 2002	190.8	1194392.74	0.625	62.5	11.38
Pflug	5a	24.1	150864.07	0.326	32.6	52.31
Pflug	20a	41.5	259786.68	0.404	40.4	104.88
Pflug	50a	55.6	348051.55	0.478	47.8	176.36
Pflug	100a	65.1	407520.79	0.542	54.2	224.04
Pflug	Real 2002	190.8	1194392.74	0.584	58.4	241.38
Wald	5a	24.1	150864.07	0.000	0.0	0.00
Wald	20a	41.5	259786.68	0.000	0.0	0.00
Wald	50a	55.6	348051.55	0.002	0.2	0.00
Wald	100a	65.1	407520.79	0.010	1.0	0.00
Wald	Real 2002	190.8	1194392.74	0.432	43.2	0.09

Simulationszeitpunkt Mai – hohe Anfangsbodenfeuchte

Tab. 15 Modellergebnisse Klatschbach, Mai, hohe Anfangsbodenfeuchte

Nutzung	P_Ereignis	P_Sum [mm]	Gebiets_P [m³]	Abfluss- koeff[-]	Abfl.BW [%]	Austrag [t/ha]
GL / D	5a	24.1	150864.07	0.510	51.0	0.10
GL / D	20a	41.5	259786.68	0.594	59.4	0.25
GL / D	50a	55.6	348051.55	0.656	65.6	0.50
GL / D	100a	65.1	407520.79	0.721	72.1	0.58
GL / D	Real 2002	190.8	1194392.74	0.776	77.6	0.75
kons	5a	24.1	150864.07	0.684	68.4	3.31
kons	20a	41.5	259786.68	0.743	74.3	6.69
kons	50a	55.6	348051.55	0.816	81.6	10.83
kons	100a	65.1	407520.79	0.833	83.3	12.98
kons	Real 2002	190.8	1194392.74	0.868	86.8	16.99
Pflug	5a	24.1	150864.07	0.751	75.1	102.52
Pflug	20a	41.5	259786.68	0.832	83.2	199.52
Pflug	50a	55.6	348051.55	0.872	87.2	296.76
Pflug	100a	65.1	407520.79	0.880	88.0	369.71
Pflug	Real 2002	190.8	1194392.74	0.902	90.2	416.79
Wald	5a	24.1	150864.07	0.005	0.5	0.00
Wald	20a	41.5	259786.68	0.253	25.3	0.02
Wald	50a	55.6	348051.55	0.474	47.4	0.12
Wald	100a	65.1	407520.79	0.516	51.6	0.12
Wald	Real 2002	190.8	1194392.74	0.764	76.4	0.23

Simulationszeitpunkt August – mittlere Anfangsbodenfeuchte

Tab. 16 Modellergebnisse Klatschbach, August, mittlere Anfangsbodenfeuchte

K_Aug_M LN	NS	P_Sum [mm]	Gebiets_P[m³]	Abflusskoe ff	Abfl.BW[%]	Austrag [t/ha]
GL / D	5a	24.1	150864.07	0.000	0.0	0.00
GL / D	20a	41.5	259786.68	0.001	0.1	0.00
GL / D	50a	55.6	348051.55	0.028	2.8	0.02
GL / D	100a	65.1	407520.79	0.046	4.6	0.03
GL / D	Real 2002	190.8	1194392.74	0.487	48.7	0.39
kons	5a	24.1	150864.07	0.005	0.5	0.23
kons	20a	41.5	259786.68	0.070	7.0	4.87
kons	50a	55.6	348051.55	0.230	23.0	14.17
kons	100a	65.1	407520.79	0.327	32.7	18.38
kons	Real 2002	190.8	1194392.74	0.608	60.8	39.31
Pflug	5a	24.1	150864.07	0.314	31.4	53.25
Pflug	20a	41.5	259786.68	0.386	38.6	107.27
Pflug	50a	55.6	348051.55	0.467	46.7	181.38
Pflug	100a	65.1	407520.79	0.529	52.9	229.62
Pflug	Real 2002	190.8	1194392.74	0.581	58.1	248.94
Wald	5a	24.1	150864.07	0.000	0.0	0.00
Wald	20a	41.5	259786.68	0.000	0.0	0.00
Wald	50a	55.6	348051.55	0.002	0.2	0.00
Wald	100a	65.1	407520.79	0.010	1.0	0.00
Wald	Real 2002	190.8	1194392.74	0.432	43.2	0.09

Simulationszeitpunkt August – hohe Anfangsbodenfeuchte

Tab. 17 Modellergebnisse Klatschbach, August, hohe Anfangsbodenfeuchte

K_Aug_fL N	NS	P_Sum [mm]	Gebiets_P[m³]	Abflusskoe ff	Abfl.BW[%]	Austrag [t/ha]
GL / D	5a	24.1	150864.07	0.510	51.0	0.10
GL / D	20a	41.5	259786.68	0.594	59.4	0.25
GL / D	50a	55.6	348051.55	0.656	65.6	0.50
GL / D	100a	65.1	407520.79	0.721	72.1	0.58
GL / D	Real 2002	190.8	1194392.74	0.776	77.6	0.75
kons	5a	24.1	150864.07	0.671	67.1	10.81
kons	20a	41.5	259786.68	0.728	72.8	21.96
kons	50a	55.6	348051.55	0.801	80.1	33.95
kons	100a	65.1	407520.79	0.816	81.6	41.27
kons	Real 2002	190.8	1194392.74	0.824	82.4	51.63
Pflug	5a	24.1	150864.07	0.736	73.6	95.31
Pflug	20a	41.5	259786.68	0.814	81.4	182.33
Pflug	50a	55.6	348051.55	0.855	85.5	263.89
Pflug	100a	65.1	407520.79	0.863	86.3	330.46
Pflug	Real 2002	190.8	1194392.74	0.869	86.9	363.85
Wald	5a	24.1	150864.07	0.005	0.5	0.00
Wald	20a	41.5	259786.68	0.253	25.3	0.02
Wald	50a	55.6	348051.55	0.474	47.4	0.12
Wald	100a	65.1	407520.79	0.516	51.6	0.12
Wald	Real 2002	190.8	1194392.74	0.764	76.4	0.23

A 6.2 Modellergebnisse UG Oberreichenbach

Simulationszeitpunkt Mai – mittlere Anfangsbodenfeuchte

Tab. 18 Modellergebnisse Oberreichenbach, Mai, mittlere Anfangsbodenfeuchte

O-Mai_m LN	NS	P_Sum [mm]	Gebiets_P[m ³]	Abflusskoe ff	Abfl.BW[%]	Abtrag [t/ha]
GL / D	5a	24.1	225175.22	0.007	0.7	0.00
GL / D	20a	41.5	387749.86	0.022	2.2	0.00
GL / D	50a	55.6	519491.37	0.035	3.5	0.01
GL / D	100a	65.1	608253.39	0.044	4.4	0.01
GL / D	Real 2002	190.8	1782715.00	0.096	9.6	0.03
kons	5a	24.1	225175.22	0.013	1.3	0.03
kons	20a	41.5	387749.86	0.045	4.5	0.29
kons	50a	55.6	519491.37	0.111	11.1	1.20
kons	100a	65.1	608253.39	0.178	17.8	1.66
kons	Real 2002	190.8	1782715.00	0.132	13.2	1.12
Pflug	5a	24.1	225175.22	0.054	5.4	2.92
Pflug	20a	41.5	387749.86	0.087	8.7	10.05
Pflug	50a	55.6	519491.37	0.144	14.4	24.00
Pflug	100a	65.1	608253.39	0.220	22.0	33.25
Pflug	Real 2002	190.8	1782715.00	0.152	15.2	26.72
Wald	5a	24.1	225175.22	0.001	0.1	0.00
Wald	20a	41.5	387749.86	0.001	0.1	0.00
Wald	50a	55.6	519491.37	0.002	0.2	0.00
Wald	100a	65.1	608253.39	0.004	0.4	0.00
Wald	Real 2002	190.8	1782715.00	0.064	6.4	0.01

Simulationszeitpunkt Mai – hohe Anfangsbodenfeuchte

Tab. 19 Modellergebnisse Oberreichenbach, Mai, hohe Anfangsbodenfeuchte

LN	NS	P_Sum [mm]	Gebiets_P [m ³]	Abfluss koeff	Abfl.BW [%]	Abtrag [t/ha]
GL / D	5a	24.1	225175.22	0.079	7.9	0.01
GL / D	20a	41.5	387749.86	0.327	32.7	0.14
GL / D	50a	55.6	519491.37	0.432	43.2	0.42
GL / D	100a	65.1	608253.39	0.509	50.9	0.47
GL / D	Real 2002	190.8	1782715.00	0.374	37.4	0.34
kons	5a	24.1	225175.22	0.372	37.2	1.32
kons	20a	41.5	387749.86	0.489	48.9	3.06
kons	50a	55.6	519491.37	0.573	57.3	5.33
kons	100a	65.1	608253.39	0.621	62.1	6.35
kons	Real 2002	190.8	1782715.00	0.453	45.3	5.09
Pflug	5a	24.1	225175.22	0.377	37.7	17.56
Pflug	20a	41.5	387749.86	0.489	48.9	35.96
Pflug	50a	55.6	519491.37	0.573	57.3	57.45
Pflug	100a	65.1	608253.39	0.616	61.6	70.26
Pflug	Real 2002	190.8	1782715.00	0.475	47.5	66.05
Wald	5a	24.1	225175.22	0.007	0.7	0.00
Wald	20a	41.5	387749.86	0.053	5.3	0.01
Wald	50a	55.6	519491.37	0.251	25.1	0.08
Wald	100a	65.1	608253.39	0.275	27.5	0.09
Wald	Real 2002	190.8	1782715.00	0.314	31.4	0.10

Simulationszeitpunkt August – mittlere Anfangsbodenfeuchte

Tab. 20 Modellergebnisse Oberreichenbach, August, mittlere Anfangsbodenfeuchte

LN	NS	P_Sum [mm]	Gebiets_P [m ³]	Abfluss koeff	Abfl.BW [%]	Abtrag [t/ha]
GL / D	5a	24.1	225175.22	0.007	0.7	0.00
GL / D	20a	41.5	387749.86	0.022	2.2	0.00
GL / D	50a	55.6	519491.37	0.035	3.5	0.01
GL / D	100a	65.1	608253.39	0.044	4.4	0.01
GL / D	Real 2002	190.8	1782715.00	0.096	9.6	0.03
kons	5a	24.1	225175.22	0.021	2.1	0.13
kons	20a	41.5	387749.86	0.060	6.0	0.71
kons	50a	55.6	519491.37	0.127	12.7	2.83
kons	100a	65.1	608253.39	0.189	18.9	3.66
kons	Real 2002	190.8	1782715.00	0.146	14.6	3.12
Pflug	5a	24.1	225175.22	0.061	6.1	4.11
Pflug	20a	41.5	387749.86	0.102	10.2	12.19
Pflug	50a	55.6	519491.37	0.163	16.3	26.48
Pflug	100a	65.1	608253.39	0.241	24.1	36.24
Pflug	Real 2002	190.8	1782715.00	0.173	17.3	25.30
Wald	5a	24.1	225175.22	0.001	0.1	0.00
Wald	20a	41.5	387749.86	0.001	0.1	0.00
Wald	50a	55.6	519491.37	0.002	0.2	0.00
Wald	100a	65.1	608253.39	0.004	0.4	0.00
Wald	Real 2002	190.8	1782715.00	0.064	6.4	0.01

Simulationszeitpunkt August – hohe Anfangsbodenfeuchte

Tab. 21 Modellergebnisse Oberreichenbach, August, hohe Anfangsbodenfeuchte

O_Aug_fL N	NS	P_Sum [mm]	Gebiets_P[m³]	Abflusskoe ff	Abfl.BW [%]	Austrag [t/ha]
GL / D	5a	24.1	225175.22	0.079	7.9	0.01
GL / D	20a	41.5	387749.86	0.327	32.7	0.14
GL / D	50a	55.6	519491.37	0.432	43.2	0.42
GL / D	100a	65.1	608253.39	0.509	50.9	0.47
GL / D	Real 2002	190.8	1782715.00	0.374	37.4	0.34
kons	5a	24.1	225175.22	0.323	32.3	2.51
kons	20a	41.5	387749.86	0.457	45.7	5.96
kons	50a	55.6	519491.37	0.545	54.5	10.58
kons	100a	65.1	608253.39	0.599	59.9	12.61
kons	Real 2002	190.8	1782715.00	0.391	39.1	9.17
Pflug	5a	24.1	225175.22	0.361	36.1	18.68
Pflug	20a	41.5	387749.86	0.474	47.4	37.40
Pflug	50a	55.6	519491.37	0.558	55.8	59.87
Pflug	100a	65.1	608253.39	0.605	60.5	74.50
Pflug	Real 2002	190.8	1782715.00	0.473	47.3	67.22
Wald	5a	24.1	225175.22	0.007	0.7	0.00
Wald	20a	41.5	387749.86	0.053	5.3	0.01
Wald	50a	55.6	519491.37	0.251	25.1	0.08
Wald	100a	65.1	608253.39	0.275	27.5	0.09
Wald	Real 2002	190.8	1782715.00	0.314	31.4	0.10

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe, die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich keine Unterstützungsleistungen erhalten.

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die nicht als solche kenntlich gemacht worden sind.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Freiberg, den 30.06.2008