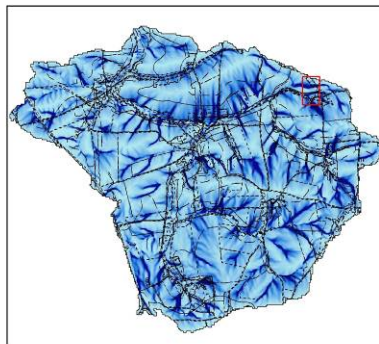
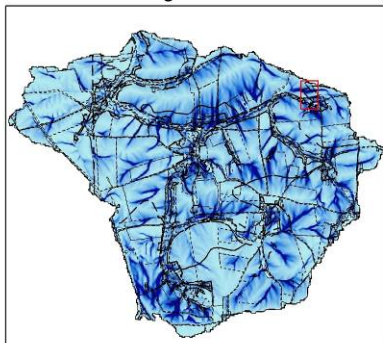


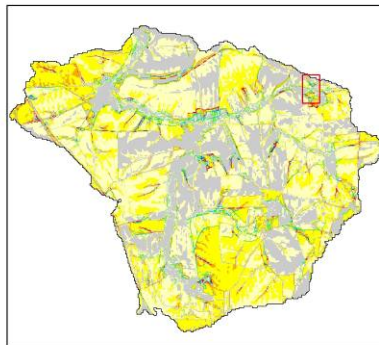
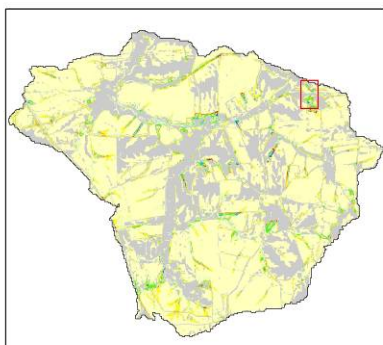


Das Lebensministerium

Abfluss



Erosion/  
Deposition



## Validierung EROSION 3D

Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Heft 15/2009

Freistaat  Sachsen

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

**Prüfung und Validierung des neu entwickelten Oberflächenabflussmoduls des Modells  
EROSION 3D im Zusammenhang mit Maßnahmen des vorsorgenden Hochwasserschutzes  
auf landwirtschaftlich genutzten Flächen**

Marcus Schindewolf, Dr. Walter Schmidt

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Zielstellung .....	3
1.3	Aufgaben .....	3
1.4	Hochwasserrelevanter Oberflächenabfluss und modellseitige Abbildung .....	4
<b>2</b>	<b>Material und Methoden.....</b>	<b>4</b>
2.1	Hydrologische Modellierung .....	4
2.1.1	Modelltypen .....	5
2.2	Modellbeschreibung .....	6
2.2.1	EROSION 3D .....	6
2.2.2	WaSiM-ETH .....	10
2.3	Datengrundlagen.....	13
2.3.1	Klimadaten .....	14
2.3.2	Abflussdaten .....	14
2.3.3	Reliefdaten .....	16
2.3.4	Bodendaten.....	16
2.3.5	Landnutzungsdaten.....	17
2.4	Bearbeitungsebenen .....	18
2.4.1	Standortskala .....	18
2.4.2	Plotskala.....	19
2.4.3	Einzugsgebiet-Skala.....	19
2.5	Sensitivitätsanalyse.....	19
2.6	Niederschlags-Abfluss-Simulationen.....	21
2.6.1	EROSION 3D .....	22
2.6.2	Wasserhaushaltssimulation mit WaSiM-ETH .....	23
2.7	Modellgüte.....	23
2.8	Modellkalibrierung .....	24
2.9	Modellparametrisierung.....	25
2.9.1	EROSION 3D .....	25
2.9.2	WaSiM-ETH .....	27
<b>3</b>	<b>Untersuchungsgebiete .....</b>	<b>28</b>
3.1	Standortskala .....	28
3.2	Plot-Skala.....	29
3.3	Einzugsgebiet-Skala.....	30
3.3.1	Einzugsgebiet Saidenbachtalsperre .....	30
3.3.1.1	Lage und Ausdehnung .....	30
3.3.1.2	Klima .....	31
3.3.1.3	Geologischer Untergrund, Boden und Relief.....	32

3.3.1.4	Landnutzung .....	33
3.3.2	Stausee Baderitz .....	34
3.3.2.1	Lage und Ausdehnung .....	34
3.3.2.2	Klima .....	35
3.3.2.3	Geologischer Untergrund, Boden und Relief .....	35
3.3.2.4	Landnutzung .....	36
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>37</b>
4.1	Sensitivitätsanalyse.....	37
4.2	Prozessabbildung.....	49
4.2.1	Verschlämmung und Makroporeninfiltration .....	49
4.2.2	Abflussverzögerung im Gerinne .....	52
4.2.3	Drainageabflüsse und Interflow.....	53
4.3	Felduntersuchungen in der Standortskala.....	53
4.3.1	Standort Lüttewitz.....	53
4.3.2	Mockritz.....	54
4.4	N-A-Simulation Plot-Skala.....	55
4.5	NA-Simulationen EZG-Skala E3D.....	57
4.5.1	Rechengüte.....	57
4.5.1.1	Abbildung des Abflussverlaufs und der Abflussverzögerung.....	57
4.5.1.2	Abbildung der Oberflächenabflussmenge .....	60
4.5.1.3	Einfluss der Datengrundlage auf die Oberflächenabflussmenge.....	64
4.5.2	Simulation von Landnutzungsszenarien.....	66
4.6	Erarbeiten und Testen von Modellverbesserungen .....	70
4.6.1	Optimierung der Datengrundlage für EROSION 3D .....	70
4.6.2	Verbesserte Abbildung der Konservierenden Bodenbearbeitung.....	71
4.6.3	Verbesserung der Initialbedingungen (Bodenfeuchte) .....	78
4.6.3.1	Testen des Topographischen Bodenfeuchteindex in der Mehrschichtversion.....	79
4.6.3.2	Testen der WaSiM-ETH Anfangsbodenfeuchten mit der Mehrschichtversion von EROSION 3D .....	80
4.6.4	Verbesserungsvorschläge für den Datenbankprozessor DPROC.....	82
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerung .....</b>	<b>84</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>87</b>
<b>7</b>	<b>Quellenverweis .....</b>	<b>87</b>
<b>8</b>	<b>Glossar .....</b>	<b>95</b>
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>97</b>
9.1	Handlungsempfehlung für den sachgerechten Umgang mit EROSION 3D.....	97
9.1.1	Datenzusammenstellung und Aufbereitung.....	97
9.1.1.1	Einzugsgebietsgrenze .....	97
9.1.1.2	Niederschlagsdaten.....	97
9.1.1.3	Reliefdaten .....	98

9.1.1.4	Bodendaten.....	99
9.1.1.4.1	Bodenübersichtskarte (BÜK 200).....	99
9.1.1.4.2	Konzeptbodenkarte (BKkonz 50).....	99
9.1.1.4.3	Reichsbodenschätzung (RBS 10).....	100
9.1.1.5	Landnutzungsdaten.....	100
9.1.1.5.1	ATKIS DLM.....	100
9.1.1.5.2	Feldblöcke.....	100
9.1.1.5.3	Schlagdaten.....	100
9.1.1.5.4	Abflussdaten.....	101
9.1.2	Erstellen von Eingangsparameterdateien mit dem Datenbankprozessor (DPROC).....	101
9.1.3	Simulation mit EROSION 3D.....	103

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Datengrundlagen in EROSION 3D und WaSiM-ETH .....	13
Tabelle 2:	Verwendete meteorologische Daten, Stationen, Auflösung und Normierung .....	14
Tabelle 3:	Verwendete Abflussdaten.....	15
Tabelle 4:	Verwendete digitale Bodeninformationen .....	17
Tabelle 5:	Verwendete Landnutzungsinformation .....	18
Tabelle 6:	Charakteristika der verwendeten Niederschlagsereignisse .....	21
Tabelle 7:	Datenhierarchie bei der Parametrisierung .....	25
Tabelle 8:	Parametrisierung der Bodenbearbeitungen .....	26
Tabelle 9:	Bearbeitungsvarianten und -tiefen des Bodenbearbeitungsversuches in Lüttewitz .....	28
Tabelle 10:	Bearbeitungsvarianten und -tiefen des Bodenbearbeitungsversuchs Mockritz .....	29
Tabelle 11:	Beregnungsversuche in Methau mit Angaben zur Kulturart, der Bearbeitungs- variante und Bearbeitungstiefe (LfUG 1994) .....	30
Tabelle 12:	Anteilige Flächennutzung der Teileinzugsgebiete Lippersdorfer Bach und Hölzelbergbach.....	33
Tabelle 13:	Sensitivitäten Schicht 2 – E3D - Ver. 3.11 .....	39
Tabelle 14:	Sensitivitäten Schicht 2 – E3D - Ver. 3.14 .....	40
Tabelle 15:	Randbedingungen der Beregnungsversuche in Lüttewitz .....	54
Tabelle 16:	Ergebnisse der Beregnungsversuche in Lüttewitz.....	54
Tabelle 17:	Randbedingungen der Beregnungsversuche in Mockritz .....	55
Tabelle 18:	Ergebnisse der Beregnungsversuche in Mockritz .....	55
Tabelle 19:	Mit E3D ermittelte Abflussvolumina der Plot-Versuche in Methau, mit und ohne Korrektur der Bearbeitungshorizonte.....	56
Tabelle 20:	Abfluss- und Abflussscheitelverzögerung.....	58
Tabelle 21:	Abweichungen in der Oberflächenabflussmenge ohne und mit Verzögerung durch Nutzung von Translations- und Retentionsansatz .....	60
Tabelle 22:	Abweichungen simulierter und gemessener Oberflächenabflüsse (E3D – Ver. 3.11, Einschicht-Infiltrationsansatz) .....	61
Tabelle 23:	Abweichungen simulierter und gemessener Oberflächenabflüsse (E3D – Ver. 3.11, Mehr-Schicht-Infiltrationsansatz).....	62
Tabelle 24:	Abweichungen simulierter und gemessener Oberflächenabflüsse (E3D – Ver. 3.14, Mehr-Schicht-Infiltrationsansatz).....	62
Tabelle 25:	Einfluss der Datenlage auf das Simulationsergebnis hinsichtlich Oberflächenabflussmenge Q (Abschätzung mit E3D – Ver. 3.11).....	65
Tabelle 26:	Vergleich der Einflüsse der Bodenbearbeitung mit Pflug bzw. Grubber auf die Oberflächenabflussmenge Q (Abschätzung mit E3D – Ver. 3.11).....	67
Tabelle 27:	Vergleich der Einflüsse der Bodenzustände unverschlämmt bzw. verschlämmt auf die Oberflächenabflussmenge Q (Abschätzung mit E3D – Ver. 3.11 mit Ein-Schicht- bzw. Mehr-Schicht-Infiltrationsansatz).....	68

Tabelle 28:	Vergleich verschiedener Nutzungsszenarien (ackerbauliche Nutzung bzw. Grünlandnutzung) auf das Infiltrationsverhalten (Abschätzung mit E3D – Ver. 3.11 mit Ein-Schicht- bzw. Mehr-Schicht-Infiltrationsansatz) .....	69
Tabelle 29:	Abweichung (in %) von mit E3D (Ver. 3.11) simulierten Oberflächenabflüsse ( $\Delta Q$ Sim) für effektive Lagerungsdichte und Trockenrohdichte im Vergleich zu Messwerten im EZG Lippersdorfer Bach.....	70
Tabelle 30:	Abweichung (in %) von mit E3D (Ver. 3.14) simulierten Oberflächenabflüsse ( $\Delta Q$ Sim) für effektive Lagerungsdichte und Trockenrohdichte im Vergleich zu Messwerten im EZG Baderitz.....	70
Tabelle 31:	Vergleich der Korrekturen (Trockenrohdichte, Skinfaktor) zur verbesserten Abbildung der konservierenden Bodenbearbeitung hinsichtlich Oberflächen-abfluss mit E3D - Ver. 3.11 am Beispiel des Lippersdorfer Baches.....	72
Tabelle 32:	Vergleich der Korrekturen (Trockenrohdichte, Skinfaktor) zur verbesserten Abbildung der konservierenden Bodenbearbeitung hinsichtlich Oberflächen-abfluss mit E3D - Ver. 3.14 am Beispiel des Lippersdorfer Baches.....	72
Tabelle 33:	Szenarienvergleich unverschlämmte vs. verschlämmte Feldzustände bei unterschiedlichen Feldkulturen bzw. Bodenbearbeitung - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14 .....	73
Tabelle 34:	Szenarienvergleich Grubber vs. Pflug - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14 .....	74
Tabelle 35:	Szenarienvergleich unverschlämmte vs. verschlämmte Feldzustände bei unterschiedlicher Feldkultur bzw. Bodenbearbeitung - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14 .....	74
Tabelle 36:	Szenarienvergleich Grubber vs. Pflug - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14 .....	75
Tabelle 37:	Szenarienvergleich unverschlämmte vs. verschlämmte Feldzustände - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14 .....	75
Tabelle 38:	Szenarienvergleich Grubber vs. Pflug Korrektur – Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14 .....	76
Tabelle 39:	Szenarienvergleich unverschlämmte vs. verschlämmte Feldzustände - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14 .....	76
Tabelle 40:	Szenarienvergleich Grubber vs. Pflug Korrektur Skinfaktor konservierende Bearbeitung - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14 .....	77
Tabelle 41:	Vergleich der simulierten Oberflächenabflüsse bei Bodenfeuchtegenerierung mit DPROC und Modifizierung mit Topographischen Index Ver. 3.11 .....	79
Tabelle 42:	Gütemaße der kontinuierlichen Wasserhaushaltssimulation mit WaSiM-ETH .....	80
Tabelle 43:	Mit EROSION 3D (Ver. 3.11 und 3.14) ermittelte Oberflächenabflüsse bei mit WaSiM-ETH bestimmten Ausgangsbodenfeuchten (Initial) und „normaler“ bzw. abgeschätzter Bodenfeuchte (BF normal) (lineare Abflussabtrennung) .....	81

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich der Abflussganglinienseparation am Beispiel des Einzugsgebietes des Lippersdorfer Baches am 10.05.2004 (Talsperre Saidenbach).....	16
Abbildung 2: Simulationsszenarien für EROSION 3D .....	26
Abbildung 3: EZG Lippersdorf, Lage und Relief .....	31
Abbildung 4: Bodentypen und Bodenarten im EZG Lippersdorf.....	33
Abbildung 5: Landnutzung im EZG Lippersdorf.....	34
Abbildung 6: EZG Baderitz, Lage und Relief.....	35
Abbildung 7: Bodentypen und Bodenarten im EZG Baderitz.....	36
Abbildung 8: Landnutzung im EZG Baderitz .....	37
Abbildung 9: Modellsensitivitäten für den Parameter Passierzeit (erster Bodenhorizont) .....	38
Abbildung 10: Modellsensitivitäten für den Parameter Summe der Infiltrationsraten in der parametrisierten Schicht (erster Bodenhorizont) .....	38
Abbildung 11: Modellsensitivitäten für den Parameter Gesamteindringtiefe der Befeuchtungsfront (erster Horizont) .....	38
Abbildung 12: Modellsensitivitäten für den Parameter Summe der Infiltrationsraten (erster Bodenhorizont) .....	39
Abbildung 13: Abhängigkeit der Eindringtiefe der Befeuchtungsfront von der Bodenart (erster Horizont).....	41
Abbildung 14: Abhängigkeit der Passierzeit von der Bodenart (erster Horizont).....	41
Abbildung 15: Passierzeit der parametrisierten Schicht bei Korngrößenverteilung nach KA5 und USDA .....	42
Abbildung 16: Infiltration der Modellversion 3.11 und 3.14 in Abhängigkeit des Skinfaktors .....	43
Abbildung 17: Infiltrationsrate und Eindringtiefe beider Modellversionen 3.11 und 3.14 .....	44
Abbildung 18: Bodenfeuchteverlauf im Anbaujahr 2006 in Lüttewitz bei unterschiedlicher Bearbeitung (Bodenwassergehalt in 30 cm Bodentiefe).....	44
Abbildung 19: Zusammenhang Skinfaktor und Bodenfeuchte E3D - Ver. 3.11 .....	46
Abbildung 20: Infiltrationsraten bei verschiedenen Bearbeitungsverfahren (Pflug, Grubber, mit E3D - Ver. 3.11 berechnet).....	47
Abbildung 21: Abhängigkeit des Verschlammungsfaktors von der Niederschlagsintensität und dem Bedeckungsgrad, nach NIEHOFF (2002) .....	51
Abbildung 22: Abflussverlauf ohne und mit Korrektur der Bearbeitungshorizonte (Bodenbearbeitungsversuch Methau, Beregnungsversuch 71 – Grubbervariante, Bodenerosionsmessung Sachsen 1994).....	57
Abbildung 23: Simulation Abflussverlauf mit E3D (Ver. 3.11) ohne und mit Abflussverzögerung durch Nutzung von Translations- und Retentionsansatz (EZG Lippersdorfer Bach, Niederschlagsereignis vom 06.05.2004) .....	58
Abbildung 24: Gemessene und mit E3D (Ver. 3.11) simulierte Abflussverzögerung (EZG Baderitz, Niederschlagsereignis vom 18.11.2004) .....	59



Abbildung 25: Oberflächenabfluss EZG Hölzelbergbach, Vergleich der Modellversionen (Niederschlagsmessung vom 11.08.2002) .....	63
Abbildung 26: Abhängigkeit des Simulationsergebnisses von der Datengrundlage (EZG Baderitz, Niederschlagsereignis vom 05.07.2005) .....	66
Abbildung 27: Simulierter Oberflächenabfluss in Abhängigkeit der Landnutzung (EZG Baderitz, Niederschlagsereignis vom 22.07.2004, E3D; Ver. 3.11).....	69
Abbildung 28: N-A-Simulation mit E3D (Ver. 3.14) für das EZG Baderitz in Abhängigkeit von effektiver Lagerungsdichte bzw. von der Trockenrohdichte, (mittlere Boden- feuchte, Niederschlagsereignis vom 18.11.2004).....	71
Abbildung 29: Verbesserung der Szenarienrechnung durch Korrektur der Datengrundlage (E3D – Ver. 3.14, Infiltrationskorrektur 20.07.2004) .....	78
Abbildung 30: Unsicherheiten in der mit WASiM-ETH simulierten Gebietsreaktion im EZG- Lippersdorf (Berechnungszeitraum 2004) .....	81
Abbildung 31: Räumliche Verteilung des Abflusses bei Bodenfeuchtebestimmung über Wasserhaushaltssimulation und Topographischen Index (EZG Hölzelbergbach vom 16.07.2002).....	82

## Anhangsverzeichnis

Tabelle A 1: Aufbau der Niederschlagsdaten .....	98
Tabelle A 2: Sensitivitäten Schicht 3 (EROSION 3D - Ver. 3.11).....	108
Tabelle A 3: Sensitivitäten Schicht 3 (EROSION 3D - Ver. 3.14) .....	109
Tabelle A 4: Bearbeitungsgänge und Parametrisierung der Plotversuche .....	118
Abbildung A 1: Ist-Stand-Nutzung und Bearbeitung im EZG Baderitz – 2004 .....	105
Abbildung A 2: Ist-Stand-Nutzung und Bearbeitung im EZG Baderitz - 2005 .....	105
Abbildung A 3: Ist-Stand-Nutzung und Bearbeitung im EZG Lippersdorfer Bach 2004 .....	106
Abbildung A 4: Ist-Stand-Nutzung und Bearbeitung im EZG Lippersdorfer Bach 2005 .....	106
Abbildung A 5: EZG Hölzelbergbach, Lage und Relief .....	107
Abbildung A 6: Landnutzung im Hölzelbergbach-EZG.....	107
Abbildung A 7: Bodentypen und Bodenarten im EZG Hölzelbergbach .....	108
Abbildung A 8: Modellsensitivitäten der EROSION 3D - Ver. 3.11 im zweiten Horizont .....	109
Abbildung A 9: Modellsensitivitäten der E3D - Ver. 3.14 im zweiten Horizont .....	110
Abbildung A 10: Modellsensitivitäten der EROSION 3D - Ver. 3.11 im dritten Horizont.....	110
Abbildung A 11: Modellsensitivitäten der EROSION 3D - Ver. 3.14 im dritten Horizont.....	111
Abbildung A 12: Abhängigkeit der Summe der Infiltrationsraten von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.11).....	111
Abbildung A 13: Abhängigkeit der Summe der Infiltrationsraten von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.11).....	112
Abbildung A 14: Abhängigkeit der Gesamteindringtiefe und Passierzeit von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.11).....	112
Abbildung A 15: Abhängigkeit der Summe der Infiltrationsraten von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.11).....	113
Abbildung A 16: Abhängigkeit der Gesamteindringtiefe und Passierzeit von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.11).....	113
Abbildung A 17: Abhängigkeit der Summe der Infiltrationsraten von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.14).....	114
Abbildung A 18: Abhängigkeit der Summe der Infiltrationsraten von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.14).....	114
Abbildung A 19: Abhängigkeit der Gesamteindringtiefe und Passierzeit von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.14).....	115
Abbildung A 20: Abhängigkeit der Summe der Infiltrationsraten von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.14).....	115
Abbildung A 21: Abhängigkeit der Gesamteindringtiefe und Passierzeit von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.14).....	116
Abbildung A 22: Einfluss der Klassifizierungsmethode zur Körngrößenverteilung auf die Modellsensitivität (EROSION 3D - Ver. 3.11).....	116

Abbildung A 23: Einfluss der Klassifizierungsmethode zur Körngrößenverteilung auf die Modellsensitivität (EROSION 3D - Ver. 3.14).....	117
Abbildung A 24: Räumliche Verteilung des Oberflächenabflusses in Abhängigkeit von Bodenart und Landnutzung im Hölzelbergbach-EZG (11.08.2002).....	119
Abbildung A 25: Räumliche Verteilung des Oberflächenabflusses in Abhängigkeit von Bodenart und Landnutzung im Hölzelbergbach-EZG (16.07.2002).....	119
Abbildung A 26: Änderung der räumlichen Verteilung des Oberflächenabflusses bei Bodenfeuchtegenerierung über den Topographischen Index .....	120
Abbildung A 27: Räumliche Verteilung des Oberflächenabflusses bei Korrektur der Bodendichten und Skinfaktoren (20.07.2004).....	121

## Verzeichnis der Abkürzungen

ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartografisches Informationssystem
DLM	Digitales Landschaftsmodell
BF	Bodenfeuchte
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BK <sub>KONZ</sub>	Konzeptbodenkarte
BÜK 200	Bodenübersichtskarte
DGM	Digitales Geländemodell
ELER	Europäischer Landwirtschaftsfonds für Entwicklung des ländlichen Raums
EU-WRRL	EU Wasser-Rahmen-Richtlinie
EZG	Einzugsgebiet
EV	Erklärte Varianz
FLDAT	Flächendatenbank
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung
$K_{rec}$	Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe
$K_f$	Hydraulische Leitfähigkeit
LfL	Landesanstalt für Landwirtschaft
LfUG	Landesamt für Umwelt und Geologie
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LTV	Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen
LVA	Landesvermessungsamt
MeMaS	Methoden-Management-System
N-A-Simulation	Niederschlags-Abfluss-Simulation
$Q_g$	Gesamtabfluss
$Q_b$	Basisabfluss am Pegel
$Q_{b\_lin}$	Basisabfluss am Pegel bei linearer Ganglinienseparation
$Q_{b\_rez}$	Basisabfluss am Pegel bei rezessiver Ganglinienseparation
$Q_{lin}$	Oberflächenabfluss am Pegel bei linearer Ganglinienseparation
$Q_{rez}$	Oberflächenabfluss am Pegel bei rezessiver Ganglinienseparation
RBS	Reichsbodenschätzung
SCS CN	Abschätzung des abflusswirksamen Niederschlags (SCS Curve Number)
USDA	Bodenklassifikation nach amerikanischem Landwirtschaftsministerium
VE	Volumenfehler
WQ-Beziehung	Wasserstands-Durchflussbeziehung
WaSiM-ETH	Deterministisches flächendifferenziert arbeitendes hydrologisches Einzugsgebietsmodell

## **1 Einleitung**

Das Prozessmodell EROSION 3D wird seitens des LfULG seit mehreren Jahren im Rahmen seiner fachlichen Forschungs- und Beratungstätigkeit zur Untersuchung abfluss- und bodenschutzbezogener Fragestellungen angewendet. Die in den letzten Jahren schwerpunktmäßig behandelten Forschungsaufgaben zeigen, dass insbesondere vor dem Hintergrund der zunehmenden Anforderungen an den landwirtschaftlichen Bodenschutz, der Erforschung der regionalen Folgen des Klimawandels sowie aus Sicht des integrierten Gewässergüte-Managements und des dezentralen Hochwasserschutzes modellgestützte Aussagen zur Bewertung von Schutzmaßnahmen unerlässlich sind.

Die vorliegende Arbeit entstand mit dem Ziel, in der Entwicklung befindliche Prozesskomponenten des Modells EROSION 3D zu untersuchen, die eine verbesserte Simulation des Einflusses heterogener Bodenstrukturen auf die Abflussbildung sowie den Abflusstransport in kleinen bis mittleren Einzugsgebieten gestatten. Da gerade auf der Beobachtungsskala der kleinen Einzugsgebiete eine nur sehr geringe Anzahl von Messdaten zur hydrologischen und stofflichen Reaktion bei Starkregenereignissen vorliegt, verdienen die in der vorliegenden Arbeit präsentierten Beobachtungsdaten besondere Beachtung. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Erfordernis, insbesondere landwirtschaftliche Managementverfahren 'in der Fläche' im Hinblick auf ihre abflussbezogenen und stofflichen Minderungswirkungen zu bewerten, ist das LfULG bestrebt, einerseits die Validierung von Prozessmodellen an Hand der vorliegenden hydrologischen und stofflichen Beobachtungsdaten zu fördern, und andererseits das Defizit der vorhandenen Datengrundlagen zu verringern.

Die in diesem Bericht präsentierten Forschungsergebnisse sind als Arbeitsergebnisse zu verstehen. Die untersuchten Arbeitsversionen des Modells sind bezüglich der in dieser Untersuchung angesprochenen Aspekte weiter entwickelt worden und es wird auch langfristig Ziel des LfULG bleiben, fachliche Maßnahmenentwicklung, Prozesssimulation und Umsetzung mit der Landwirtschaft zu fördern. Wir danken der Firma GEOGNOSTICS Berlin für die Überlassung der Software EROSION 3D und den intensiven Informationsaustausch während der Untersuchung. Nähere Informationen zum aktuellen Stand der Modellentwicklung erfahren Sie unter [www.geognostics.de](http://www.geognostics.de).

### **1.1 Problemstellung**

Klimamodelle prognostizieren einen wachsenden Anteil von Extremniederschlägen am Gesamtniederschlag (IPCC 2007, JACOB 2002, MPI 2007). Nimmt die Wahrscheinlichkeit von Hochwassern in der Zukunft zu, sind angepasste Strategien besonders im Bereich des dezentralen Hochwasserrückhaltes gefordert. Studien von ZACHARIAS (2007), NITZSCHE et al. (2002) und SIEKER (2002) zeigen, dass die Landwirtschaft als Hauptakteur der Landnutzung Sachsens einen bedeutenden Beitrag dazu leisten kann. Zudem geraten maßnahmenbezogene, prozessorientierte und einzugsgebietsintegrierte Bewertungen der landwirtschaftlichen Managementverfahren auf die Abflussbildung und -dynamik ländlicher Einzugsgebiete in den Vordergrund der Gebietsbetrachtung. Dieser Sachverhalt gewinnt durch die Einbeziehung umweltbezogener Kriterien in die landwirtschaftlichen Förderprogramme (z. B. Entwicklungsprogramm für den ländlichen Raum im Freistaat Sachsen 2007 –

2013 [ELER-Förderprogramm]) und Einhalten gesetzlicher Regelungen (z. B. EU-Wasserrahmenrichtlinie, Bundes-Bodenschutzgesetz) zunehmend an Bedeutung.

Um die Eingriffe der Landnutzung, insbesondere der Landwirtschaft, in landschaftsökologische Systeme im Hinblick auf hochwasserrelevante Niederschlags-Abflussprozesse quantifizieren zu können, bedarf es geeigneter Prognosewerkzeuge, z. B. in Form von hydrologischen Modellen.

Durch das Bodenabtragsmodell EROSION 3D (SCHMIDT 1996, SCHMIDT et al. 1996) wurde bereits 1996 ein anwendungsorientiertes Prognose-Werkzeug geschaffen, welches in der Lage ist, das Wasserinfiltrationsvermögen und die damit verbundene Entstehung des Oberflächenabflusses auf landwirtschaftlich genutzten Böden bei kurzzeitigen Starkregenereignissen in Abhängigkeit verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren abzubilden. Im ursprünglichen Modellansatz von EROSION 3D wurde die Bodensäule als ein in sich homogenes Profil mit vertikal nicht differenzierten Infiltrationseigenschaften verstanden. Da es primäres Ziel der Modellentwicklung war, die Größenordnung der kurzzeitigen hydrologischen Gebietsreaktion zu simulieren, wurde u. a. die Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses innerhalb einer Rasterzelle während des jeweiligen Zeitschrittes als stationär angenommen. Vorliegende Ergebnisse der Modellanwendung bei lang anhaltenden Niederschlägen und in größeren Einzugsgebieten führen im Hinblick auf die Erfassung der dominierenden Prozesse zu folgenden Abweichungen:

- Durch die Annahme eines homogenen Bodenprofils können die stauenden Eigenschaften tieferer Bodenschichten, die besonders bei lang anhaltenden Niederschlägen und/oder hoher Vorfeuchte für die Oberflächenabflussbildung relevant sind, nicht erfasst werden.
- Die Annahme ausschließlich stationärer Verhältnisse während der jeweiligen Simulationszeitschritte führt zu einer ausschließlichen zeitlichen Abhängigkeit der Abflussspitzen von den Niederschlagsspitzen. Mit zunehmender Größe des Einzugsgebietes führt diese Vereinfachung zu einer künstlichen Überschätzung der flächen- und gebietsbezogenen Konzentrationsgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses während der einzelnen Berechnungsintervalle. Durch die damit verbundene Überschätzung der Abflussrate wird die Höhe der Feststofffracht ggf. überschätzt.

Aus diesen Gründen wurde das Modell EROSION 3D (E3D) um einen Mehr-Schichten-Ansatz ergänzt (LFL 2004), der hinsichtlich des Wasserinfiltrationsverlaufs in den Boden die Berücksichtigung von Bodenschichtungen bzw. Bodenhorizonten gestattet. Ziel dieser Modellerweiterung ist es, insbesondere die hochwasserrelevante Minderungswirkung infiltrationsfördernder Bodenbearbeitungsverfahren zu bewerten, welche die hydrologischen Eigenschaften des gesamten standörtlichen Bodenprofils beeinflussen. Das um den Mehr-Schichten-Ansatz ergänzte Modell EROSION 3D wird in dem hier dargestellten Projekt in Bezug auf die Abflussprognose untersucht und validiert. Die Projektergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

## 1.2 Zielstellung

Im Rahmen des Projektes sollte geprüft werden, inwieweit das um den Mehr-Schichten-Ansatz ergänzte bzw. weiterentwickelte Modell EROSION 3D (LFL 2004) als Prognosewerkzeug zur Schätzung der Abflussbildung in kleinen landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten verwendet werden kann. EROSION 3D wurde hierbei unkalibriert angewendet, d.h. die Abflussprognose erfolgte unter Verwendung vorhandener Gebietsdaten bzw. auf der Grundlagen von Expertenschätzungen. Das Modell wurde zusätzlich hinsichtlich seiner Sensitivität bewertet, Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen plausibel abzubilden. Die Verwendung von Flächeninformationen unterschiedlichen Detailgrades ermöglicht darüber hinaus die Abschätzung des Einflusses der Datengrundlage auf die Simulationsergebnisse.

Grenzen und Defizite der Abflussmodellierung mit EROSION 3D werden dargestellt, deren Ursachen analysiert und Verbesserungsmöglichkeiten vorgeschlagen. Die Verbesserungen dienen als Grundlage der Weiterentwicklung des Modells sowie der Erweiterung und Verbesserung der Eingangsdatenbasis mit dem Ziel, der planerischen Praxis ein effizientes Simulations- und Bewertungswerkzeug zur Verfügung zu stellen.

## 1.3 Aufgaben

Zur Erreichung der Zielstellung wurden folgende Aufgaben formuliert:

- Aufbereitung der verfügbaren Flächendaten und Zeitreihen,
- Prüfung der Sensitivität der Abflussprognose im Hinblick auf Veränderungen der maßgeblichen Eingabeparameter,
- Erarbeiten von Vorschlägen zur Verbesserung der Prozessabbildung im Modell EROSION 3D hinsichtlich
  - der zeitlich kontinuierlichen Ableitung des Skinfaktors,
  - der Makroporeninfiltration,
  - der Entstehung von Siedlungsflächenabfluss,
  - der hydraulisch 'richtigen' Abbildung des Gerinneabflusses,
- Niederschlags-Abfluss-Simulationen zur Validierung der Modellversionen 3.11 und 3.14 bezüglich des Oberflächenabflusses in Plot- und EZG-Skala,
- Niederschlags-Abfluss-Simulationen zur Untersuchung der Fähigkeit des Modells EROSION 3D, die Wirkung von Nutzungs- und Bearbeitungsszenarien auf die Abflussprognose abzubilden,
- Untersuchung folgender Verbesserungsmöglichkeiten von EROSION 3D:
  - realitätsnahe Abbildung der Bodenhorizonte,
  - Korrektur/Optimierung der Datengrundlage,
  - Schätzung der Anfangsbodenfeuchte mit Hilfe des Topographischen Indexes,
  - Schätzung der Anfangsbodenfeuchte mit dem Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH,

- Testen des Parametrisierungstools DPROC (Ver. 1.50) und Erarbeiten von Vorschlägen zur Verbesserung der Anwenderfreundlichkeit,
- Erarbeiten eines Leitfadens zur fachlichen Anwendung des Modells EROSION 3D bei abflussbezogenen Fragestellungen.

#### **1.4 Hochwasserrelevanter Oberflächenabfluss und modellseitige Abbildung**

Laut DYCK & PESCHKE (1995) handelt es sich um ein Hochwasser, wenn der Durchfluss zeitlich begrenzt über den mittleren Abfluss, als Folgeerscheinung meteorologischer oder durch Katastrophen hervorgerufener Ereignisse, anschwillt.

Dieser mittlere Abfluss wird als MQ bezeichnet, mittlere Hochwasser als MHQ und statistische Hochwasser als HQ mit einer nachgestellten Ziffer für das Wiederkehrintervall, z. B. HQ<sub>100</sub> für ein 100-jähriges Hochwasserereignis.

Ist das Bett des Vorfluters nicht ausreichend für die auftretende Wassermenge, tritt das Gewässer über die Ufer und überschwemmt die Vorlandbereiche. Die Abbildung von Niederschlags-Abflussprozessen ist eine der zentralen Aufgaben der Hydrologie und wird in der Regel mit mathematischen Modellen durchgeführt. Je nach Anwendungsbereich, Prozessabbildung, Datenlage und Raumskala kommen unterschiedliche Modelle zum Einsatz. Die mathematisch-hydrologische Modellierung gewinnt besonders im Hinblick auf die prognostizierte Klimaentwicklung zunehmend an Bedeutung.

Die physikalisch begründete Erosionsmodellierung ist über die Beschreibung der Oberflächen- und Gerinneabflüsse eng mit der hydrologischen Modellierung verknüpft. Eine realistische hydrologische bzw. hydraulische Prozessabbildung ist notwendige Voraussetzung zur exakteren Beschreibung der flächen- und gebietsspezifischen Sedimentdynamik.

Eine verbesserte Infiltrationsabbildung durch die Berücksichtigung von mehreren diskreten Schichten und die kinematische Beschreibung der Abflussbewegung unter Berücksichtigung der Gerinnemorphologie wird bereits in den Erosionsmodellen LISEM (JETTEN 2002) und KINEROS 2 (GOODRICH et al. 2006) erfolgreich angewendet.

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Hydrologische Modellierung**

Zur Beschreibung von Wasserflüssen dienen der hydrologischen Modellierung in der Regel oberirdische Einzugsgebiete als klar abgegrenzte Systeme. Im Rahmen des Projektes wurden solche Einzugsgebiete ausgewählt, die über eine gute Datenlage vor allem im Bereich der Landnutzungsinformation verfügen.

Die Wasserflüsse in einem solchen Einzugsgebiets-System werden mit Hilfe von mathematischen, in der Regel computergestützten Modellen simuliert. Anhand von Pegelmessungen am Auslass des Einzugsgebiets können die berechneten Ergebnisse validiert werden.



Die Modellierung von Landnutzungsszenarien lässt sich allerdings nur mit wissenschaftlichem Sachverstand und Prozessverständnis validieren, da flächenhafte Messungen und längere Datenreihen nicht vorhanden sind. Aus diesem Grund wird sich in dieser Arbeit vor allem auf Berechnungsexperimente gestützt.

### **2.1.1 Modelltypen**

Die Komplexität des natürlichen Wasserkreislaufs in einem Einzugsgebiet kann zum gegenwärtigen Stand der Technik nur unvollständig erfasst werden. Daher wird versucht, abhängig vom Untersuchungsziel, sich der Datenlage und der Maßstabsebene mit unterschiedlichen Modelltypen zu nähern.

Diese unterschiedlichen Modelltypen werden vor allem von BRONSTERT (2004), DVWK (1999), DYCK & PESCHKE (1995), ROHDENBURG (1989) näher beschrieben und sollen hier kurz erläutert werden.

#### Stochastische Modelle

Dieser Modelltyp unterscheidet zwischen Zeitreihenmodellen und probabilistischen (d. h. wahrscheinlich verbleibenden) Modellen. Sie werden nicht zur Prozessbeschreibung verwendet, sondern dienen zur Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Varianz und können mit deterministischen Modellen verknüpft werden.

#### Deterministische Modelle

In diesen Modellen werden Prozesse auf Basis mathematisch basierter Grundgleichungen, deren Eingangsgrößen frei von Zufallswahrscheinlichkeiten sind, simuliert. Sie setzen zusätzlich das Kausalprinzip voraus, bei dem ein späterer Zustand aus einem vorherigen berechnet wird. Sie lassen sich in drei Gruppen unterscheiden:

##### *1. Black Box Modelle*

Das Einzugsgebiet wird bei diesem Modelltyp als System aufgefasst, dessen Struktur nicht real abgebildet wird, sondern dessen Systemwirkungen lediglich durch mathematische Funktionen nachgebildet werden. Das Modell kann nicht die zugrunde liegenden Prozesse erfassen. Sie beruhen auf empirischen Erfahrungswerten. Der Anspruch an solche Modelle ist, für jeden Systeminput eine Systemantwort zu berechnen, die hinreichend genau mit den gemessenen Werten übereinstimmt. Die Transformation und der Rückhalt bleiben unberücksichtigt. Zudem ist keine räumliche Differenzierung möglich und eine Übertragbarkeit ist nicht gegeben. Beispiele solcher Modelle finden sich in der klassischen N-A-Modellierung.

### *2. Grey Box Modelle*

Diese hydrologischen Modelle mittlerer Komplexität versuchen, einfache Ansätze der konzeptionellen Modelle mit denen physikalisch begründeter Modelle besonders hinsichtlich der Prozess- und Raumdetailliertheit zu verbinden. Sie beschreiben die physikalischen Gesetzmäßigkeiten mit Hilfe von Näherungen und bedienen sich teilweise der Empirie. Auch physikalische Prozessbeschreibungen, vor allem konzeptionelle Vereinfachungen, finden Eingang in diese Modelle. In diese Kategorie gehören die meisten Modelle, die in der Forschung, aber auch im gewerblichen Bereich genutzt werden (WaSiM-ETH, EROSION 3D).

### *3. White Box Modelle*

Diese Modelle versuchen die verschiedenen hydrologischen Prozesse einzeln durch mathematische Systemfunktion physikalisch begründet darzustellen und die räumlich verbreiteten Systemeigenschaften bezüglich Boden, Vegetation und Relief direkt aus Messungen und räumlich differenziert zu parametrisieren. Diese Parametrisierung erfordert eine große Anzahl an Modelleingangsparametern, was den Einsatz dieser Modelle nur eingeschränkt möglich macht. Die genaue Kenntnis der Systemeigenschaften ist als Idealfall noch nicht gegeben, sodass die meisten Effekte mit den betreffenden Gesetzen nicht erfasst werden können. Sie finden vor allem in der Wissenschaft Verwendung.

## **2.2 Modellbeschreibung**

### **2.2.1 EROSION 3D**

Das Modell EROSION 3D basiert im Wesentlichen auf dem von SCHMIDT (1996) erarbeiteten Modell EROSION 2D.

Das physikalisch basierte, computergestützte Modell simuliert den durch Oberflächenabfluss und Tropfenaufschlag hervorgerufenen Bodenabtrag auf Hangsegmenten. VON WERNER (2000) entwickelte die Hangprofilversion um eine aufwändige Reliefanalyse zur Ermittlung der Abflussverteilung in Einzugsgebieten weiter. Der Infiltrations- und Abflusstransportansatz wurde unverändert übernommen.

Das Modell dient vorwiegend zur Erosionsprognose, Szenarienabschätzung und der Rekonstruktion von Schadereignissen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Abschätzung der Wirkung verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren, Erosionsschutzmaßnahmen, Flurbereinigungsmaßnahmen, Best-Case- und Worst-Case-Analysen.

Unter Zuhilfenahme des GREEN & AMPT-Ansatzes (1911) im Modell EROSION 3D wird die Infiltration berechnet. Die Partikelablösung und der Partikeltransport erfolgen über einen Impulsstromansatz von SCHMIDT (1996). Eine umfangreiche Datengrundlage zur Parametrisierung des Modells wurde im Rahmen des Erosionsmessprogramms Sachsen geschaffen, die im Parameterkatalog Sachsen

(MICHAEL et al. 1996) zusammengefasst sind. Die Versuche dienten vor allem der Abschätzung des Skinfaktors, der die aus den Bodenparametern berechnete Infiltrationsrate der gemessenen Infiltration anpasst. Notwendig wird dieses Vorgehen, da Bodenheterogenitäten wie Verschlämmung, Makroporeninfiltration und Tonquellung im Modell nicht abgebildet werden können.

Die benötigten Datengrundlagen sind in der Tab. 1 aufgeführt und werden im Kap. 2.3 näher beschrieben.

#### Mehrschichtinfiltrationsansatz

Der GREEN & AMPT-Ansatz erlaubt die Unterteilung des Bodenkörpers in beliebig viele diskrete Schichten oder Horizonte. Da der ursprüngliche Modellansatz von EROSION 3D auf der Annahme basiert, dass die Abflussbildung (und Erosion) bei kurzzeitigen Starkregenereignissen überwiegend von den Eigenschaften des Oberbodens (Bearbeitungshorizont) abhängt, wurde von der Implementierung eines geschichteten 'Bodensäule'-Modells bisher Abstand genommen. Im Hinblick auf die Wahrung der Anwendungsfreundlichkeit des Modells war insbesondere auch die eingeschränkte Verfügbarkeit hochaufgelöster, geschichteter Bodendaten (Maßstab größer 1 : 50 000) Grund für die überwiegende Anwendung des Ein-Schicht-Modells.

Die Prognose der Abflussbildung infolge des extremen Niederschlagsereignisses im August 2002 hat gezeigt, dass eine effiziente Simulation der standortbezogenen Infiltration und Abflussbildung bei lang anhaltenden Niederschlagsereignissen und entsprechenden Vorfeuchten mit dem Einschichtmodellansatz von EROSION 3D nicht möglich ist. Ursache dafür sind sehr hohe Prognosen der Eindringtiefe der Feuchtefront und überschätzte Infiltrationsraten, die aus der vereinfachenden Extrapolation der bodenphysikalischen Eigenschaften des Oberbodens in die Tiefe 'Unendlich' resultieren.

Die Grundlage der GREEN & AMPT-Infiltration ist das kolbenförmige Vordringen der Befeuchtungsfront in den Bodenkörper. Die gesättigten und ungesättigten Bereiche werden scharf voneinander abgegrenzt. Die GREEN & AMPT-Infiltration wird mit Hilfe der DARCY-Gleichung gelöst. Dabei ist die aktuelle Infiltrationsrate abhängig von der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und der Potenzialdifferenz innerhalb des gesättigten Bereiches der Bodensäule. Zur numerischen Lösung sind die VAN GENUCHTEN-Parameter (VAN GENUCHTEN 1980) und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit notwendig. Die VAN GENUCHTEN-Parameter werden modellintern über die Pedotransferfunktion von VERECKEN (1989) ermittelt. Die hydraulische Leitfähigkeit wird über die Funktion von CABELL (1985) abgeleitet. Es gelten folgende Annahmen für vertikal gegliederte Bodenprofile:

- In einem heterogenen Bodenprofil ist stets die kleinste gesättigte Leitfähigkeit innerhalb des gesättigten Bereiches Grundlage für die aktuelle Infiltrationsrate. Die Wasserbewegung im Bodenprofil ergibt sich aus dem hydraulischen Potenzialgradienten, der sich aus der Potenzialdifferenz zwischen Bodenoberfläche und Befeuchtungsfront, bezogen auf die Eindringtiefe, errechnet. Die Schätzung des hydraulischen Potenzials an der Befeuchtungsfront wird über die Bodenparameter der jeweiligen Schicht vollzogen.

- Gelangt die Befeuchtungsfront zum Grundwasserleiter, entspricht die Infiltrationsrate dem Grundwasserabstrom.

Im Projekt wurden die Modellversionen 3.11 (Infiltrationsmodul Ver. 1.0.0.11) und 3.14 (Infiltrationsmodul Ver. 1.1.0.1, Modellversion mit einer gegenüber Ver. 3.11 modifizierten VERECKEN-Gleichung) von EROSION 3D getestet. Beide Modellversionen können sowohl Ein- als auch Mehrschicht-Infiltration berechnen. Um die eindeutige Zuordnung zu ermöglichen, werden im vorliegenden Bericht die Namen der geprüften Modellversionen von EROSION 3D (Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14) und nicht die der Infiltrationsmodule verwendet.

Der grundlegende Unterschied zwischen beiden Infiltrationsmodulen besteht in der Berechnung des Matrixpotenzials und der internen Zeitschrittsteuerung.

#### Berechnung des Matrixpotenzials

Die Berechnung des Matrixpotenzials ist zur Lösung der Infiltrationsgleichung notwendig. Die mathematische Beschreibung der Infiltrationsrate erfolgt über die DARCY-Gleichung für vertikale Wasserbewegung im Boden:

(Gl. 1)

$$i = -k \cdot \frac{\Delta(\Psi_m + \Psi_g)}{x_f(t)}$$

$i$	=	Infiltrationsrate [L/T]
$k$	=	hydraulische Leitfähigkeit in der Transportzone [L/T]
$\Psi_m$	=	Matrixpotential [L]
$\Psi_g$	=	Gravitationspotential [L]
$x_f(t)$	=	Eindringtiefe der Befeuchtungsfront in Abhängigkeit von der Zeit $t$

Die zur Lösung von Gleichung 1 notwendige Eindringtiefe der Befeuchtungsfront ergibt sich aus:

(Gl. 2)

$$x_f = - \left[ \left[ \frac{k_s \cdot g \cdot t}{\rho_f \cdot \Delta\Theta} \right] + \left[ \frac{2k_s \cdot \Psi_{m0} \cdot t}{\rho_f \cdot \Delta\Theta} \right]^{1/2} \right]$$

$\rho_f$	Flüssigkeitsdichte [L/T]
$t$	Zeit [T]
$k_s$	gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [L/T]
$\Psi_{m0}$	Matrixpotential bezogen auf den Anfangswassergehalt $\Theta_{\Psi_m}$

Das dem Anfangswassergehalt zugeordnete Matrixpotential wird durch die VAN GENUCHTEN-Gleichung (VAN GENUCHTEN 1980) berechnet.

(Gl. 3)

$$\Psi_{m0} = \left[ \left( \frac{\Theta_s - \Theta_r}{\Theta_0 - \Theta_r} \right) \cdot \frac{1}{a^n} \right]^{\frac{1}{n}}$$

$\Theta_s$	Sättigungswassergehalt [Vol.-%]
$\Theta_r$	Restwassergehalt bei pF 4.2 [Vol.-%]
$\Theta_0$	Anfangswassergehalt [Vol.-%]
$\alpha, n$	Parameter ohne physikalische Bedeutung

Die Bestimmung der Parameter  $\Theta_s$ ,  $\Theta_r$ ,  $\alpha$  und  $n$  erfolgt über die von VERECKEN angegebenen Formeln:

(Gl. 4)

$$\Theta_s = 0.81 - 0.283\rho_b + 0.001T$$

(Gl. 5)

$$\Theta_r = 0.015 + 0.005T + 0.014C_{org}$$

(Gl. 6)

$$\log(\alpha) = -2.486 + 0.025S - 0.315C_{org} - 2.617\rho_b - 0.023T$$

(Gl. 7)

$$\log(n) = 0.053 - 0.009S - 0.013T + 0.0015S$$

$\rho_b$	Lagerungsdichte [M/L <sup>3</sup> ]
$C_{org}$	Gehalt an organischem Kohlenstoff [Masse-%]
$T$	Tongehalt [Masse-%]
$S$	Sandgehalt [Masse-%]

Der grundlegende Unterschied bei der Berechnung des Matrixpotenzials besteht in der Bestimmung der Parameter  $\alpha$  und  $n$ . Diese werden in der Version 3.11 mit Hilfe des dekadischen Logarithmus bestimmt (Gl. 6 und 7), wohingegen in Version 3.14 der natürliche Logarithmus verwendet wird (Gl. 8 und 9).

(Gl. 8)

$$\ln(\alpha) = -2.486 + 0.025S - 0.315C_{org} - 2.617\rho_b - 0.023T$$

(Gl. 9)

$$\ln(n) = 0.053 - 0.009S - 0.013T + 0.0015S$$

#### Zeitschrittsteuerung

Die Berechnung der aktuellen Infiltrationsrate sollte mit dem Parametersatz erfolgen, der die Schicht beschreibt, in der sich die Befeuchtungsfront zum aktuellen Zeitpunkt befindet. Bei einer

standardisierten zeitlichen Auflösung von 10 Minuten kann das zu numerischen Instabilitäten, wenn die Befeuchtungsfront bereits bis in die nächste Schicht vorgedrungen ist, führen. In Version 3.11 wurde innerhalb eines diskreten Zeitschritts mit dem gleichen Parametersatz gerechnet, was bei Überschreitung der Befeuchtungsfront zur nächsten Schicht zu falschen Ergebnissen führen kann.

In Version 3.14 wurde das sog. COURANT-Kriterium (Gl. 10, COURANT et al. 1928) eingehalten, das den maximal möglichen Zeitschritt  $\Delta t$  oder die kleinstmögliche Elementlänge (Schichtdicke)  $\Delta l$  begrenzt. Da die Elementlänge durch die Horizontmächtigkeit vorgegeben und unveränderlich ist, wurde im Modell eine interne Zeitschrittsteuerung integriert. Diese unterteilt den Zeitschritt bei Überschreitung der Befeuchtungsfront in eine neue Schicht so weit, dass bei jeder Überschreitung mit den Parametern der Schicht gerechnet wird, in der sich die Befeuchtungsfront gerade befindet.

(Gl. 10)

$$C_r = \left[ \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta l} \right] \leq 1$$

$C_r$	Courant-Zahl [-]
$v$	Geschwindigkeit [m/s]
$\Delta t$	maximal möglicher Zeitschritt [s]
$\Delta l$	maximal mögliche Länge [m]

#### Abflussretentions- und -translationsansatz

Der Ausgangspunkt der kinematischen Abflussbeschreibung im Modell EROSION 3D ist die Bilanzgleichung, die das Abflussvolumen jeder Rasterzelle aus Infiltrationsüberschuss und Zustrom von Oberliegerzellen ermittelt (SCHMIDT 1996). Die Abflussgeschwindigkeit ist abhängig von dem Gefälle, der Schichtdicke des Abflusses und der Oberflächenrauigkeit. Die bisherige Stationarität der Abflussgeschwindigkeit wurde aufgehoben und der Wasserfilm als dynamischer Speicher beschrieben.

Das hat zur Folge, dass bei Niederschlagsbeginn aufgrund von Speicherfüllung eine Verringerung der Abflussrate und mit Niederschlagsende als Folge der Speicherentleerung eine Erhöhung der Abflussrate auftritt. Der Abfluss wird über das zeitliche Ende des Niederschlagsereignisses hinaus verzögert. Die Modellentwickler weisen darauf hin, dass die hydrodynamischen Prozesse in einem Gerinne mit dem Ansatz zur Beschreibung des Dünnschichtabflusses aufgrund fehlender Zwischenabfluss- und Return-Flow-Abbildung nur hydraulisch bzw. hydrologisch vereinfacht wiedergegeben werden können (VON WERNER 2004).

#### **2.2.2 WaSiM-ETH**

Das Modell WaSiM-ETH wurde von SCHULLA (1997) an der ETH Zürich entwickelt. Es ist ein deterministisches, flächendifferenziert arbeitendes hydrologisches Einzugsgebietsmodell zur Simulation des Wasserkreislaufs auf und unter der Landoberfläche (PÖHLER 2006). Das Modell kombiniert physikalische und konzeptionelle Prozessbeschreibungen und ist vertikal geschichtet, wobei die

Obergrenze des Systems in der schneefreien Zeit die Vegetation bzw. bei fehlender Vegetation der Boden ist. Die benötigten Datengrundlagen sind in der Tab. 1 aufgeführt und werden im Kap. 2.3 näher beschrieben.

#### Mehr-Schicht-Infiltrationsansatz

Die Berechnung der Infiltration erfolgt mit dem GRENN & AMPT-Ansatz (1911). Das Modell setzt einen geschichteten Boden voraus, bei dem der Matrixfluss gegenüber dem Makroporenfluss dominiert. Die Berechnung des Makroporenflusses erfolgt separat. Der Infiltrationsvorgang wird in zwei Phasen geteilt: Eine Sättigungsphase bei ungesättigten und eine Rückgangphase bei gesättigten Verhältnissen. Im Infiltrationsmodell wird der Niederschlag aufgeteilt in einen Infiltrationsüberschuss, der in Oberflächenabfluss umgewandelt wird und in infiltrierendes Wasser, das an das Bodenmodell übergeben wird (PÖHLER 2006). In der vorliegenden Version (WaSiM-ETH Ver. 7.2.7) wird der Bodenwasserhaushalt mit der RICHARDS-Gleichung berechnet. Die Bestimmung der Wassergehalts-Wasserspannungsbeziehung bzw. Wassergehalts-Leitfähigkeitsbeziehung erfolgt über tabellierte Messwerte bzw. über den Ansatz von VAN GENUCHTEN (1980) zur Parameterbestimmung und Ableitung der Pedotransferfunktionen. Das Modell ist in der Lage, in jeder numerischen Bodenschicht Zwischenabfluss abzuzweigen. Das erfolgt über die Bestimmung des maximal möglichen Zwischenabflusses aus Feldkapazität und Schichtdicke. Anschließend wird der aktuelle Zwischenabfluss aus der Leitfähigkeit, Flusssdichte und Hangneigung berechnet. Das Modell ist in der Lage, Infiltration aus dem Vorfluter, Exfiltration aus dem Grundwasser in den Vorfluter sowie Verluste durch Transpiration und Grundwasserneubildung darzustellen. Eine ausführliche Beschreibung des Bodenmodells geben SCHULLA (1997) und SCHULLA & JASPER (1998, 2001).

#### Abflussretentions- und -translationsansatz

Die Komponenten Zwischenabfluss und Oberflächenabfluss bei WaSiM-ETH werden zunächst als Summe aus schneeinternem Abfluss, Infiltrationsüberschuss und Sättigungsflächenabfluss in einer Rasterzelle gebildet. Der Zwischenabfluss wird einer Speicherung unterzogen und über das Teilgebiet gemittelt. Der Oberflächenabfluss hingegen wird zeitschrittweise zum Gebietsausfluss verschoben. Der Abflussrichtung folgend hängt die Geschwindigkeit dieser Verschiebung von der Geländeneigung, der Oberflächenrauigkeit, der Gewässerdichte und der Gebietsgröße ab. Dabei findet bereits eine Retention des Abflusses auf der Landoberfläche mit Hilfe eines Einzellinearspeichers statt. Die Fließzeiten auf jeder Rasterzelle werden mit Hilfe des Programms TANALYS (SCHULLA 1997) abgeleitet. Dazu werden Gebietsmittel der Oberflächenrauigkeit verwendet.

Gelangt Oberflächenabfluss in den Vorfluter, wird er zu Zwischenabfluss und Basisabfluss addiert, um den gesamten Gebietsabfluss zu erhalten. Im Gewässernetz werden jetzt die Translations- und Retentionsvorgänge für das Hauptbett bzw. bei Ausufern des Gewässers für das Gewässervorland berechnet. Besonders für die Hochwassermodellierung ist dieses Vorgehen entscheidend, da Hochwasserwellen in Abhängigkeit der Gerinnemorphologie bzw. Gerinne- und Vorlandrauigkeit in Höhe und Breite variieren können.

Zwei Einzelinearspeicher simulieren nach dem Prinzip der kinematischen Welle getrennt die Geringerretention für Hauptbett und Vorland. Dabei wird zuerst die Translation und daraufhin die Wellenabflachung berechnet und im Anschluss die gerouteten Abflüsse aus den Quellgebieten mit dem jeweiligen Teilgebiet überlagert (PÖHLER 2006).



### 2.3 Datengrundlagen

Die erforderlichen Datengrundlagen für die Modellierung mit EROSION 3D und WaSiM-ETH sind in der Tab. 1 aufgeführt.

**Tabelle 1: Datengrundlagen in EROSION 3D und WaSiM-ETH**

Daten-kategorie	E3D	WaSiM-ETH	Ableitung von:
Reliefdaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Raster</li> <li>- senkenfreies DGM</li> <li>- Gefälle</li> <li>- Exposition</li> <li>- Zelleinzugsgebiet</li> <li>- Fließakkumulation</li> <li>- Fließrichtung</li> <li>- Zelleinträger</li> <li>- Vorfluternetz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Raster</li> <li>- senkenfreies DGM</li> <li>- Topographischer Index</li> <li>- Gefälle</li> <li>- Exposition</li> <li>- Fließzeiten</li> <li>- Geländezonierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abflussgeschwindigkeit</li> <li>- Abflussrichtung</li> <li>- Abflussgeschwindigkeit</li> </ul>
Bodendaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trockenrohdichte<sup>1</sup></li> <li>- C<sub>org</sub>-Gehalt<sup>1</sup></li> <li>- Textur<sup>1</sup></li> <li>- Anfangswassergehalt<sup>1</sup></li> <li>- Skinfaktor</li> <li>- Erosionswiderstand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- K<sub>f</sub>-Wert</li> <li>- VAN GENUCHTEN-Parameter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Infiltrationsrate</li> <li>- Wassergehalts-Wasserspannungs-Beziehung</li> <li>- Partikelablösung</li> </ul>
Landnutzungsdaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bodenbedeckung</li> <li>- Oberflächenrauigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Albedo</li> <li>- Blattoberflächenwiderstand</li> <li>- Interzeptionswiderstand</li> <li>- Bodenoberflächenwiderstand</li> <li>- Blattflächenindex</li> <li>- Rauigkeitslänge</li> <li>- Bodenbedeckung</li> <li>- Wurzeltiefe</li> </ul>	<p>EROSION 3D</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Flächenanteil unbedeckter Boden zur Partikelablösung,</li> <li>- Abflussgeschwindigkeit</li> </ul>
		<p>WaSiM-ETH</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wasserentzug und -rückhalt durch Pflanzen,</li> <li>- Flächenanteil der Evaporation</li> </ul>	
meteorologische Daten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Niederschlag</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Niederschlag</li> <li>- Temperatur</li> <li>- Globalstrahlung/ Sonnenscheindauer</li> <li>- relative Luftfeuchte/</li> <li>- Sättigungsdampfdruck</li> <li>- Windgeschwindigkeit</li> </ul>	<p>EROSION 3D</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Niederschlagsmenge, Impulsstrom des Niederschlags</li> </ul>
		<p>WaSiM-ETH</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Systeminput an Wasser und Energie</li> </ul>	
hydrologische Daten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pegeldaten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pegeldaten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Validierung</li> </ul>

<sup>1</sup> Werte zur Abschätzung der VAN GENUCHTEN-Parameter durch Funktion von VERECCEN (1989) und zur Abschätzung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit nach CAMBELL (1985)

### 2.3.1 Klimadaten

Die ereignisbezogene Abflusssimulation erfordert hoch aufgelöste Niederschlagsdaten mit Zeitschritten unter einer Stunde. Zur kontinuierlichen Wasserhaushaltssimulation sind die Daten zu Globalstrahlung, Niederschlag, relativer Luftfeuchte, Temperatur und Windgeschwindigkeit in Zeitschritten von einem Tag notwendig. Alle meteorologischen Daten (Tab. 2) wurden von der LfL zur Verfügung gestellt.

Nach der Plausibilitätsprüfung der Datensätze wurden diese in 15 min- bzw. 1 h-Intervallen normiert und in programmlesbare Dateien umgewandelt. Dabei wurden die üblichen Textformate \*.csv und \*.txt verwendet.

**Tabelle 2: Verwendete meteorologische Daten, Stationen, Auflösung und Normierung**

<b>Einzugsgebiet</b>	<b>Station</b>	<b>Parameter</b>	<b>Zeitliche Auflösung</b>	<b>Normierung</b>
Baderitz	Mochau	Niederschlag	1 min	15 min/1h
	Mischütz	Niederschlag	1 min	15 min/1h
	Klein-mockritz	Niederschlag	1 min	15 min/1h
		Globalstrahlung	1 h	-
		relative Feuchte	1 h	-
		Temperatur	1 h	-
	Windgeschwindigkeit	1 h	-	
Hölzelbergbach Lippersdofer Bach	Forchheim	Niederschlag	10 min	15 min/1h
		Globalstrahlung	1 h	-
		relative Feuchte	1 h	-
		Temperatur	1 h	-
		Windgeschwindigkeit	1 h	-

### 2.3.2 Abflussdaten

Die zur Validierung und Kalibrierung der Modelle wichtigsten Daten sind niederschlagssynchrone Abflussmessungen, die in den Einzugsgebieten mit verschiedenen Pegeln realisiert werden. Die Qualität der Messung und Wasserstands-Durchflussbeziehung (W-Q-Beziehung) bestimmt die Qualität der Validierung.

Die Pegel der Einzugsgebiete (EZG) Lippersdorfer Bach und Hölzelbergbach (Tab. 3) werden von der LTV betrieben. Es handelt sich um Schwimmerpegel. Die W-Q-Beziehungen sind durch die LTV aufgestellt worden.

Das EZG Baderitzer Teich (Tab. 3) besitzt einen Schwimmerpegel. Die W-Q-Beziehung wurde von SCHMIDT (2004) und GEOGNOSTICS (2005) aufgestellt. Bei Prüfung der Abflussdaten traten unplausible Ganglinienverläufe auf, die einer ungenauen Messung und einer unzureichenden W-Q-Beziehung geschuldet sind. Die Gründe für die fehlende Korrelation wurden bereits in SCHMIDT (2004) erläutert. Zum einen ist die Uferlinie nur provisorisch gesichert, sodass kein einheitlicher Messquerschnitt gegeben ist. Zum anderen sind die Wasserstandsangaben durch Sedimenteinträge am Schwimmerpegel ungenau.

Die Abflussscheitel dieser Messreihe können positiv bewertet werden, da mit größeren Durchflussmengen der Einfluss von kleinräumigen Strömungs- und Wasserstandsunterschieden weniger stark ausgeprägt ist. Aus diesem Grund eignen sich die Daten aus Sicht des Autors als Validierungsgrundlage zur Ereignissimulation.

**Tabelle 3:        Verwendete Abflussdaten**

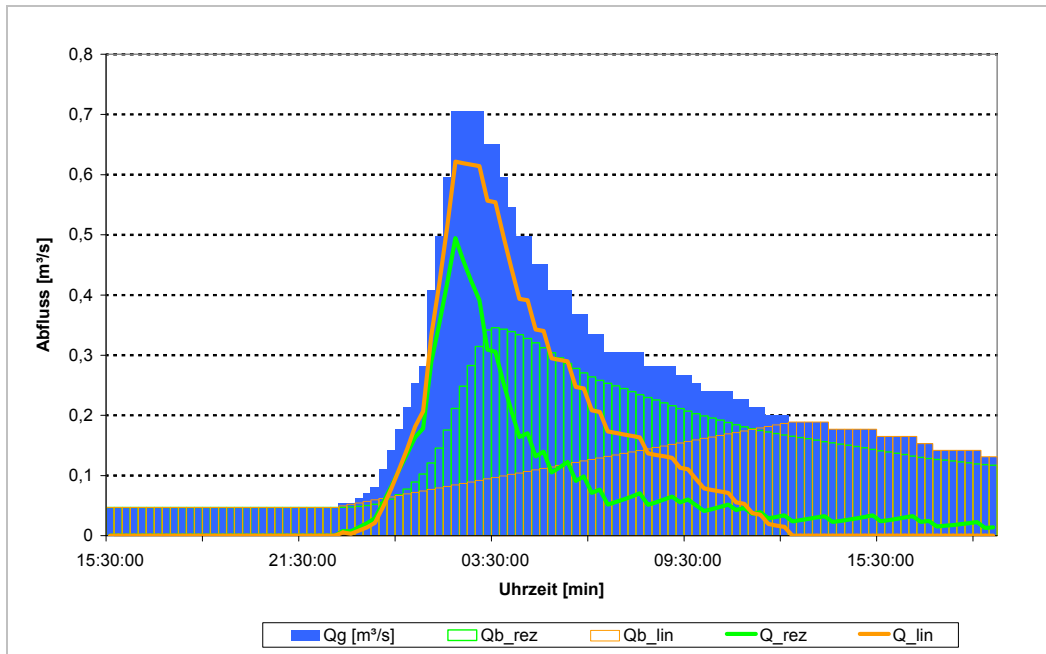
<b>Einzugsgebiet</b>	<b>Abflussmessung</b>	<b>Zeitraum</b>	<b>Zeitliche Auflösung</b>	<b>Quelle</b>	<b>WQ-Beziehung<sup>1</sup></b>
Hölzelbergbach	Schwimmerpegel	1999 - 2002	15 min	LTV <sup>2</sup>	LTV
Lippersdorfer Bach	Schwimmerpegel	2004 - 2005	15 min	LTV	LTV
Baderitzer Teich	Schwimmerpegel	2004 - 2005	15 min	LFL <sup>3</sup>	SCHMIDT 2004

<sup>1</sup> Wasserstands-Abflussbeziehung, <sup>2</sup> Sächsische Landestalsperrenverwaltung

<sup>3</sup> Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft

Die Separation der Direktabflüsse von der Ganglinie (Abb. 1) erfolgte durch das einfache Verfahren nach DYCK & PESCHKE (1995) und eine Rezessionsanalyse mit dem Programm BASEFLOW (ARNHOLD et al. 1999, 1995).

Aus Sicht des Autors eignet sich die lineare Separation des Oberflächenabflusses eher für kurze Abflussereignisse, bei denen nur in geringem Maße mit dem Eintreten langsamerer Abflusskomponenten am Auslass zu rechnen ist. Die Rezessionsanalyse hingegen ist besser für länger anhaltende Abflussereignisse geeignet, bei denen die langsameren Abflusskomponenten den Wasserstand am Auslass maßgeblich mit beeinflussen.



**Abbildung 1: Vergleich der Abflussganglinienseparation am Beispiel des Einzugsgebietes des Lippersdorfer Baches am 10.05.2004 (Talsperre Saidenbach)**

### 2.3.3 Reliefdaten

Eine effiziente Modellierung der Wasser- und wassergebundenen Stoffflüsse in der Landschaft wird nicht zuletzt durch die Qualität der Reliefdaten limitiert. Erst die lagegetreue Erfassung des Mikroliefs ermöglicht die genaue Verortung von Oberflächenabfluss und Erosionsbereichen. Mit der Überarbeitung des offiziellen Digitalen Geländemodells (DGM) Sachsens durch KOTHE et al. (2005) steht damit eine genaue Datengrundlage zur Verfügung. Die Detailliertheit des DGM ist mit 20 m Punktabstand jedoch begrenzt, sodass Kleinstformen wie Gräben und Stufen nur ansatzweise erfasst werden können.

Gerade im Bereiche des Gewässernetzes können dabei große Fehler auftreten. Aus diesem Grund wurde das aus der Landnutzungsinformation abgeleitete Gewässernetz in das bestehende DGM „eingebrennt“, um die natürliche Gewässermorphologie widerzuspiegeln. Die „Einbrenntiefe“ wurde mit 50 cm festgelegt, um die Hangneigungen in Gewässernähe nicht unrealistisch zu überhöhen. Um diesen Fehler weiter zu minimieren, wurden die Reliefdaten auf 10 m Rasterweite interpoliert. Höher aufgelöste Reliefdaten liegen sachsenweit derzeit nicht vor und lassen nur geringfügige Verbesserungen von einzugsgebietsbezogenen Aussagen erwarten.

### 2.3.4 Bodendaten

Zur Niederschlags-Abfluss-Simulation (N-A-Simulation) wurden die offiziellen digitalen Bodenkartenwerke des LFUG verwendet (Tab. 4). Es wurde Wert auf die flächendeckende Verbreitung einer Datengrundlage gelegt. Die horizontdifferenzierten Bodeninformationen wurden aus den zugehöri-

gen Datenbanken FLDAT, MeMaS und RBS entnommen. Der Einfluss der Datengrundlage wurde durch Simulationen mit den Daten verschiedener Maßstäbe getestet.

Lediglich für das EZG Hölzelbergbach lagen die Daten der Reichsbodenschätzung flächendeckend vor. Da die BK<sub>konz</sub> vor allem im Bereich von Ortschaften nicht kartierte Bereiche aufweist, wurden diese Fehlflächen durch Informationen der BÜK 200 ergänzt.

**Tabelle 4:        Verwendete digitale Bodeninformationen**

<b>EZG</b>	<b>Bodenkarte</b>	<b>Maßstab</b>	<b>Blattnummer</b>	<b>Quelle</b>
Hölzelbergbach	Bodenschätzungsdaten	1:10.000	GF1418	LFUG*
	BK <sub>konz</sub>	1:25.000	konz5245	LFUG
	BÜK 200	1:200.000	sachsenweit	LFUG
Lippersdorfer Bach	BK <sub>konz</sub>	1:25.000	konz5245 konz5246	LFUG
	BÜK 200	1:200.000	sachsenweit	LFUG
Baderitzer Teich	BK <sub>konz</sub>	1:25.000	konz4844 konz4845	LFUG
	BÜK 200	1:200.000	sachsenweit	LFUG

\* Landesamt für Umwelt und Geologie

Die entsprechenden Bodendaten zur Parametrisierung der N-A-Simulationen in der Plotskala stammen aus dem Bodenerosionsprogramm Sachsen. Diese wurden für den obersten Horizont angenommen. Die unterlagernden Schichten wurden mit den Daten von KUHN (2005) erstellt.

### **2.3.5 Landnutzungsdaten**

Im Rahmen des Projektes sollte auch geprüft werden, welchen Einfluss die Qualität der Landnutzungsdaten auf die Simulation besitzt. Aus diesem Grund wurde analog zur Bodeninformation mit mehreren Datengrundlagen unterschiedlichen Detailgrades gearbeitet (Tab. 5).

Die geringste Detailliertheit, aber größte Flächendeckung besitzt das Digitale Landschaftsmodell Sachsens (ATKIS DLM, LVA, Stand 2005). Alle räumlich relevanten linien- und flächenhaften Objekte sind hier erfasst. Es handelt sich um eine statische Aufnahme ohne Erfassung der Kulturarten und Bearbeitungen.

Für den nächsten Detailgrad können seit 2005 sachsenweit Feldblöcke benutzt werden. Feldblöcke sind räumlich relativ statische Einheiten, die durch Landschaftselemente wie Wege, Straßen, Ge-

wässer u. a. getrennt sind. Über die Datenbank InVeKoS (LfL, Stand 2005) können jedem Feldblock die prozentualen Anteile der auf den Schlägen angebauten Kulturen zugeordnet werden.

**Tabelle 5:        Verwendete Landnutzungsinformation**

EZG	Landnutzungs- information	Maßstab	Abdeckung		Zeitliche Auflösung	Quelle
			Fläche [%]	Acker- fläche [%]		
Hölzelberg- bach	DLM	1:25.000	100	100	2005	LVA, Stand 2005
	Schlagkarte	ca. 1:10.000	37	100	1999 - 2002	HOFMEISTER 2004 in KACI- REK 2005
Lippersdor- fer Bach	DLM	1:25.000	100	75	2005	LVA, Stand 2005
	Feldblock	1:25.000	42	100	2005	LF L, Stand 2005
	Schlagkarte	ca. 1:10.000	42 37	100 89	2004 2005	NAUMANN 2005
Baderitzer Teich	DLM	1:25.000	100	92	2005	LVA, Stand 2005
	Feldblock	1:25.000	77	100	2005	LF L, Stand 2005
	Schlagkarte	ca. 1:10.000	75	97	2004 - 2005	KORN MANN 2005

Ergänzend dazu konnte mit Hilfe der im Rahmen des Förderprogramms Umweltgerechter Ackerbau gestellten Mulchsaatanträge (LFL, Stand 2005) die Art der Bearbeitung festgestellt werden. Als nachteilig ist der fehlende Raumbezug der einzelnen Kulturen innerhalb eines Feldblocks zu werten. Bei der Parametrisierung wird daher nur nach größtem Flächenanteil oder höchster Erosionsgefährdung klassifiziert. Die Frage nach den relevanten Stoff- und Wassereinträgen in den Vorfluter kann über die fehlende Verortung gefährdeter Flächen nur unzureichend beantwortet werden.

Den höchsten Detailgrad stellen die digitalen Schlaginformationen (Verortung, Kulturart und Bearbeitung) verschiedener Autoren dar, die in allen EZG in unterschiedlichem Umfang vorhanden waren. Für die Ackerflächen des Hölzelbergbach-EZG lagen diese Informationen vollständig vor. In beiden anderen Gebieten deckten sie eine Fläche über 50 % ab. Fehlflächen in der jeweiligen Datengrundlage wurden durch Informationen der nächstgrößeren Flächeninformation abgedeckt.

## **2.4    Bearbeitungsebenen**

### **2.4.1    Standortskala**

Mit Hilfe von Beregnungsexperimenten mit der Kleinberegnungsanlage wurde das Infiltrations- und Abflussverhalten auf landwirtschaftlich genutzten Flächen bestimmt. Auf der beregneten Fläche

wurden zusätzlich Bodenbedeckung, Hangneigung sowie Anfangs- und Endbodenfeuchte ermittelt. Diese Experimente dienen der Festlegung von Plausibilitätskriterien, auf deren Basis die Szenarienrechnungen validiert wurden.

#### 2.4.2 Plotskala

Die N-A-Simulationen der Plotskala dienen in erster Linie dazu, Erkenntnisse über die Funktionsweise des Modells, im Speziellen die Abbildung des Infiltrationsvorganges, zu gewinnen. Es handelt sich um die Flächen der LfL, bei denen verschiedene Bearbeitungsvarianten auf 44 m<sup>2</sup> großen Parzellen berechnet wurden. Es wurde versucht, die gemessenen Abflussganglinien mit dem Mehrschicht-Modell und den bestehenden Datengrundlagen möglichst genau zu reproduzieren und Möglichkeiten einer Simulationsverbesserung zu prüfen.

#### 2.4.3 Einzugsgebiet-Skala

Die Simulationen auf Einzugsgebietsebene stellen den größten Umfang der Modellvalidierung dar. Es handelt sich um drei Einzugsgebiete von 0,7 – 17 km<sup>2</sup> Größe in unterschiedlichen Landschaftsräumen Sachsens.

### 2.5 Sensitivitätsanalyse

Eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse ist Grundlage jeder Modellvalidierung. Nur mit dem Wissen um die sensitivsten Parameter lässt sich die Rechengüte sinnvoll interpretieren bzw. nachträglich die Parameterabschätzung anpassen.

Die vorliegende Sensitivitätsanalyse wurde mit beiden Modellversionen von EROSION 3D (Ver. 3.11 und Ver. 3.14, s. Kapitel 2.1.1) durchgeführt.

Eine Sensitivitätsanalyse des Modells WaSiM-ETH fand nicht statt, da SCHULLA (1997) und PÖHLER (2006) bereits hinreichende Ergebnisse zu dieser Thematik bereitstellen. Um die Sensitivitäten des Modells EROSION 3D zu ermitteln, wurde die Methode von NEARING et al. (1990) verwendet (Gl. 11).

(Gl. 11)

$$S = \frac{O_2 - O_1}{O_{12}} / \frac{I_2 - I_1}{I_{12}}$$

Dabei ist:

- $I_1$  Minimum der Inputgröße
- $I_2$  Maximum der Inputgröße
- $I_{12}$  Mittelwert der Inputgrößen
- $O_1$  Minimum der Outputgröße,
- $O_2$  Maximum der Outputgröße
- $O_{12}$  Mittelwert der Outputgrößen

Die auf Basis eines konkreten Werteintervalls berechneten Sensitivitäten sind nur auf andere Werteintervalle übertragbar, wenn ein linearer Zusammenhang zwischen Input- und Outputgrößen besteht. Bei den berechneten Größen ist das nicht der Fall (SCHMIDT 1996). Dieser Sachverhalt wurde bei der Auswahl der Werteintervalle berücksichtigt. Die Modellsensitivitäten wurden sowohl auf Basis von Plot- als auch auf Basis von Einzugsgebietssimulationen ermittelt.

In der Plotskala wurden die Parameterwerte eines Plotversuches (Nr. 68 Bodenerosionsprogramm Sachsen 1994, LfUG 1994) in drei verschiedenen Tiefen angepasst.

Folgende Parameter wurden betrachtet:

- Bodenart,
- Bodendichte,
- $C_{org}$ -Gehalt,
- Anfangsbodenfeuchte,
- Horizontmächtigkeit.

Diese wurden in virtuellen Infiltrationsversuchen mit 5 760 min (4 Tage) Simulationsdauer getestet, um die Befeuchtungsfrost möglichst tief in das Bodenprofil eindringen zu lassen.

Es wurde abgefragt:

- Summe der Infiltrationsraten im Gesamtprofil,
- Summe der Infiltrationsraten in der parametrisierten Schicht,
- Gesamteindringtiefe der Befeuchtungsfrost,
- Passierzeit der Befeuchtungsfrost durch die parametrisierte Schicht.

Da die natürliche Horizontierung bei der Parametrisierung beachtet und die anderen Parameter in der betreffenden Schicht beibehalten wurden, können Unterschiede zwischen den Parametersensitivitäten der einzelnen Horizonte aufgrund differierender Mächtigkeiten und anderer Parameterkonstellationen entstehen. Bei der Änderung der Bodeneigenschaften wurden durch die Anpassung der Anfangsbodenfeuchten die Matrixpotenziale des Bodenhorizontes beibehalten.

In der Einzugsgebietsskala wurden vor allem die Einstellungen und Datenableitungen des Modells EROSION 3D getestet, die für die anschließende Simulation benutzt wurden. Dazu zählen:

- Einbrenntiefe des Gewässernetzes in das DGM,
- Zurücksetzen der Infiltrationsleistung bei Niederschlagspausen,
- Niederschlagsschwellenwert,
- zeitliche Auflösung für die Modellrechnung,
- Niederschlagsdauer,
- Niederschlagsintensität.

Die übrigen Parameter von EROSION 3D wurden durch VON WERNER (2004) bereits auf ihre Sensitivität hin getestet.



## 2.6 Niederschlags-Abfluss-Simulationen

Niederschlags-Abfluss-Simulationen stellen einen Hauptschwerpunkt der hydrologischen Modellierung dar. Ziel der Modellierung ist es im Regelfall, die am Abflusspegel beobachtete Gebietsreaktion bei Niederschlagsbelastung durch entsprechend differenziert simulierte Prozesse der Abflussbildung nachzuvollziehen. Vereinfachend kann angenommen werden, dass bei übereinstimmendem zeitlichen Verlauf und Intensität der beobachteten und simulierten Gebietsreaktion die in dem betreffenden Modell als Systemprozesse hinterlegten Algorithmen als validiert betrachtet werden können. Dieser Sachverhalt trifft insbesondere dann zu, wenn die Beobachtungsergebnisse für verschiedene Belastungszustände und Gebiete reproduziert werden können, ohne das Modell vorher individuell kalibrieren zu müssen. Ziel der vorliegenden Arbeit war es insbesondere, den Beitrag der Erweiterungen des Modells EROSION 3D Im Hinblick auf die Reproduktion beobachteter Abflusszeitreihen zu untersuchen.

**Tabelle 6: Charakteristika der verwendeten Niederschlagsereignisse**

<b>Einzugsgebiet</b>	<b>Datum</b>	<b>N-Dauer [h]</b>	<b>N-Menge [mm]</b>	<b>N- Intensität [mm/min]</b>	<b>Abfluss- beiwert<sup>1</sup> Messung</b>	<b>Abfluss- beiwert<sup>1</sup> Schätzung</b>
Hölzelbergbach	18.06.1999	30,00	58,00	0,14	1 - 3	2 - 4
	05.07.1999	2,75	55,00	0,74	4 - 6	5 - 7
	07.11.2001	24,25	32,50	0,07	1 - 7	1
	05.12.2001	15,25	27,75	0,17	1 - 18	1
	14.04.2002	41,50	34,25	0,13	1 - 7	0
	16.07.2002	2,25	22,20	0,32	0 - 8	7 - 9
	11.08.2002	42,00	228,65	0,64	6 - 26	26 - 37
Lippersdorfer Bach	05.05.2004	5,25	25,20	0,21	1 - 2	6 - 9
	06.05.2004	12,75	28,20	0,15	2 - 4	7 - 9
	10.05.2004	9,25	24,00	0,14	4 - 9	8 - 11
	18.11.2004	26,50	29,40	0,07	4 - 7	3 - 5
	22.11.2004	13,50	23,80	0,12	11 - 21	8 - 11
	23.05.2005	8,75	19,70	0,17	2 - 11	13 - 18
	05.07.2005	13,25	40,20	0,17	1 - 8	0
	03.08.2005	9,75	21,40	0,17	10 - 15	3 - 8
	22.08.2005	7,75	34,30	0,27	2 - 16	0 - 2
Stausee Baderitz	20.07.2004	2,25	29,30	0,82	1 - 2	3 - 7
	22.07.2004	6,50	21,13	0,20	1 - 2	0 - 1
	18.11.2004	22,00	26,26	0,07	0 - 2	1 - 4
	22.11.2004	9,00	14,23	0,11	1 - 3	0 - 3
	01.07.2005	6,50	14,86	0,36	0 - 2	0 - 2
	05.07.2005	13,75	33,40	0,18	0 - 1	4 - 8
	03.08.2005	9,00	24,00	0,13	0 - 2	0 - 2

N = Niederschlag <sup>1</sup> = Abflussbeiwertbestimmung mit SCS Curve Number Verfahren (LECHER et al. 2001)

Bei der Auswahl der Niederschlags-Abflussereignisse wurde darauf Wert gelegt, dass auf einen mehrstündigen Niederschlag ein deutliches Abflussereignis folgt. Es handelt sich vornehmlich um Niederschlagsereignisse über sechs Stunden Dauer und größer 15 mm Gesamtniederschlag (Tab. 6). Die Gebietsreaktion wurde mit dem SCS Curve Number Verfahren (LECHER et al. 2001) abgeschätzt und mit den gemessenen Werten nach Separation der Basisabflüsse verglichen.

### **2.6.1 EROSION 3D**

Die im Projekt durchgeführte Modellvalidierung umfasst die beiden Erweiterungen des Modells EROSION 3D:

- Mehr-Schicht-Infiltrationsmodellansatz (Versionen 3.11 und 3.14),
- Abflussretentions- und -translationsansatz.

Beide Modellerweiterungen werden unabhängig voneinander getestet und deshalb auch isoliert angewendet. EROSION 3D wurde in allen Fällen ohne Kalibrierung der Abflussprognose auf beobachtete Abflusskennwerte angewendet.

#### Mehr-Schicht-Infiltrationsmodell der Modellversionen 3.11 und 3.14

Der Infiltrationsprozess ist der dominierende Prozess der Abflussbildung und stellt deshalb den Hauptanteil der im Projekt bearbeiteten Fragestellung dar.

Den ersten Validierungsschritt bilden N-A-Simulationen auf Plot-Ebene, bei denen der Infiltrationsprozess im Vordergrund steht. Die Parametrisierung dieser Ereignisse erfolgte über die Protokolle der Berechnungsversuche 64 - 76 aus dem Bodenerosionsprogramm Sachsen (LfUG 1994). Im Anschluss daran wurden N-A-Simulationen auf EZG-Ebene durchgeführt. Danach wurden die Ergebnisse des Ein-Schichten-Ansatzes mit den Ergebnissen des Mehr-Schichten-Ansatzes verglichen.

Um die Szenarientauglichkeit des Modells zu bewerten, wurden Landnutzungs- und Bewirtschaftungsszenarien simuliert. Diese Ergebnisse wurden auf Basis der Feldmessungen und Angaben in der Literatur auf Plausibilität geprüft. Aus vorherigen Studien geht hervor (SCHMIDT 1996; VON WERNER 2004), dass die Abflussprognose sehr stark von der Vorbodenfeuchte abhängt, welche aufgrund ihrer zeitlichen und räumlichen Variabilität nur sehr fehlerbehaftet geschätzt werden kann.

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Parametrisierungssoftware DPROC (Ver. 1.50, GEOGNOSTICS 2006) für die flächendeckende Schätzung der Anfangsbodenfeuchte verwendet. In der verwendeten Version ermöglicht diese die quantitative Schätzung in Abhängigkeit von der Vorgabestufe „gering“, „normal“ und „hoch“. Die Zuweisung der Bodenfeuchtezustände erfolgte – in der zur Verfügung stehenden Version - lediglich in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung und Bodenarten.

Um die Schätzungsgüte in dieser Beziehung zu verbessern, wurde mit zwei Verfahren versucht, die Variabilität der Bodenfeuchte in den Einzugsgebieten abzubilden.

Der Topographische Index wird als Maß der relativen Feuchtigkeit einer Rasterzelle gegenüber dem Gebietsmittel verwendet (BEVEN & KIRKBY 1979, MOORE et al. 1993). Dieser ausschließlich vom Relief abhängige Index ist bei jedem Ereignis konstant und bezeichnet die erhöhte Bereitschaft entsprechender Flächen, bei einem N-A-Ereignis zum Sättigungsflächen-Abfluss (z. B. durch hohen Grundwasserstand) beizutragen.

Um die zeitliche Dynamik abzubilden, wurden die Bodenfeuchtezustände vor einzelnen Ereignissen mit Hilfe einer Wasserhaushaltssimulation mit dem Modell WaSiM-ETH ermittelt. Darüber hinaus wurden die von den amtlichen Kartenwerken vorgegebenen Lagerungsdichten korrigiert und die vom Programm DPROC erstellten Eingabeparameter so angepasst, dass damit die Effekte der konservierenden Bodenbearbeitung realistischer abgebildet werden. Letzteres beinhaltet eine Verringerung der Lagerungsdichte im Bearbeitungshorizont aufgrund erhöhten Makroporenvolumens und die Erhöhung des Skinfaktors ( $>1$ ) in tieferen Schichten zur verbesserten Abbildung der Makroporenkontinuität.

### **2.6.2 Wasserhaushaltssimulation mit WaSiM-ETH**

Die Wasserhaushaltssimulation dient, wie im Kap. 2.6.1 erwähnt, der Definition der Vorfeuchtebedingungen in den Einzugsgebieten vor ausgewählten N-A-Ereignissen. Obwohl diese Methode relativ aufwändig ist, stellt sie in Abhängigkeit der Modellgüte die sicherste Möglichkeit dar, diesen Parameter diskret in Raum und Zeit abzubilden. Dazu wurden für jedes EZG kontinuierliche Modelle erzeugt, d. h., dass die Ergebnisse aus den Simulationen des Vorjahres als Eingangsdaten der Initialzustände für das Folgejahr verwendet wurden. Durch dieses Verfahren können die akkumulierte Schneemenge und das gespeicherte Bodenwasser für die Bilanz des darauf folgenden Jahres verfügbar gemacht werden. Ziel dieser Wasserhaushaltssimulation war eine möglichst realistische Abschätzung der Feuchtebedingungen im jeweiligen Gebiet. Aus diesem Grund wurde neben der Wiedergabegenauigkeit der Abflussspitzen auch die Qualität der Trockenwetterabflüsse in die Modellkalibrierung einbezogen.

## **2.7 Modellgüte**

Modelle werden im Allgemeinen danach beurteilt, wie sie in der Lage sind, die Realität nachzubilden, d. h. wie stark die modellierten Ergebnisse mit den gemessenen übereinstimmen. Die primäre Validierungsgröße ist im bearbeiteten Projekt das Volumen sowie der zeitliche Verlauf des Gerinne- bzw. Oberflächenabflusses (Ganglinie). Für die Wasserhaushaltssimulation mit WaSiM-ETH wurden Zwischenabfluss, Basisabfluss sowie Gesamtabfluss am Pegel betrachtet und auf Plausibilität geprüft. Vor und während der Bewertung muss die Güte der Eingangsdaten bewertet werden, wobei nach AITKEN (1973) zwei Fehlerarten zu unterscheiden sind:

- zufällige Fehler, die meist schnell erkannt werden,
- systematische Fehler, die zu falscher Parametrisierung führen und sehr schwer erkannt werden. Sie haben oft Fehlinterpretationen der Szenarienrechnungen zur Folge.

Für den Vergleich von gemessenen und simulierten Abflüssen können zwei sich ergänzende Ansätze gewählt werden.

Eine subjektive Bewertung beinhaltet den visuellen Vergleich der Ganglinien zum Erkennen von Mustern, die mit statistischen Methoden nicht erfasst werden können, und die Plausibilitätsbewertung mit so genanntem Expertenwissen. Die objektive Bewertung arbeitet grundsätzlich mit statistischen Werkzeugen für die Kalibrierung.

Für die statistische Bewertung von modellierten und gemessenen Größen stehen in der Modellierung vielfältige Werkzeuge zur Verfügung. Im ersten Schritt können Mittelwerte, Varianzen, Volumenfehler (VE) und mittlere Fehler (MAE) berechnet werden. Diese Maße sagen allerdings nichts über individuelle Ereignisse aus und unterscheiden nicht zwischen zufälligen und systematischen Fehlern (AITKEN 1973, LEGATES 1999).

Verschiedene Anwendungen haben gezeigt, dass das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) und die erklärte Varianz (EV) nach NASH & SUTCLIFFE 1970 die robustesten Gütemaße sind (AHRENS 2003, AITKEN 1973, ECKHARD 2001, MADSEN et al. 2002, PERRIN et al. 2001 in PÖHLER 2006).

In der Arbeit werden vor allem die Modellergebnisse von WaSiM-ETH mit den oben genannten Gütemaßen bewertet.

Die Validierung von EROSION 3D erfolgt in den meisten Fällen über den Vergleich der Abflussvolumina, lediglich ausgewählte Ereignisse werden mit den oben beschriebenen Gütemaßen validiert.

## **2.8 Modellkalibrierung**

Die Kalibrierung hydrologischer Modelle versucht durch die Variierung der Parameter die Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Variablen zu minimieren. In erster Linie werden Parameter angepasst, die nicht durch Messdaten erfasst werden können oder für die keine Daten aus Messungen oder aus der Literatur vorliegen (GIERTZ 2004).

In erster Linie wurde das Modell WaSiM-ETH kalibriert, da es über geeignete Parameter verfügt. Diese steuern vor allem die Abtrennung der einzelnen Abflusskomponenten. In den Arbeiten von SCHULLA (1997) und PÖHLER (2006) wird umfangreich darauf eingegangen. In der vorliegenden Studie wird eine manuelle Anpassung der Parameter nach dem trial-and-error-Verfahren angewendet, welches nach REFSGAARD & STORM (1996) v. a. für komplexere Modelle die bevorzugte Methode darstellt.

Modellseitig kann die Abflussprognose von EROSION 3D sowohl über eine Korrektur der Anfangsbodenfeuchte als auch der (effektiven) gesättigten Leitfähigkeit des Bodens kalibriert werden. In der Regel wurden drei Anfangsfeuchtezustände simuliert, sodass die Spannweite der Modellergebnisse in Abhängigkeit der Vorfeuchte hinreichend zum Ausdruck kommt.

## 2.9 Modellparametrisierung

### 2.9.1 EROSION 3D

Die Erstellung von modellverwendbaren Parameterdateien (Angaben zu Bodenfeuchte, -dichte, Bedeckungsgrad usw.) fand mit der Software DPROC Ver. 1.50 (GEOGNOSTICS 2006) statt. Dabei wurden zahlreiche Szenarien erstellt, die nachfolgend erläutert werden. Mit dem Datenbankprozessor DPROC Ver. 1.50 ist es möglich, in Monatsschritten Initialzustände für das Modell EROSION 3D zu erstellen. Als Datengrundlage stützt sich das Programm auf den bereits 2000 entwickelten Digitalen Parameterkatalog (KÖHLER 2000). Fehlende Datenwerte für die Parameter Oberflächenrauigkeit, Erosionswiderstand, Lagerungsdichte und Skinfaktor werden über DPROC Ver. 1.50 abgeschätzt (VON WERNER & SCHRÖDER 2005).

Die Rauminformationen der Landnutzungs- und Bodendaten werden hierarchisch übereinander geordnet und zu einem Rasterdatensatz verschnitten (Tab. 7).

Die Informationen zu Bodendichte,  $C_{org}$ -Gehalt, Bodenart und Skelettgehalt wurden ab der zweiten Schicht aus den digitalen Bodenkarten abgeleitet.

**Tabelle 7: Datenhierarchie bei der Parametrisierung**

Datenart EZG	Landnutzungsinformation	Bodeninformation
Hölzelbergbach	ATKIS DLM Linien Schlagkarte ATKIS DLM Polygone	Reichsbodenschätzung BÜK 200
Lippersdorfer Bach	ATKIS DLM Linien Schlagkarte InVeKoS Feldblöcke ATKIS DLM Polygone	BK <sub>konz</sub> BÜK 200
Stausee Baderitz	ATKIS-DLM Linien Schlagkarte InVeKoS Feldblöcke ATKIS-DLM Polygone	BK <sub>konz</sub> BÜK 200

Die Mulchbedeckung des Bodens wurde bei konservierender Bearbeitung mit 30 % angenommen (Tab. 8). Diese Größe stellt den zu erreichenden Wert dar, auch wenn lokal Unterschiede bei der Mulchbedeckung auftreten können.

Wenn die reale Bearbeitung nicht bekannt war, wurde global Pflugbearbeitung angenommen. Zusätzlich zu einem „normalen“ Bodenzustand wurde ein „verschlämmter“ parametrisiert, um den Einfluss von verschlammten Bodenoberflächen auf das Simulationsergebnis abzuschätzen. Alle

Parameterdatensätze wurden für drei verschiedene Feuchtezustände erzeugt, um den Einfluss der Vorbodenfeuchte zu testen.

**Tabelle 8: Parametrisierung der Bodenbearbeitungen**

Bearbeitung	Bodenzustand	Mulchgehalt	Bearbeitung	Bodenfeuchte
Ist-Stand	normal/verschlämmt	0 %/30 %	Pflug/Grubber	gering/normal/hoch
Pflug	normal/verschlämmt	0 %	Pflug	gering/normal/hoch
Konservierende Bodebearbeitung	normal/verschlämmt	30 %	Grubber	gering/normal/hoch

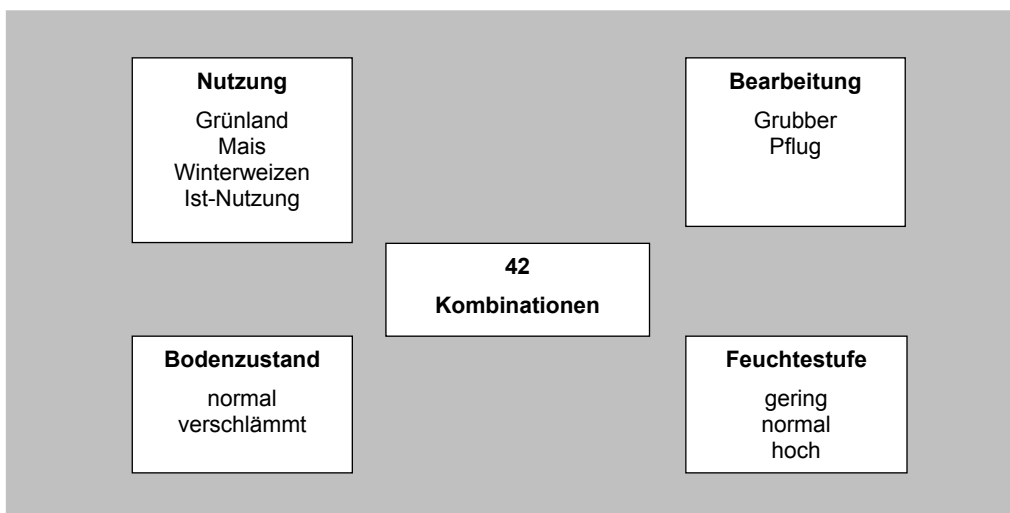
Szenarien

Zur umfangreichen Validierung sollte ermittelt werden, inwieweit das Modell EROSION 3D in der Lage ist, verschiedene Modellszenarien abzubilden. Um eine möglichst große Heterogenität hinsichtlich Gefährdung und Nichtgefährdung abzudecken, wurden dem Ist-Stand-Szenario folgende Szenarien hinsichtlich der ackerbaulichen Nutzung in einem Einzugsgebiet hinzugefügt:

- Mais (Sommerfrucht, Anfälligkeit in den Monaten Mai bis Juli),
- Winterweizen (Winterfrucht, Anfälligkeit in den Monaten Ende September bis Oktober),
- Grünland (ganzjährige Bedeckung, geringe Anfälligkeit).

Grundlage der Bodeninformation dieser Szenarien ist die BÜK200, da in diesem Zusammenhang der Einfluss der Bodeninformation auf die Simulation erfasst werden kann.

Bei allen Szenarien (siehe Abb. 2) wurden konservierende und konventionelle Bearbeitung sowie „unverschlämte“ und „verschlämte“ Initialzustände unterschieden und alle Feuchtezustände ermittelt.



**Abbildung 2: Simulationsszenarien für EROSION 3D**

### 2.9.2 WaSiM-ETH

Die Parametrisierung des Modells WaSiM-ETH erfolgte ähnlich wie bei EROSION 3D durch die Erstellung von Rasterdaten der Boden- und Landnutzungsinformationen. Es war erforderlich, die reliefabhängigen Daten wie z. B. senkenfreie Höheninformation, Fließzeiten, Abflussrichtung in einem Preprocessing mit der Software TANALYS (SCHULLA 1997) abzuleiten.

Das Modell verlangt als Eingabeparameter die bodenschichtendiskrete Angabe der VAN GENUCHTEN-Parameter (1980). Diese wurden über die Pedotransferfunktion von ZACHARIAS & BOHNE (2006) ermittelt.

Um den Einfluss der Landnutzung, insbesondere der Bodenbearbeitung, abbilden zu können, wurden folgende Annahmen getroffen. Konservierende nichtwendende Bodenbearbeitung hat aufgrund geringerer mechanischer Eingriffe höhere Bodendichten zur Folge (MICHAEL et al. 1996, ZIMMERLING 2004). Einige Autoren beschreiben eine gleichmäßige Dichtezunahme mit der Tiefe auf konservierend bearbeiteten Flächen im Vergleich zur sprunghaft ansteigenden auf konventionell bearbeiteten Flächen unterhalb der ersten 25 cm (BUCHNER 2003, GRUBE 2003, RICHTER & TEBRÜGGE 1996). Der Parameter  $k_{rec}$  (Abnahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe) wurde aus diesem Grund bei konventionell bestellten Flächen um 10 % vergrößert.

Bezüglich der Bodenbiologie wird in allen Arbeiten festgestellt, dass infolge erhöhter Regenwurmabundanzen auf konservierend bestellten Flächen die Dichte der Regenwurmgänge (Makroporen) ansteigt. Die Makroporen dieser Standorte zeichnen sich durch eine hohe Kontinuität aus (ZIMMERLING 2004, NITZSCHE et al., 2000, GRUBE 2003, JOSCHKO et al. 1996, RICHTER & TEBRÜGGE 1996). Im Modell wurde diesem Sachverhalt durch die Implementierung eines Makroporenflusses Rechnung getragen. Bei Überstauung des Bodens wird das Wasser in die Makroporen abgeleitet und gelangt in tiefere Bodenschichten.

Der Schwellenwert der Makroporeninfiltration wurde auf 3 mm/h Niederschlag gesetzt. Die Makroporen reichen bis  $\varnothing$  50 cm Bodentiefe, was mit den Ergebnissen von ZIMMERLING (2004) für das Sächsische Lösshügelland vergleichbar ist. Anfänglich besitzen sie eine Infiltrationskapazität von 15 mm/h, die mit zunehmender Bodentiefe um 70 % reduziert wird.

Es ergeben sich folgende Parameteränderungen:

- Erhöhung  $k_{rec}$  um 10 % (konventionelle Bearbeitung),
- Erhöhung der Bodendichte von 1,3 (konventionelle Bearbeitung) auf 1,5 g/cm<sup>3</sup> (konservierende Bearbeitung),
- Ermöglichung eines Makroporenflusses (konservierende Bearbeitung).

### 3 Untersuchungsgebiete

#### 3.1 Standortskala

Die im Projektzeitraum durchgeführten Beregnungsversuche fanden ausschließlich im Sächsischen Lösshügelland statt. Damit ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Einzugsgebiete außerhalb der Region zwar eingeschränkt, dennoch können qualitative Rückschlüsse zum Infiltrationsverhalten landwirtschaftlich genutzter Flächen unterschiedlichen Managements gezogen werden.

##### Lüttewitz

Der Bodenbearbeitungsversuch Lüttewitz liegt am östlichen Rand des Leipziger Lösstieflandes. Die jährliche Niederschlagssumme beträgt 547 mm bei ca. 8,8 °C Jahresdurchschnittstemperatur (SCHUHMANN & MÜLLER 1995). Auf dem Versuchsstandort dominieren Parabraunerden-Pseudogleye (NITZSCHE et al. 2002).

Die Fläche in Lüttewitz wird durch die Südzucker AG bewirtschaftet. Auf dem 30 ha großen Schlag werden in einer Winterweizen-Winterweizen-Zuckerrüben-Fruchtfolge vier verschiedene Bodenbearbeitungsverfahren durchgeführt (Tab. 9). Die Beregnungsversuche fanden im Oktober 2006 unmittelbar nach Aussaat des Winterweizens statt.

**Tabelle 9: Bearbeitungsvarianten und -tiefen des Bodenbearbeitungsversuches in Lüttewitz**

Bearbeitungsvarianten	Bearbeitungstiefe [cm]
Pflug	27
Direktsaat	4
Grubber	10
Grubber mit Tiefenlockerung	10/40

##### Mockritz

Die Versuchsfläche Mockritz befindet sich im Mittelsächsischen Lösshügelland. Bei ca. 8,2 °C Jahresdurchschnittstemperatur fallen ca. 620 mm Niederschlag jährlich. Starkniederschläge treten vor allem im Frühjahr und Sommer auf. Als Leitbodentyp werden Parabraunerden und deren Derivate angegeben (BUDER 2000). In der Fruchtfolge werden Winterweizen, Triticale, Winterraps und Zuckerrüben angebaut.

Auf der Untersuchungsfläche wurden fünf verschiedene Bodenbearbeitungsvarianten durchgeführt (Tab. 10). Die Beregnungsversuche fanden im Oktober 2006 in Zusammenarbeit mit der Universität Hohenheim statt.



**Tabelle 10: Bearbeitungsvarianten und -tiefen des Bodenbearbeitungsversuchs Mockritz**

<b>Bearbeitungsvarianten</b>	<b>Bearbeitungstiefe [cm]</b>
Grubber flach	5
Grubber mittel	10
Grubber tief	15
Stoppelpflug	10
Stoppelpflug	20

### **3.2 Plot-Skala**

#### Methau

Die Untersuchungsfläche befindet sich in der Nähe von Colditz im Sächsischen Muldelösshügelland mit jährlich ca. 630 mm Niederschlag und einer Jahresdurchschnittstemperatur von 8 °C. Die verbreiteten Bodentypen sind Pseudogley-Fahlerden und Pseudogley-Parabraunerden (LfL 2007). Es handelt sich um eine Versuchsfläche der LfL, auf der seit 1992 ein Bodenbearbeitungsversuch mit einer Zuckerrüben-Winterweizen-Wintergerste-Fruchtfolge durchgeführt wird. Die Beregnungsversuche 65 - 76 in Methau (Tab. 11) fanden im Oktober 1994 nach Aussaat von Winterweizen bzw. Wintergerste statt (LfUG 1994).

**Tabelle 11: Berechnungsversuche in Methau mit Angaben zur Kulturart, der Bearbeitungsvariante und Bearbeitungstiefe (LfUG 1994)**

Versuch	Kulturart	Bearbeitung	Bearbeitungstiefe [cm]
65	Wintergerste	Zinkenrotor	4
66	Wintergerste	Zinkenrotor	4
67	Wintergerste	Pflug	25
68	Wintergerste	Pflug	25
69	Winterweizen	Zinkenrotor	4
70	Winterweizen	Zinkenrotor	4
71	Winterweizen	Grubber	10
72	Winterweizen	Grubber	10
73	Winterweizen	Pflug	15
74	Winterweizen	Pflug	15
75	Winterweizen	Pflug	30
76	Winterweizen	Pflug	30

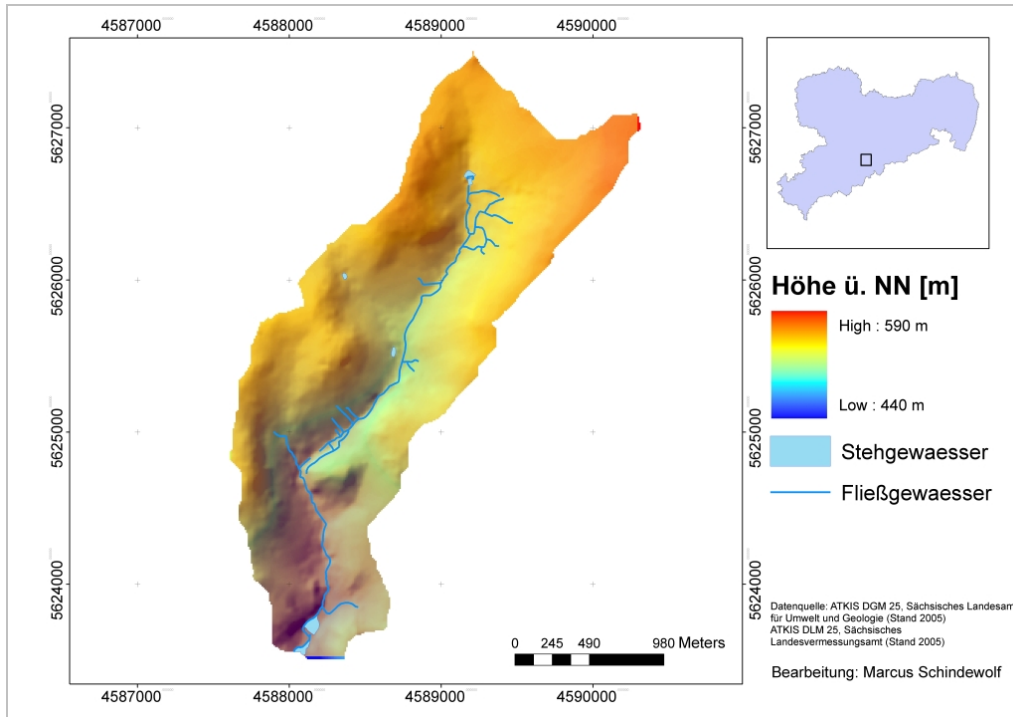
### 3.3 Einzugsgebiet-Skala

#### 3.3.1 Einzugsgebiet Saidenbachtalsperre

Die Untersuchungsgebiete Lippersdorfer Bach und Hölzelbergbach gehören zum selben Gesamteinzugsgebiet, sodass sie im Folgenden gemeinsam beschrieben werden.

##### 3.3.1.1 Lage und Ausdehnung

Die Untersuchungsgebiete Lippersdorfer Bach und Hölzelbergbach befinden sich als Teileinzugsgebiete der Talsperre Saidenbach auf der Nordabdachung des Erzgebirges im Übergangsbereich zwischen Mittlerem Erzgebirge und Osterzgebirge. Die Talsperre liegt ca. 25 km südlich von Freiberg und 30 km östlich von Chemnitz und besitzt ein Gesamteinzugsgebiet von 60,7 km<sup>2</sup>. Hydrologisch gehört das EZG der Talsperre zum Elbestromgebiet. Sie entwässert über die Flöha die Zschopau, die Freiburger und die Vereinigte Mulde in die Elbe (THÜRKOW 2002). Die Teileinzugsgebiete Lippersdorfer Bach (Abb. 3) und Hölzelbergbach (Abb. A 5) befinden sich im Norden und nehmen 0,7 km<sup>2</sup> (Hölzelbergbach) bzw. 4,4 km<sup>2</sup> (Lippersdorfer Bach) ein.



**Abbildung 3: EZG Lippersdorf, Lage und Relief**

### 3.3.1.2 Klima

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Luvbereich des Erzgebirges und ist durch ein typisches Mittelgebirgsklima gekennzeichnet (RICHTER & AURADA 1984), mit mittleren jährlichen Niederschlägen von 948 mm (Zeitreihe 1967 - 1996, Messstation Reifland, LTV des Freistaates Sachsen) und einer Jahresdurchschnittstemperatur von 6,8 °C. Die höchsten Niederschlagsmengen werden im Sommerhalbjahr erreicht. Dabei treten häufig Starkniederschläge auf.

Gemäß Parameterkatalog Sachsen (MICHAEL et al. 1996) gehört das Gebiet zur Niederschlagszone 7 Unteres Erzgebirge und Erzgebirgsvorland, mit 22 erosiven Ereignissen im Referenzjahr.

Durch das bewegte Relief im Umkreis der Talsperre entsteht eine sehr kleinräumige Differenzierung der Niederschläge durch lokale Luv- und Leegebiete, deren Folge beträchtliche Niederschlagsunterschiede innerhalb des Untersuchungsgebietes sind (SEIBT 2003).

Der Lippersdorfer Bach besitzt eine mittlere Abflussmenge von ca. 0,06 m<sup>3</sup>/s (Zeitreihe 2000 - 2004, LTV Sachsen). Der Hölzelbergbach hat eine mittlere Abflussmenge von ca. 0,02 m<sup>3</sup>/s (Zeitreihe 1999 - 2002, LTV Sachsen). Die Abflussspitzen beider Gewässer liegen im Frühjahr nach der Schneeschmelze und im Sommer zwischen Juli und August.

Beide Bäche entwässern in die Saldenbachtalsperre, die zwischen 1929 und 1933 zur Trinkwasserversorgung der Stadt Chemnitz errichtet wurde. Sie besitzt ein Fassungsvermögen von 22,4 Mio. m<sup>3</sup> Wasser und bedeckt eine Fläche von 146 ha (LfUG 1997).

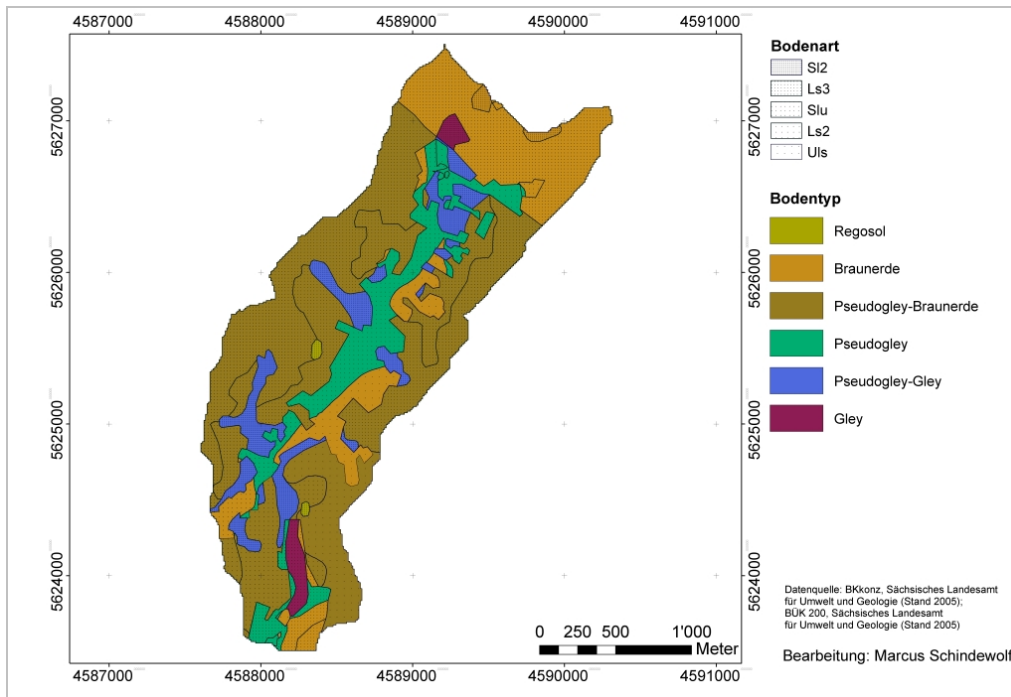
Der Wasserhaushalt des Talsperreneinzugsgebietes ist mehrfach untersucht worden (u. a. BEIER 1996, SCHWARZE 2004, SCHWARZE et al. 1995 und 1996, THÜRKOW 2002, WERNECKE 1983).

### **3.3.1.3 Geologischer Untergrund, Boden und Relief**

Über dem kristallinen Deckgestein befindet sich eine bis max. 5 m mächtige Lockergesteinsdecke, die im Bereich flach geneigter Flächen aus autochthonem Verwitterungsmaterial und im Bereich stärker geneigter Flächen aus dessen Umlagerungsprodukten besteht (BEIER 1996).

Die aus dem Gneisgestein entstandenen Verwitterungsböden (Abb. 4 und A 7) sind nährstoffarm und besitzen durchschnittliche Ackerzahlen um 32 (THÜRKOW 2002). Das Relief im Gebiet wird durch sanft gerundete Höhen und weite, offene Täler bestimmt. Die Verteilung der Böden ist vom Relief abhängig.

In den Kuppenbereichen im Norden mit oberflächennah anstehendem Festgestein kommen vor allem gut drainierte Braunerden mit hohen Skelettbodenanteilen (>30 %) vor. Die Böden der stärker geneigten Hangbereiche werden durch stauwasserbeeinflusste Pseudogley-Braunerden (SS-BB) repräsentiert. Hohe Sandgehalte und verhältnismäßig geringe Tonanteile verdeutlichen die teilweise hohen Erosionsgefährdungen dieser Böden an stark geneigten Hängen. Die Tiefenlinien und Auenbereiche werden durch Kolluvien bedeckt, deren Leitböden grundwasserbeeinflusste Pseudogley-Gleye (SS-GG) und Gleye (GG) sind. Diese sind bis über 1 m mächtig und bestehen aus feinkörnigen Lehmsubstraten.



**Abbildung 4: Bodentypen und Bodenarten im EZG Lippersdorf**

### 3.3.1.4 Landnutzung

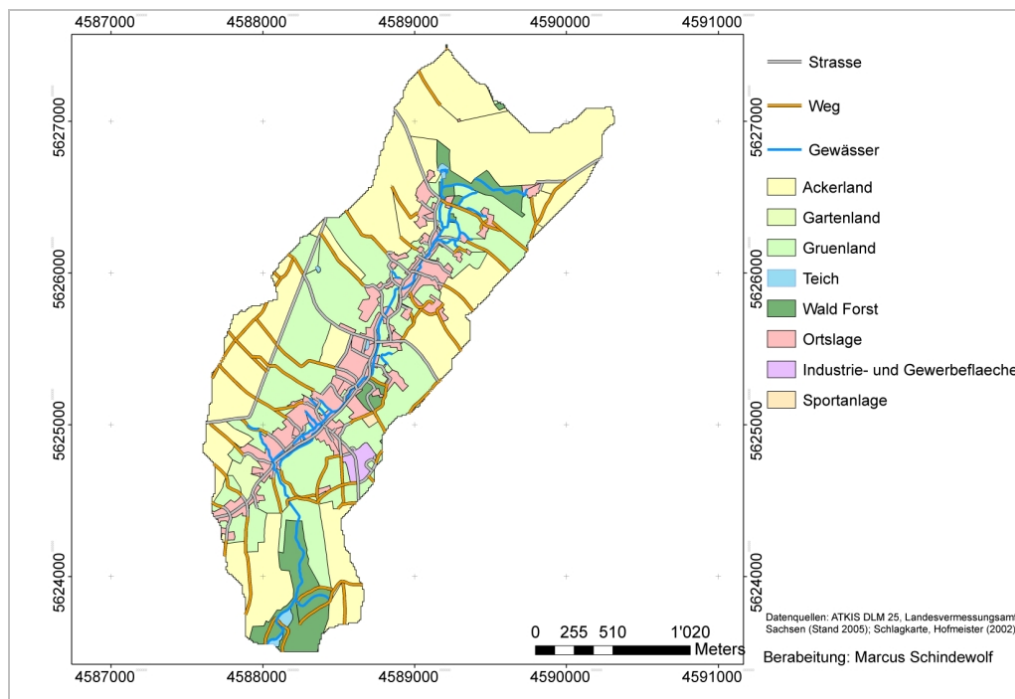
Das Gesamteinzugsgebiet der Saidenbachtalsperre wird überwiegend landwirtschaftlich genutzt (78 %). Die übrigen Anteile sind gemischte Nutzungen: ca. 6 %, Ortslagen ca. 6 % und Wald bzw. Forst mit ca. 8 % im Durchschnitt (SEIBT 2003). In der Tab. 12, Abb. 5 und Abb. 6 ist die Nutzungsverteilung in den Teileinzugsgebieten Lippersdorfer Bach und Hölzelbergbach aufgeführt.

**Tabelle 12: Anteilige Flächennutzung der Teileinzugsgebiete Lippersdorfer Bach und Hölzelbergbach**

Nutzung	Lippersdorfer Bach [%]	Hölzelbergbach [%]
Ackerland	45	40
Grünland	30	42
Fläche gemischter Nutzung	10	5
Ortslage	10	5
Wald/Forst	5	8

Trotz geringer Ackerzahlen (22 - 41) überwiegt die ackerbauliche Nutzung im Gebiet. Marktfruchtanbau dominiert die Produktion. Die Hauptanbaufrüchte sind Getreide (Triticale, Gerste) und Futterpflanzen (Klee gras, Silomais). Nach SCHMIDT et al. (2004) werden über 80 % der Flächen konservierend, d. h. ohne Pflug bewirtschaftet. Neben dem Ackerbau liegt der zweite Nutzungsschwer-

punkt im Gebiet im Bereich auf Viehhaltung in Verbindung mit Grünlandnutzung. Es dominiert die Rinderzucht mit dem Schwerpunkt Milchproduktion.



**Abbildung 5: Landnutzung im EZG Lippersdorf**

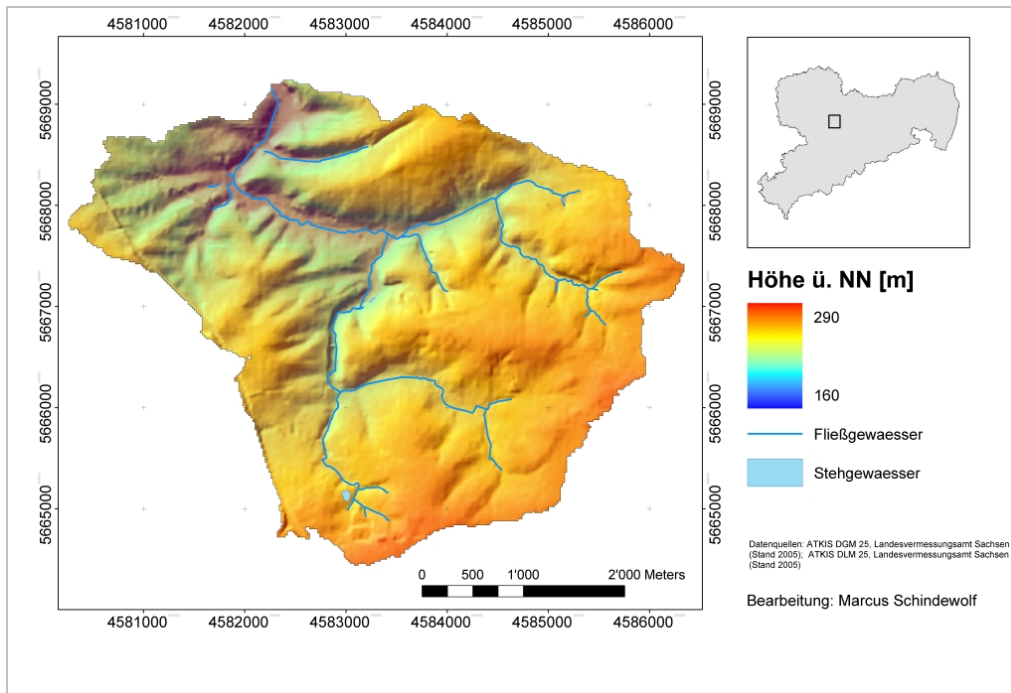
Die Abwässer der ländlich geprägten Siedlungen werden über ein Trennsystem, bei dem alles Niederschlagswasser auf schnellstem Wege in die Vorflut eingeleitet wird, entwässert (NAUMANN 2005). Demzufolge ist die Eignung des Gebietes zur Validierung gegeben, da Verluste über eine Kanalisation nicht stattfinden.

### 3.3.2 Stausee Baderitz

#### 3.3.2.1 Lage und Ausdehnung

Das Untersuchungsgebiet Stausee Baderitz ist im Naturraum Mittelsächsisches Lösshügelland gelegen und Teil des intensiv landwirtschaftlich genutzten EZG der Jahna. Die Jahna, ein Elbezufluss mit einer Gesamtlänge von 37 km und einer Einzugsgebietsfläche von 244 km<sup>2</sup>, erstreckt sich zwischen Döbeln und Riesa und ist in insgesamt 13 Teileinzugsgebiete unterteilt. Das EZG Obere Jahna umfasst den südlichen Teil des Gebietes von der Quelle bei Obersteinbach bis zum nördlichen Ausgang des Stausee Baderitz. Da im Zentrum der Modellvalidierung das Pegelinzugsgebiet steht, wird im weiteren Verlauf der Begriff Stausee Baderitz synonym verwendet.

Das EZG liegt 5 km östlich von Döbeln auf einer Höhe zwischen 180 und 290 m ü. NN (Abb. 6). Mit einer Gesamtgröße von 20,1 km<sup>2</sup> fallen 17,5 km<sup>2</sup> auf das EZG der Jahna bis zum Pegel Mochau und 2,6 km<sup>2</sup> bilden das unmittelbare Stausee-EZG (SEIDEL 2003).



**Abbildung 6: EZG Baderitz, Lage und Relief**

### 3.3.2.2 Klima

Das Einzugsgebiet der Jahna befindet sich im mäßig trockenen, schwach kontinental geprägten Binnenlandklima der unteren Lagen im Hügel- und Tiefland (BUDER et al. 2000). Die Jahresniederschlagsmenge beträgt 650 - 700 mm bei einer mittleren Jahrestemperatur von ca. 8,5 °C.

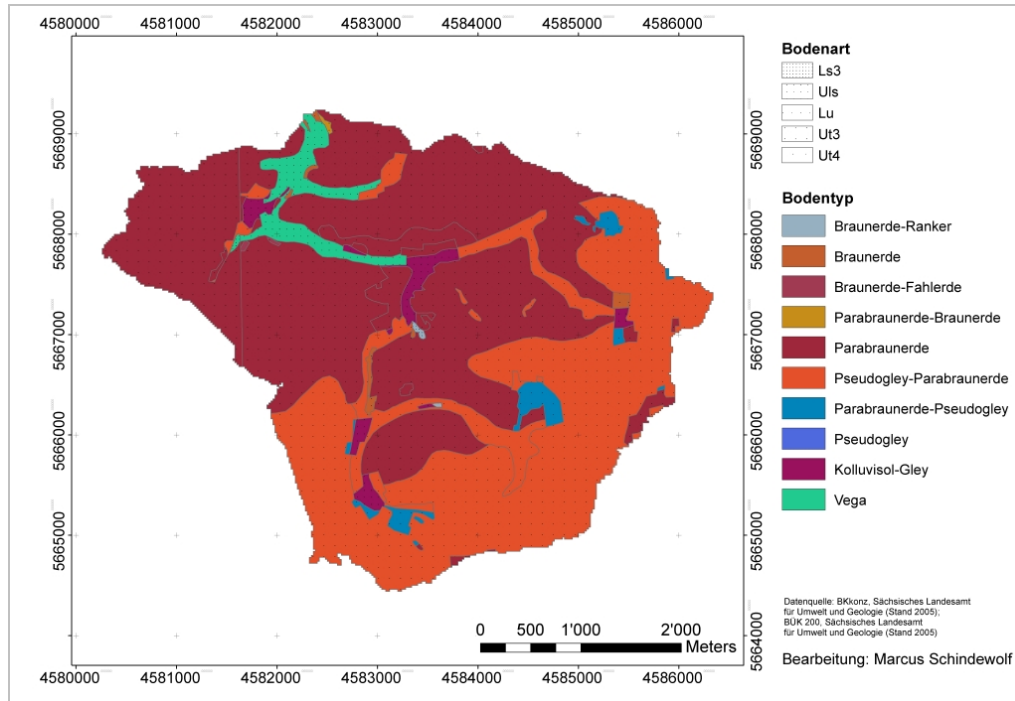
Gemäß Parameterkatalog Sachsen (MICHAEL et al. 1996) gehört das Gebiet zur Niederschlagszone 3 Dresdner Elbtalgebiet mit 29 erosiven Ereignissen im Referenzjahr. Besonders in den Monaten Mai bis September kommt es im Zusammenhang mit konvektiven Starkregen zu teilweise heftigen Abfluss- und damit verbundenen Erosionsereignissen mit entsprechenden Sedimenteinträgen in den Stausee Baderitz. Die Folge dieser Dynamik sind Verlandungs- und Eutrophierungsprozesse im Stausee Baderitz (BIERMANN 2000).

Die Jahna speist den Stausee mit einem durchschnittlichen Zufluss von 0,15 m<sup>3</sup>/s (Zeitreihe, LfL 2004 - 2005). Die Abflussspitzen befinden sich im Frühjahr zur Schneeschmelze und in den Sommermonaten.

### 3.3.2.3 Geologischer Untergrund, Boden und Relief

Im Einzugsgebiet Baderitz wird das kristalline Grundgestein von einer bis zu 15 m mächtigen Lössschicht bedeckt. Dies hatte die Ausprägung von Parabraunerden und deren Derivaten zur Folge (Abb. 7). In den Hangbereichen herrschen Pseudogley-Parabraunerden (SS-LL) und Braunerden (BB) vor. In den Tälern haben sich Gley-Parabraunerden (GG-LL) und Normvega (ABn) entwickelt. Das Untersuchungsgebiet besitzt ein sehr hügeliges Relief mit deutlich sichtbaren Tiefenlinien, in

denen die Konzentration von Oberflächenabfluss zu einem raschen Abfluss und damit verbundenen Erosionsprozessen führt. Das Vorhandensein von wasserundurchlässigeren Bodentypen in den oberen Hangbereichen unterstützt diese Dynamik. Mittlere Hangneigungen von 5 % und das Vorhandensein von schluffigen Substraten verdeutlichen zudem die Erosionsproblematik im Gebiet.

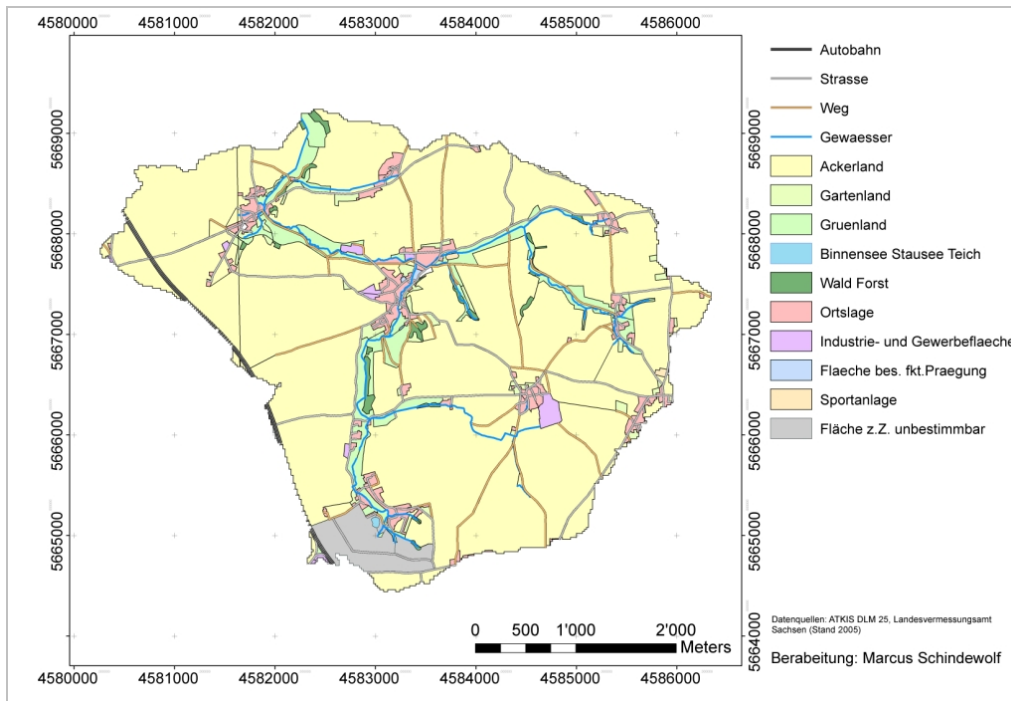


**Abbildung 7: Bodentypen und Bodenarten im EZG Baderitz**

### 3.3.2.4 Landnutzung

Die Ursache für die vorrangig landwirtschaftliche Nutzung im Gebiet ist die Fruchtbarkeit der mächtigen Lössauflage. Durchschnittliche Ackerzahlen von 70 haben hohe Erträge zur Folge. Der Ackerflächenanteil beträgt ca. 75 % der Gesamteinzugsgebietsfläche (Abb. 8). Die Hauptanbaukulturen sind Marktfrüchte wie Weizen, Raps, Zuckerrüben und Mais (KORNMANN 2006). Insgesamt 13 Landwirtschaftsbetriebe bewirtschaften Ackerflächen mit einer durchschnittlichen Schlaggröße von 14 ha, eine für eine vorrangig ackerbaulich genutzte Region relativ geringe Durchschnittsflächengröße. Davon sind 30 % der Schläge kleiner als 14 ha, 61 % kleiner als 30 ha und 39 größer als 30 ha (KORNMANN 2006). Tierhaltung findet nur in einzelnen Betrieben statt, wobei Grünlandflächen auf schmale Bereiche in den Talböden beschränkt sind. Waldflächen befinden sich lediglich auf kleinen, isolierten Inseln (Abb. 8). Die insgesamt neun Ortschaften im Gebiet besitzen einen Gesamtflächenanteil von ca. 5 %.





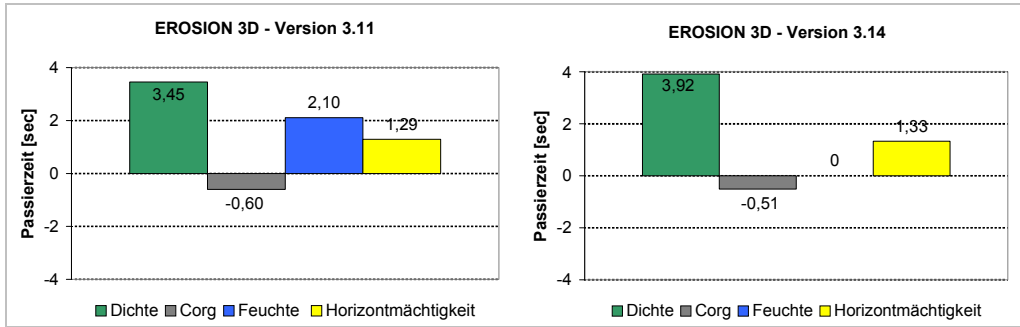
**Abbildung 8: Landnutzung im EZG Baderitz**

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Sensitivitätsanalyse

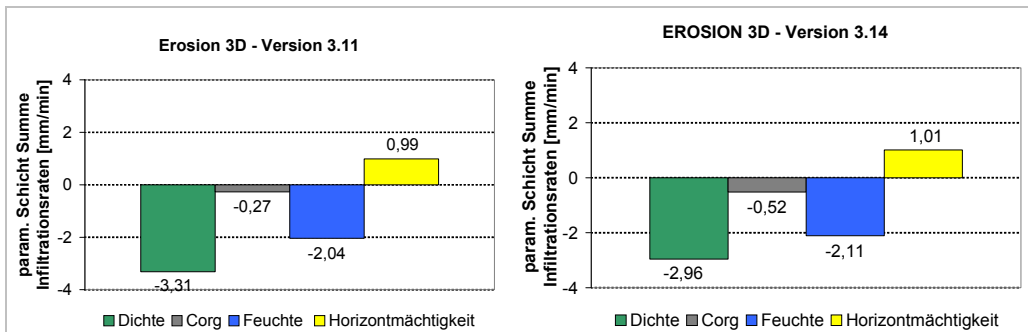
Im ersten Schritt wurden die Modellsensitivitäten von EROSION 3D, Ver. 3.11 und Ver. 3.14 auf Plot-Ebene und daran anschließend auf EZG-Ebene getestet. Je höher die dabei bestimmte dimensionslose Sensitivität ist, desto stärker reagiert das Modell EROSION 3D auf die Änderung des jeweiligen Parameters. Dabei ist der Betrag entscheidend: Ein positives Vorzeichen steht für eine direkt proportionale Abhängigkeit zwischen Eingangsparameter und Simulationsergebnis, ein negatives Vorzeichen für eine indirekt proportionale Abhängigkeit zwischen Eingangsparameter und Simulationsergebnis.

Vergleichbar mit vorherigen Modellversionen reagiert das Modell EROSION 3D sehr sensitiv auf die Parameter Bodendichte und Anfangsbodenfeuchte (SCHMIDT 1996). In der ersten Bodenschicht werden bei der EROSION 3D-Modellversion 3.11 für die Bodendichte und für die Anfangsbodenfeuchte die höchsten Sensitivitäten erreicht (Abb. 9 bis 12).



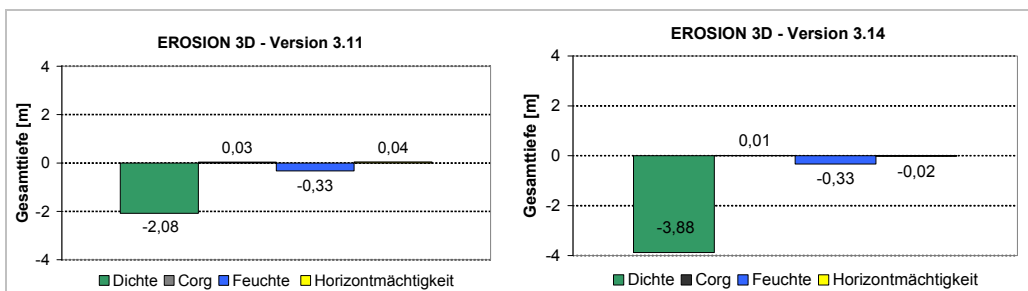
**Abbildung 9: Modellsensitivitäten für den Parameter Passierzeit (erster Bodenhorizont)**

Die Sensitivitäten der E3D-Ver. 3.14 fallen für die Bodendichte ähnlich aus, liegen aber bei der Gesamteindringtiefe der Befeuchtungsfront deutlich höher (Abb. 9 bis 12).

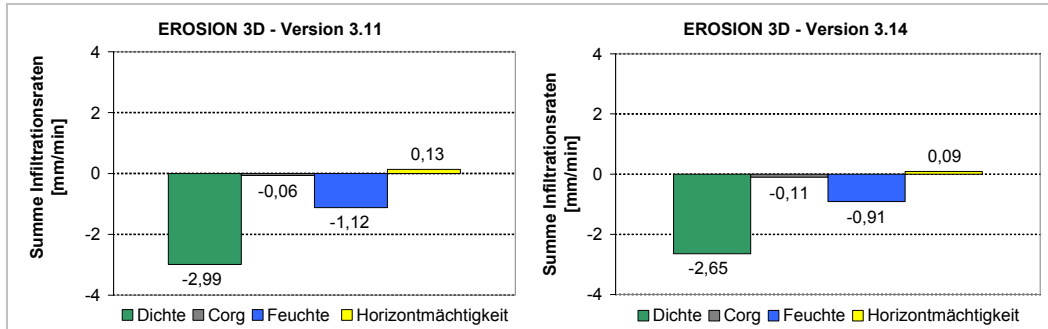


**Abbildung 10: Modellsensitivitäten für den Parameter Summe der Infiltrationsraten in der parametrisierten Schicht (erster Bodenhorizont)**

Bei den Anfangsbodenfeuchten verhält sich der Vergleich etwas anders (Abb. 9). In der neuen Modellversion (E3D, Ver. 3.14) ist die Passierzeit der parametrisierten Schicht für geringe und hohe Bodenfeuchten gleich groß, d. h. die Befeuchtungsfront durchschreitet die erste Bodenschicht unabhängig von der Bodenfeuchte gleich schnell (Abb. 9).



**Abbildung 11: Modellsensitivitäten für den Parameter Gesamteindringtiefe der Befeuchtungsfront (erster Horizont)**



**Abbildung 12: Modellsensitivitäten für den Parameter Summe der Infiltrationsraten (erster Bodenhorizont)**

Aus den Abbildungen geht hervor, dass die Horizontmächtigkeit vor allem auf die Passierzeit und die Summe der Infiltrationsraten in der parametrisierten Schicht in beiden Versionen einen relativ großen Einfluss hat (Abb. 9 und 10). Die Bedeutung des  $C_{org}$ -Gehalts ist in beiden Versionen gering (Abb. 9 bis 12).

Beim Vergleich der Horizonte untereinander wird deutlich, dass die Sensitivitäten der unterlagernden Horizonte sich vom ersten Horizont unterscheiden. Ursache dafür sind die unterschiedlichen Parameterkonstellationen in den Horizonten und differierende Mächtigkeiten (Abb. A 8 bis A 11).

**Tabelle 13: Sensitivitäten Schicht 2 – E3D - Ver. 3.11**

Parameter	Dichte 1100 - 1800 [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte 1100 - 1400 [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte 1450 - 1650 [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte 1450 - 1800 [kg/m <sup>3</sup> ]	Corg 0,5 - 4 [%]	Feuchte 13,5 - 42 [Vol. %]	Mäch- tigkeit 0,05 -0,5 [m]
Eindringtiefe Befeuchtungs- front	-2,04	0,33		-4,17	0,03	-0,08	0,06
Summe der Infiltrationsra- ten	-2,20				0,00	-1,95	0,00
Passierzeit	-0,07	-2,60	4,05		-0,31	1,95	1,00
Summe der Infiltrationsra- ten (param. Schicht)	-3,68				-0,22	-1,75	1,00

**Tabelle 14: Sensitivitäten Schicht 2 – E3D - Ver. 3.14**

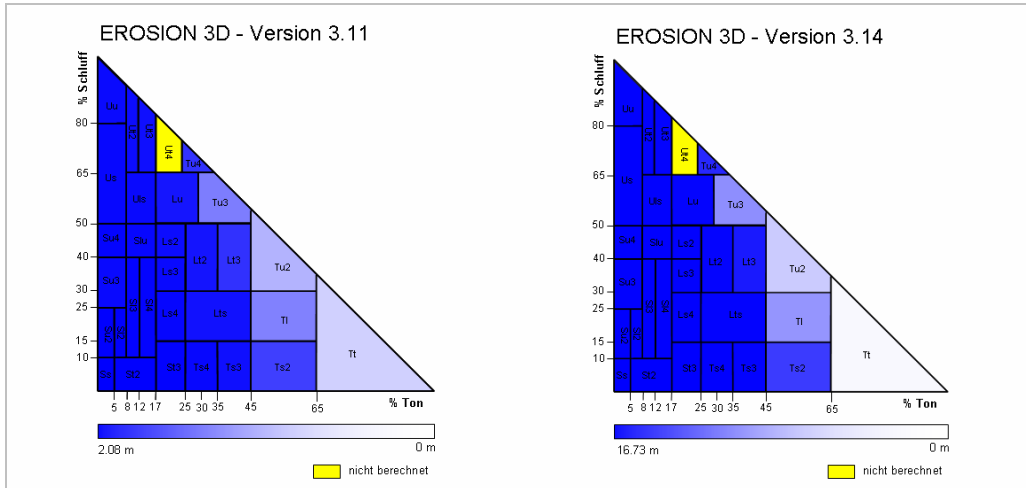
Parameter	Dichte 1100 - 1800 [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte 1100 - 1400 [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte 1450 - 1650 [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte 1450 - 1800 [kg/m <sup>3</sup> ]	Corg 0,5 - 4 [%]	Feuchte 20 - 42 [Vol.%]	Mäch- tigkeit 0,05 -0,5 [m]
Eindringtiefe Befeuchtungs- front	-4,12	0,14		-9,25	0,02	-0,01	-0,06
Summe der Infiltrations- raten	-2,50				-0,01	-0,70	0,04
Passierzeit	1,96	-2,60	11,30		-0,50	-2,69	0,60
Summe der Infiltrations- raten (param. Schicht)	-3,05				-0,50	-2,81	0,70

Die Sensitivitäten sind von der Spannweite der Eingangsdaten abhängig. Bei der Bodendichte fallen die Sensitivitäten für die Gesamtspannweite (1,1 - 1,8 g/cm<sup>3</sup>) relativ gering aus. Allerdings sorgt eine Vorzeichenumkehr im zweiten und dritten Horizont für die Passierzeit und Gesamteindringtiefe der Befeuchtungsfront für lokal höhere Sensitivitäten (Tab. 13, 14, A 2 und A 3).

Die Grenze der Merkmalsumkehr liegt für beide Versionen zwischen 1,35 und 1,45 g/cm<sup>3</sup>. Diese Merkmalsumkehr kann mit dem auffüllbaren Porenvolumen begründet werden, das mit höheren Bodendichten abnimmt. Steht bei einem definierten Anfangswassergehalt weniger Porenraum zur Verfügung, kann die Befeuchtungsfront schneller in tiefere Schichten vordringen. Die Sensitivitäten der übrigen Parameter sind mit denen der ersten Schicht vergleichbar.

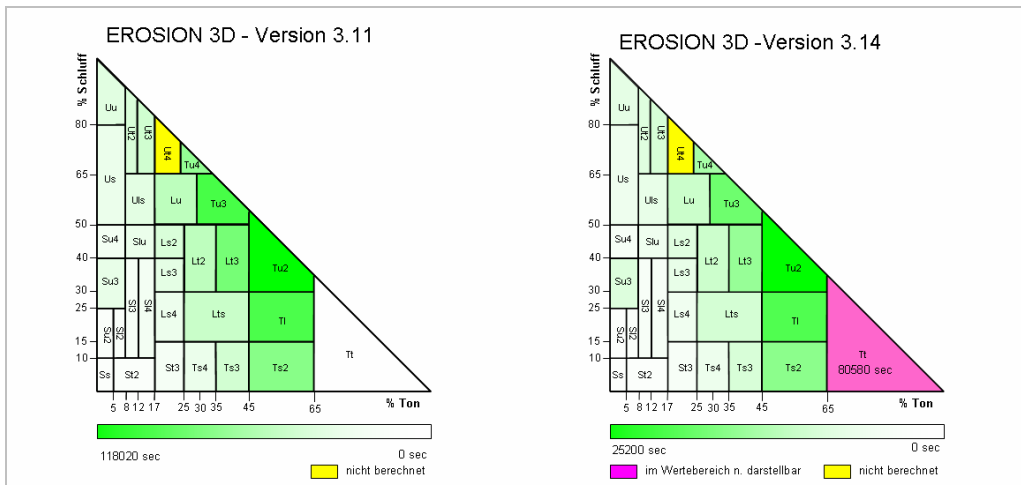
Da die Sensitivität der Bodenart nicht über die angewendete Analyse ermittelbar ist, wurden die Ergebnisse der virtuellen Infiltrationsversuche in linearer, farblicher Abstufung im Körnungsdigramm dargestellt.

Innerhalb des gesamten Spektrums sind die größten Ergebnisstreuungen für die Passierzeit zu erkennen (Abb. 14). Deutlich werden die z. T. enormen Wertesprünge zwischen den Bodenarten. Reiner Ton ist bei allen Versuchen die Bodenart mit dem deutlich geringsten Outputwert. Das Ergebnis liefert Hinweise darauf, dass ggf. die Bodenart 'reiner Ton' (Tt) bei Verwendung in den modellinternen Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Sättigungsbodenfeuchte, des Matrixpotenzials und der gesättigten Leitfähigkeit nicht-lineare Ergebnisse liefert.



**Abbildung 13: Abhängigkeit der Eindringtiefe der Befeuchtungsfrent von der Bodenart (erster Horizont)**

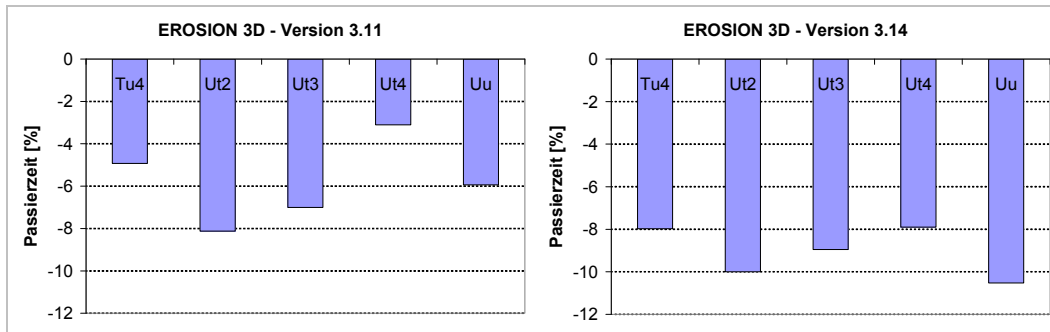
Beide Versionen reagieren ähnlich auf eine Änderung in der Bodenart. Die Gesamtsumme der Infiltrationsraten, die Summe der Infiltrationsraten in der parametrisierten Schicht und die Eindringtiefe der Befeuchtungsfrent zeigen eine größere Abhängigkeit vom Tongehalt als vom Schluffgehalt. Sie nehmen mit wachsendem Tongehalt ab (Abb. 13 und Abb. A 12 bis A 20). Der Parameter Passierzeit hingegen hat bei sandigen Bodenarten, aber auch bei den tonigen lokale Maxima, die nicht erklärt werden können (Abb. 14, Abb. A 14, A 16, A 19 und A 21).



**Abbildung 14: Abhängigkeit der Passierzeit von der Bodenart (erster Horizont)**

Beim Vergleich der Versionen wird die enorme Spannweite des Ausgabeparameters Eindringtiefe der Befeuchtungsfrent deutlich. Dieser erreicht bei Version 3.11 in seiner maximalen Ausprägung 2 m, verglichen mit fast 17 m bei der neueren Modellversion Version 3.14 (Abb. 13). Fehler im Infiltrationsverhalten können außerdem durch die Verwendung der aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung 5 (KA5) entnommenen Korngrößenverteilung entstehen. Nach Umrechnung in die

USDA-Korngrößenverteilung (WÖSTEN 1998) sind besonders die schluffigen Substrate von den größten Änderungen betroffen. Beim Test der Bodenarten Tu4, Ut2, Ut3, Ut4 und Uu betragen die Abweichungen der Version 3.11 gegenüber Version 3.14 für die Summe der Infiltrationsraten in der parametrisierten Schicht ca. 6 % (Abb. A 22 und A 23) und für die Passierzeit 3 – 8 %. Die Version 3.14 reagiert bei beiden Parametern noch sensibler mit Abweichungen bis >10 % (Abb. 15).



**Abbildung 15: Passierzeit der parametrisierten Schicht bei Korngrößenverteilung nach KA5 und USDA**

Auf Einzugsgebietsebene rufen besonders die Parameter Niederschlagsintensität und Niederschlagsdauer deutliche Reaktionen im Simulationsergebnis hervor. Die Niederschlagsintensität erreicht im Merkmalsraum zwischen 0,1 und 2,5 mm/min eine Sensitivität von ca. 1,1 (Einzelwerte nicht dargestellt). Die Sensitivität der Niederschlagsdauer liegt zwischen 1 und 2 h und einer Intensität von 0,1 mm/min bei ca. 1 und sinkt bei steigenden Intensitäten (1 mm/min) auf 0,5 ab (Einzelwerte nicht dargestellt).

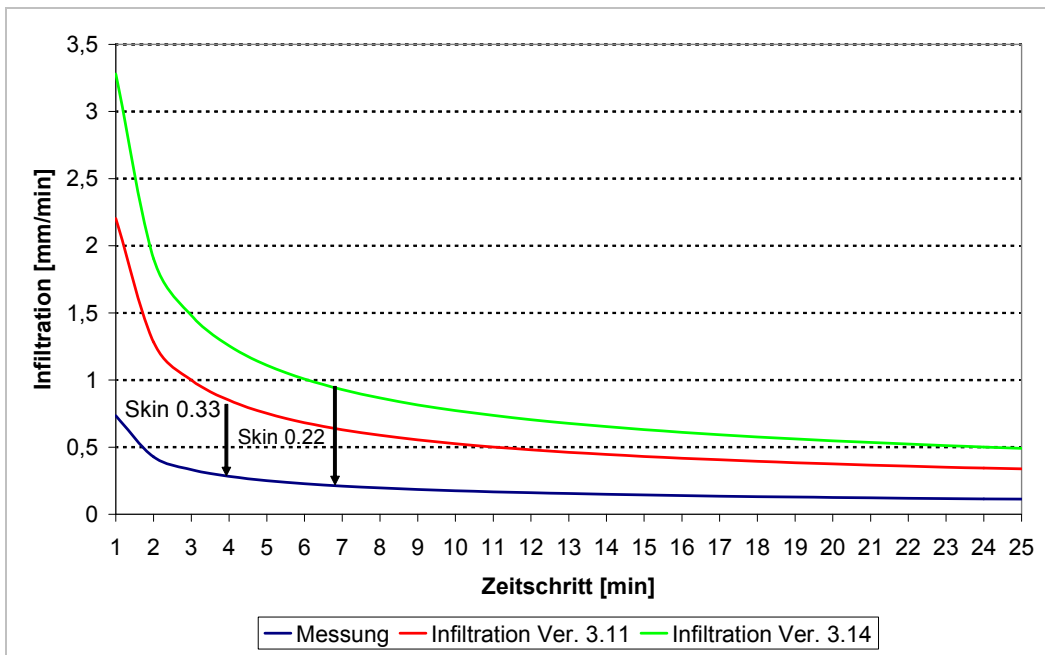
Die Sensitivitäten der anderen Parameter fallen geringer aus. Lediglich die Einbrenntiefe und die zeitliche Auflösung der Modellrechnung erzeugen noch nennenswerte Reaktionen. Beide liegen im Mittel bei 0,17 bzw. -0,17. Die Sensitivität für die Einbrenntiefe sinkt mit wachsender Einzugsgebietsgröße, da geringere Flächenanteile durch diesen Vorgang einer stärkeren Neigung unterzogen werden. Bezüglich der zeitlichen Auflösung beträgt die Sensitivität im Wertebereich zwischen 1 und 15 min (Auflösung der Simulationen) 0,13 (Einzelwerte nicht dargestellt).

Die Veränderung der Parameter „Zurücksetzen der Anfangsinfiltrationskapazität“ und „Niederschlagsschwellenwert“ haben kaum Auswirkung auf das Simulationsergebnis.

Betrachtet man den Einfluss der zeitlichen Auflösung auf den Scheitel der Hochwasserwelle, treten höhere Sensitivitäten im Mittel von -0,6 auf. Das bedeutet für die folgende Simulation, dass mit Erhöhung der Zeitschrittlänge der Abflussscheitel gekappt wird.

### Bewertung

Die zum Teil großen Unterschiede im Infiltrationsverhalten der Versionen 3.11 und 3.14 (Abb. 16 und Abb. 17) führen zu dem Schluss, dass grundsätzliche Änderungen der für die Schätzung der Eingabeparameter des GREEN-AMPT-Modells verwendeten Pedotransferfunktionen sehr hohe Änderungen der prognostizierten Infiltrationsrate bewirken (vgl. Kap. 2.2.1). Für zukünftige Weiterentwicklungen bedeutet diese Feststellung, dass insbesondere bei der experimentellen und quantitativen Bewertung der infiltrationsfördernden Wirkung landwirtschaftlicher Bodenbearbeitungsverfahren die starke Abhängigkeit der Abflussprognose von den verwendeten Prozessabbildungen und Pedotransferfunktionen beachtet werden muss.



**Abbildung 16: Infiltration der Modellversion 3.11 und 3.14 in Abhängigkeit des Skinfaktors**

Die Untersuchung hat die hohen Sensitivitäten beider Modellversionen bezüglich der Parameter Anfangsbodenfeuchte und Lagerungsdichte deutlich gemacht. Bei der Bestimmung der Eingabeparameter ist diesen Parametern besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Nachfolgend wird daher auf die Parameter Anfangsbodenfeuchte, Lagerungsdichte,  $C_{org}$ -Gehalt, Horizontmächtigkeit und Niederschlagsparameter nochmals eingegangen.

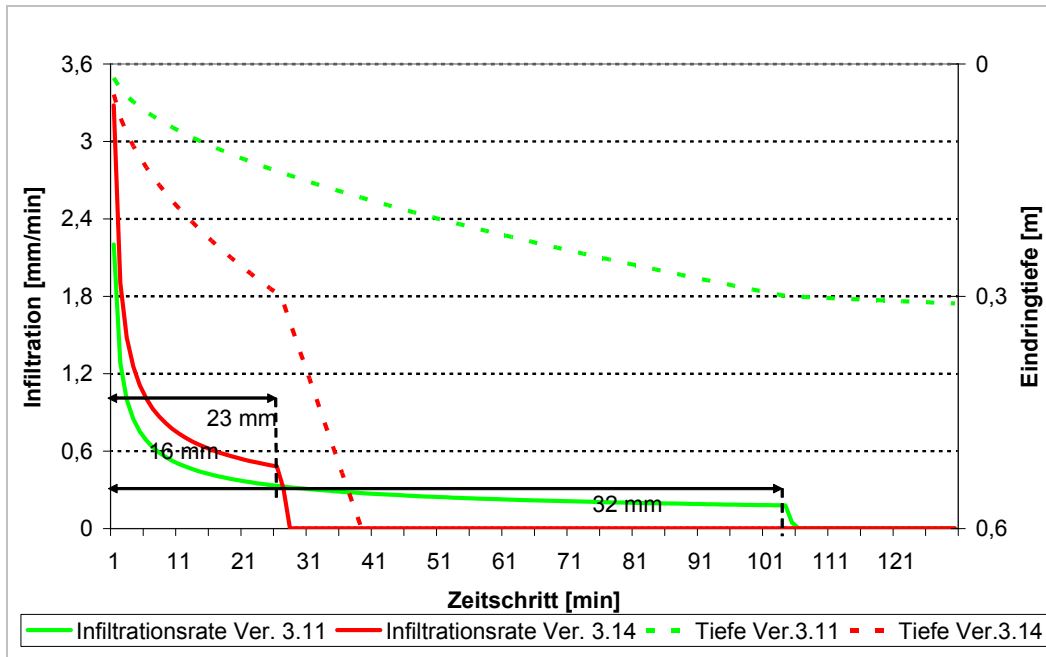


Abbildung 17: Infiltrationsrate und Eindringtiefe beider Modellversionen 3.11 und 3.14

Anfangsbodenfeuchten

Die hohe räumliche und vor allem zeitliche Dynamik der Anfangsbodenfeuchte ist einzugsgebietsbezogen und mit einfachen Methoden nicht abzubilden. Im Projekt werden verschiedene Verfahren hinsichtlich ihrer Eignung für künftige Modellanwendungen getestet.

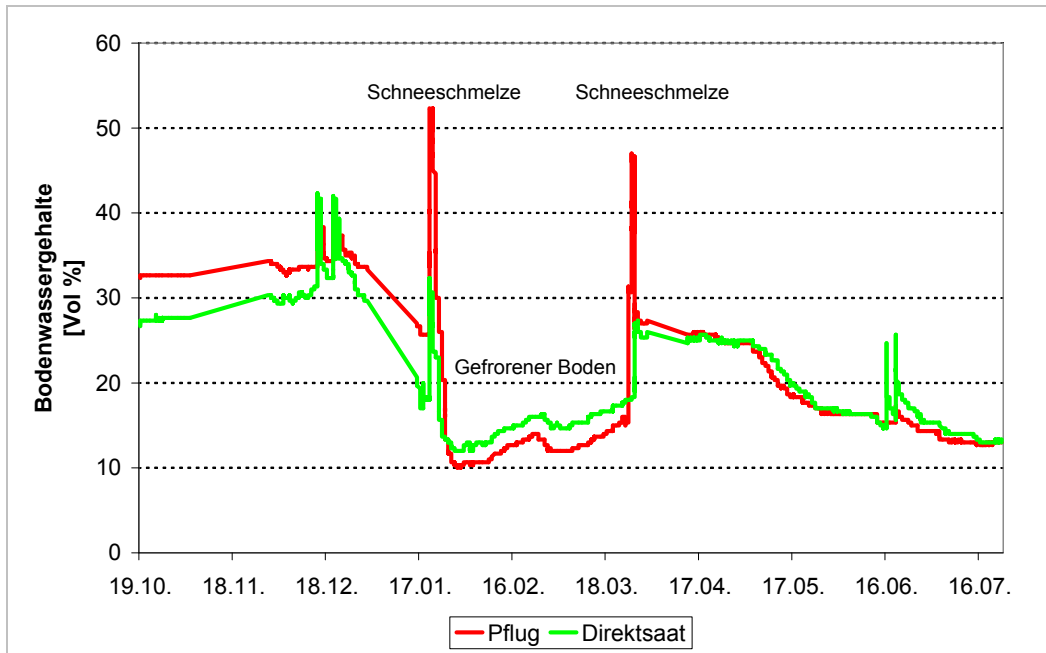
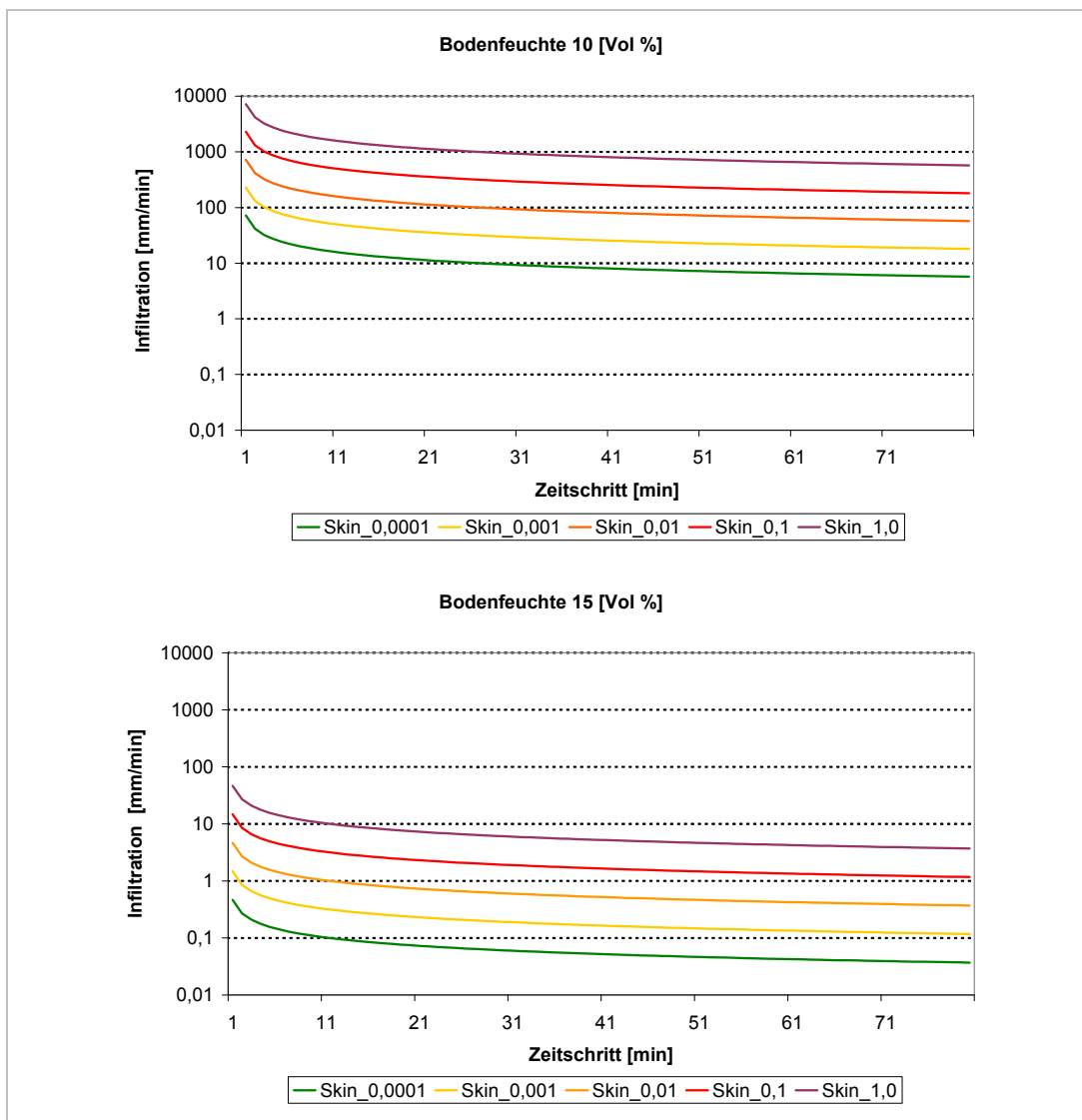


Abbildung 18: Bodenfeuchteverlauf im Anbaujahr 2006 in Lüttewitz bei unterschiedlicher Bearbeitung (Bodenwassergehalt in 30 cm Bodentiefe)



Die Beziehung zwischen Anfangsbodenfeuchte und Skinfaktor hat dabei besondere Bedeutung. Gerade bei „geringen“ Bodenfeuchten, wie sie in den Sommermonaten nicht untypisch für Sachsen sind (Abb. 18), wird die Infiltrationsleistung des Bodens aufgrund vom Modell EROSION 3D angenommenen hohen Saugspannungen überschätzt. Dies ist der Grund, dass bei dem Ansatz verschlammter Bodenoberflächen, die durch einen Skinfaktor  $< 1$  beschrieben werden, bei Modellberechnung mit E3D deutlich mehr Niederschlagswasser infiltriert, als es auf Grund der Bodenverschlämmung möglich ist (Abb. 19).

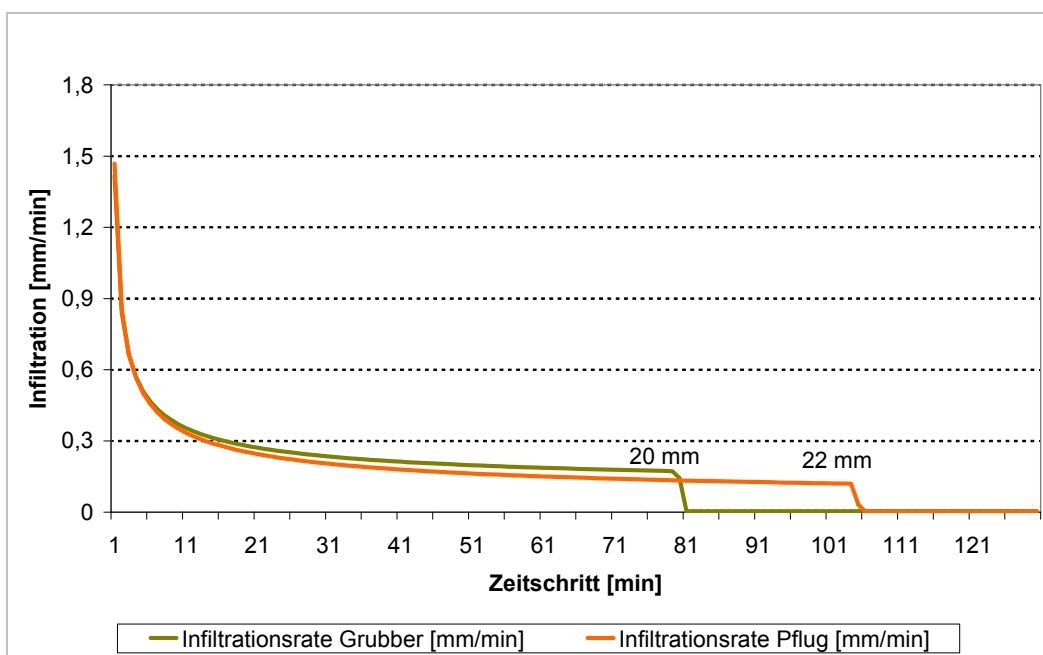
Trockenheit führt zu Benetzungshemmungen (Hydrophobizität) im Oberboden. Dadurch wird die Infiltration gehemmt und es tritt erhöhter Oberflächenabfluss auf (BENS & HÜTTL 2006). Um diese Effekte plausibel mit EROSION 3D abzubilden, sollten die Skinfaktoren nach Auffassung des Autors ein bis zwei Dimensionen unter dem empfohlenen Wert liegen. Damit diese Skinfaktoren richtig abgeschätzt werden können, müssen auf trockenen Standorten Berechnungen durchgeführt werden.



**Abbildung 19: Zusammenhang Skinfaktor und Bodenfeuchte E3D - Ver. 3.11**

### Bodendichte

Hohe Bodendichten führen zu einem rapiden Abfall der Infiltrationsleistung des Bodens. Tritt der Fall ein, dass ein gut leitender Oberboden (z. B. konservierend bearbeitet) über einem Horizont mit dichtebedingt geringen hydraulischen Leitfähigkeiten liegt, setzt durch den Rückstau des Wassers Oberflächenabfluss ein. Ein schlecht leitender Oberbodenhorizont kann, zeitlich betrachtet, nur geringere Niederschlagsmengen abführen, aber mehr Wasser im verfügbaren Porenraum speichern. Abhängig von der Parameterkonstellation und der Struktur des Niederschlagsereignisses können auf konservierend bearbeiteten und unverschlämmten Flächen, z. B. infolge höherer Bodendichten, höhere Abflüsse berechnet werden als auf konventionell bearbeiteten und verschlämmten Flächen (Abb. 20).



**Abbildung 20: Infiltrationsraten bei verschiedenen Bearbeitungsverfahren (Pflug, Grubber, mit E3D - Ver. 3.11 berechnet)**

#### Bodenart/Textur

Verglichen mit anderen Parametern zeigt die Bodenart (mit Ausnahme von Tt) geringe Sensitivitäten. Die verwendeten Datengrundlagen ermöglichen eine relativ gute Schätzung, sodass die auf Schätzfehler zurückzuführenden Ungenauigkeiten in den Modellergebnissen eher gering sind. Es muss darauf geachtet werden, dass im Zusammenspiel mit anderen Bodenparametern (z. B. Bodendichte) über Parametrisierungsfehler Matrixpotenziale nicht hinreichend genau abgeschätzt werden. Zur Schätzung der VAN-GENUCHTEN-Parameter sind die Sand- und Schluffgehalte unbedingt in die USDA-Klassifikation (WÖSTEN 1998) umzurechnen.

#### C<sub>org</sub> – Gehalt

In den verfügbaren Bodenkarten ist der Gehalt an organischem Kohlenstoff nicht dargestellt. Er lässt sich nur über den Humusgehalt abschätzen. Fehler, die durch unzureichende Schätzung entstehen, sind gering, da dieser Parameter die Infiltrationsleistung nur geringfügig beeinflusst.

#### Horizontmächtigkeit

Die Schichtdicke der Horizonte ist eine wichtige Größe bei der Betrachtung des Infiltrationsgeschehens. Wird ein Horizont mit guten Infiltrationseigenschaften und geringem Wasserspeichervermögen zu geringmächtig geschätzt, gelangt das infiltrierende Wasser zu schnell auf stauende Horizonte. Untersuchungen haben gezeigt, dass erst die richtige Parametrisierung der realen Horizonte (Skinfaktor) den Verlauf der Infiltrations- bzw. Abflusskurve richtig wiedergibt. Besonders problematisch ist dieser Sachverhalt bei der Parametrisierung von Bearbeitungshorizonten unter verschiede-

nen Bodenbearbeitungsverfahren. Die Software DPROC stützt sich bei der Horizontierung, auch des ersten Horizontes, auf die Angaben der amtlichen Bodenkarten (z.B. BK 50, BK<sub>konz</sub>, BÜK 200). Jede Bodenbearbeitungsvariante greift allerdings unterschiedlich tief in den Boden ein, sodass im Idealfall für jede dieser Varianten unterschiedliche Tiefenlagen des ersten, bearbeitungsbeeinflussten Horizontes parametrisiert werden müssten. Allerdings sind die Skinfaktoren aus dem Boden-erosionsprogramm Sachsen für die mittleren Verhältnisse der ersten Horizonte abgeleitet worden. Auf Grund der nicht erhobenen Unterboden-Daten und der bei der Kalibrierung von EROSION 2D nicht betrachteten Infiltrationstiefe der Befeuchtungsfront konnte jedoch keine konkrete Aussage über den Einfluss des Unterbodens auf die Abflussentstehung getroffen werden. Im Hinblick auf eine landesweite Anwendung des Modells empfiehlt der Autor die Berücksichtigung der bearbeitungsabhängigen, ersten Horizonte bei der Parametrisierung der Bodenschichten sowie eine Auswertung der bestehenden Datenlage hinsichtlich des Unterbodens auf die Abflussentstehung. Für die weiteren Horizonte (z. B. B-Horizonte der amtlichen Bodenkarten) wird die experimentelle Ermittlung neuer Skinfaktoren vorgeschlagen.

#### Niederschlagsparameter

Die relativ hohen Modellsensitivitäten auf die Niederschlagsintensität machen deutlich, wie wichtig die richtige Abschätzung dieses Parameters ist. Eine hohe Schätzgüte kann nur über ein dichtes Netz hoch aufgelöster Niederschlagsschreiber in Sachsen verwirklicht werden.

#### Niederschlagsdauer

Dieser Parameter ist besonders im Bereich kürzerer Niederschläge (bis 2 h) sensitiv. Die Ursache hierfür liegt im Übertritt der Befeuchtungsfront in den zweiten, in der Regel schlechter leitenden Horizont. Bei der Betrachtung längerer Zeiträume tritt die Sensitivität dieses Parameters deutlich zurück.

#### Voreinstellungen im Modell

Die weiteren Voreinstellungen im Modell haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Simulation. Die Erhöhung der Einbrenntiefe wirkt sich fördernd auf die Abflusshöhe aus. Das Einbrennen des realen Gewässernetzes verbessert grundsätzlich die Übereinstimmung zwischen dem realen und dem von EROSION 3D aus dem Reliefmodell abgeleiteten Vorfluternetz. Die Zeitschrittlänge von 15 min verringert den Abfluss und die Höhe des Scheitels leicht, ist aber durch die Auflösung der Validierungsdaten vorgegeben.

## 4.2 Prozessabbildung

### 4.2.1 Verschlämmung und Makroporeninfiltration

Die Verschlämmung bezeichnet die Bildung einer geringdurchlässigen, oft nur wenige Millimeter mächtigen Schicht an der Bodenoberfläche als Folge des Aufpralls von Regentropfen bei Starkniederschlagsereignissen. Der Prozess lässt sich in die Teilprozesse Aggregatzerfall, Aggregatverformung und Partikeleinregelung gliedern, die eine Verdichtung der Bodenoberfläche bewirken.

Die Infiltrationsberechnung im Bodenmodell erfolgt nach GREEN & AMPT (1911). Dabei werden Prozesse wie Tonquellung und -schrumpfung, Verschlämmung und Makroporenfluss nicht mit erfasst.

Im Bodenerosionsprogramm Sachsen wurden die errechneten Infiltrationsraten den gemessenen über den Skinfaktor angepasst. Über den Skinfaktor werden gekoppelt mehrere Prozesse abgebildet, wobei die Verschlämmung (Krustenbildung) und die Makroporeninfiltration als wichtigste „Störfaktoren“ der Infiltrationsprozesse eine zentrale Bedeutung aufweisen. Um eine genaue Abbildung beider, räumlich indiskret auftretender Prozesse zu gewährleisten, müssen sie unabhängig voneinander beschrieben werden.

Diese Herangehensweise ist problematisch, da der Skinfaktor nur die Infiltrationsrate verändert, d. h. die Geschwindigkeit, mit der das Wasser in den Boden eindringt. Er sagt nichts über die Wasserretentionsfähigkeit des Bodens aus, da das Porenvolumen über den Parameter nicht verändert wird.

Makroporeninfiltration tritt bei Infiltrations-Überschuss-Abfluss ein und leitet Wasser schnell in tiefere Schichten, in denen es wiederum in die Matrix reinfiltrieren kann. Im Modell wird die Verschlämmung von Böden mit Skinfaktoren  $<1$  beschrieben. Die Infiltrationshemmung wirkt vom ersten Zeitschritt des Infiltrationsprozesses. Diese Abbildung muss grundlegend durchdacht werden, da im Einzelfall erst mit Beginn eines Niederschlagsereignisses die Ausbildung einer Verschlammungsschicht beginnt.

Zudem ist die Ausbildung einer solchen Schicht in erster Linie abhängig von einer bestimmten Niederschlagsintensität. SCHRÖDER (2000) beschreibt weitere Faktoren, die maßgeblich zur Ausbildung solcher Krusten führen.

Zur Lösung der o. g. Probleme werden in der Literatur vor allem zwei Ansätze beschrieben, bei denen beide Prozesse, Verschlämmung und Makroporeninfiltration, unabhängig voneinander abgebildet werden. NIEHOFF (2002) führte für das Modell WaSiM-ETH (TOPMODEL-Ansatz) einen Verschlammungsfaktor ein, der sowohl von der Niederschlagsintensität als auch vom Grad der Bodenbedeckung abhängt.

Die verschlammte Infiltrationskapazität errechnet sich aus:

$$k_{silt} = k_f \cdot C_{silt} \quad (\text{Gl. 12})$$

$k_{silt}$	hydraulische Leitfähigkeit des verschlammten Bodens	[-]
$k_f$	hydraulische Leitfähigkeit des unverschlammten Bodens	[-]
$C_{silt}$	aktueller Verschlämmungsfaktor	[-]

Er geht davon aus, dass ab Bedeckungsgraden unter 50 % und Niederschlagsintensitäten über 5 mm/h Verschlämmung auftritt. Ab Intensitäten von über 10 mm/h und Bedeckungen von 0 % verschlammte der Boden am stärksten. Im Übergangsbereich zwischen diesen Grenzwerten errechnet sich der aktuelle Verschlämmungsfaktor aus dem maximalen Verschlämmungsfaktor und dem Mittelwert der Einflüsse von Niederschlagsintensität und Bedeckungsgrad:

$$C_{silt} = C_{\max} + (1 - C_{\max}) \cdot \frac{C_{\text{cover}} + C_{PI}}{2} \quad (\text{Gl. 13})$$

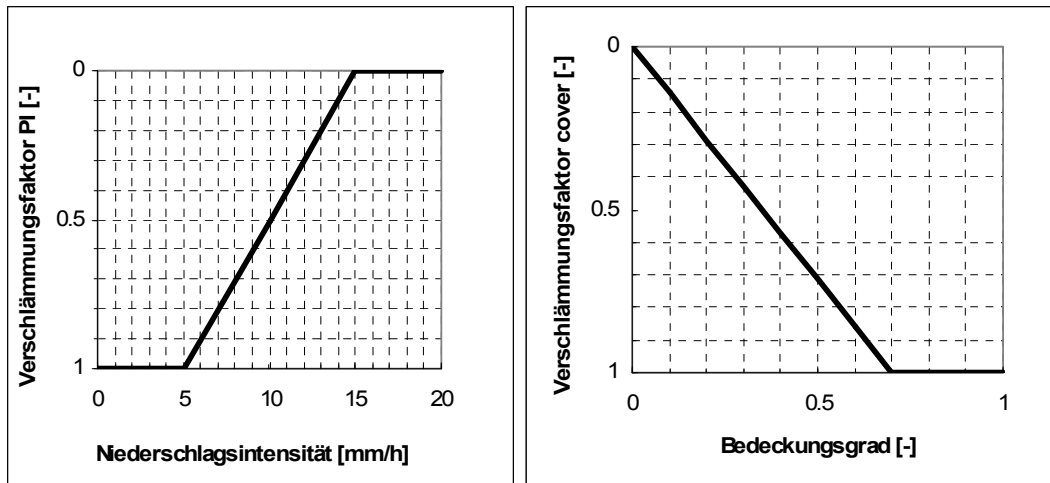
$C_{silt}$	aktueller Verschlämmungsfaktor	[-]
$C_{\max}$	maximaler Verschlämmungsfaktor	[-]
$C_{\text{cover}}$	Verschlämmungsfaktor der aktuellen Bodenbedeckung	[-]
$C_{PI}$	Verschlämmungsfaktor der aktuellen Niederschlagsintensität	[-]

$C_{\text{cover}}$  und  $C_{PI}$  ergeben sich aus linearen Beziehungen, wie in der Abbildungen 21 dargestellt.

Die durch Starkregenereignisse entstandenen Verschlämmungsschichten können bei geringer biologischer Aktivität über lange Zeiträume, im Extremfall bis zur Ernte, erhalten bleiben. Bodenlockernde Arbeitsgänge zerstören die Verschlämmungsschicht vorher. In der Modellvorstellung wird davon ausgegangen, dass sich Verschlämmungsschichten regenerieren, d. h. über längere Zeiträume die hydraulischen Leitfähigkeiten wieder auf den Ausgangswert zurückgehen. Diese Beziehung wird folgendermaßen ausgedrückt:

$$C_{silt}(t_i) = C_{silt}(t_{i-1}) \cdot \left( 1 + 0.01 \cdot \frac{\Delta t}{24} \right) \quad (\text{Gl. 14})$$

$C_{silt}(t_i)$	Aktueller Verschlämmungsfaktor im laufenden Zeitschritt i	[-]
$C_{silt}(t_{i-1})$	Aktueller Verschlämmungsfaktor im vorangegangenen Zeitschritt $t_{i-1}$	[-]
$\Delta t$	Größe des Modellierungszeitschrittes bezogen auf die 24 Stunden eines Tages	[-]



**Abbildung 21: Abhängigkeit des Verschlämmungsfaktors von der Niederschlagsintensität und dem Bedeckungsgrad, nach NIEHOFF (2002)**

Die Regenerationsphase endet spätestens mit dem Zeitpunkt der Ernte. Vor allem für kontinuierliche Simulationen (Referenzjahre) empfiehlt sich die Verwendung eines dynamischen Verschlämmungsfaktors. Dazu müssen jedoch bewährte Modellroutinen vollständig umgestellt werden. Denkbar wäre die Erstellung von Bodenparameterdateien im Datenbankprozessor unter Verwendung der für E3D erstellten Niederschlagsdateien. Das Programm kann so intern die Parameter Bodenbedeckung und Niederschlagsintensität abfragen und den Verschlämmungsfaktor ermitteln. Die vorhandenen Datengrundlagen zum Skinfaktor sind dabei wichtige Stützstellen der Interpolation. Weitere Ansätze zur Abbildung des Verschlämmungsprozesses im Modell finden sich bei SCHRÖDER (2000).

In einem zweiten Schritt kann die Makroporeninfiltration separat abgebildet werden. Auch hierzu liegen in der Literatur Beispiele von SCHULLA (2007), BRONSTERT (1994) und NIEHOFF (2002) vor.

Die von SCHULLA (2007) erarbeitete Modellerweiterung für WaSiM-ETH geht von der einfachen Vorstellung aus, dass Makroporenfluss erst ab Überschreitung der Infiltrationskapazität des Bodens eintritt. Ein Teil des überschüssigen Niederschlagswassers gelangt in den Makroporenspeicher und wird ohne Zeitverzögerung an den Zwischenabfluss bzw. den Basisabfluss abgegeben. Man kann diese Vorgehensweise als einfachen Bypass-Ansatz betrachten, da innerhalb der einzelnen Horizonte keine zusätzliche Differenzierung des Makroporensystems vorgenommen wird. Folgende Parameter gelten für das gesamte Profil:

- Schwellenwert der Niederschlagsintensität, ab der Makroporeninfiltration eintritt [mm/h],
- Kapazität der Makroporen [mm/h],
- Reduktion Infiltrationskapazität mit der Tiefe [Verhältnis/m],
- Makroporentiefe.

Am unteren Ende der Makropore muss gewährleistet werden, dass Wasser in die Bodenmatrix mit der Infiltrationsrate der betreffenden Schicht reinfiltiert. Dieser Prozess kann über den GREEN & AMPT-Ansatz nicht abgebildet werden. Demzufolge muss ein Senkenterm eingerichtet werden, der das infiltrierte Wasser dem System entzieht.

Die Konzepte von BRONSTERT (1994) und NIEHOFF(2002) bieten weitere Lösungsmöglichkeiten für dieses Problem an. Allerdings können die Exfiltration aus dem Makroporensystem und die Infiltration in das Makroporensystem nur schwer experimentell überprüft werden und wären somit Eichparameter.

#### **4.2.2 Abflussverzögerung im Gerinne**

Der Abflussretentions- und -translationsatz kann die hydrodynamischen Vorgänge im Gerinne nur annähernd wiedergeben, da die Geometrie der Gerinne und die spezifischen Fließwiderstände aufgrund der Rasterdarstellung nur unzureichend erfasst werden (GEOGNOSTICS 2004). Besonders in großen Einzugsgebieten kann es zu Ungenauigkeiten bei der Abschätzung des Zeitpunktes des Wellendurchlaufs und der Höhe des Scheitels kommen, wie es z. T. im Projekt nachgewiesen wurde (vgl. Kap. 4.5.1.1).

Die fehlende hydrodynamische Beschreibung des Gerinneabflusses verschlechtert die Abbildung der Sedimenttransport- und Sedimentumlagerungsprozesse in größeren Einzugsgebieten. Detaillierte Aussagen zu gebietsspezifischen Stoffausträgern sind an eine angemessene hydrodynamische Beschreibung des Gerinneabflusses gekoppelt und demzufolge mit dem Modell nicht mehr leistbar.

Eine einfache Möglichkeit bietet die Simulation einer kinematischen Wellenbewegung in Gerinnen mit Rechteckprofil (z. B. Modell WaSiM-ETH [SCHULLA & JASPER 1998]) oder anderen Profiltypen (z. B. Modell HEC-HMS [FELDMAN 2000]). Für die Parametrisierung dieser Module werden die Gerinnequerschnitte und Rauigkeitsbeiwerte benötigt. Diese Informationen liegen in der Regel nicht flächendeckend vor, lassen sich aber durch Kartierungen erheben bzw. aus Tabellenwerken ableiten.

Darüber hinaus bietet sich bei der Simulation von größeren Gebieten die Kopplung von E3D an ein speziell hydrodynamisches Modell wie z. B. HEC-RAS an. Dieses Vorgehen findet in der Hydrologie vor allem zur Simulation von Hochwasserwellen in größeren Gebieten und bei zu erwarteten Überlagerungseffekten Verwendung.



### **4.2.3 Drainageabflüsse und Interflow**

Sind in einem Einzugsgebiet Drainagen vorhanden, können trotz infiltrationsfördernder Bearbeitungsverfahren hohe, z. T. hochwasserrelevante Abflüsse auftreten. Gleiches gilt für Gebiete mit dominierendem Zwischenabfluss.

Trotz mangelnder Kenntnis über den Zustand und die Lage der Drainagen könnte ein Modellansatz in EROSION 3D zur Beschreibung des Drainageabflusses integriert werden, um bei entsprechender Parameterkenntnis diesem Problem in großmaßstäblichen Simulationen begegnen zu können. Dafür sind Kenntnisse über die Tiefe und Dichte der Drainagen notwendig. Bei Infiltration des Wassers in die Drainagen kann der Wasserabfluss zum Vorfluter mit einem einfachen Abflusstranslationsansatz erfasst werden.

Zusätzlich kann der Zwischenschichtenabfluss zu einer Abweichung der berechneten von den simulierten Ergebnissen führen. Die Generierung eines Interflows stellt allerdings ein größeres Problem dar, da je nach Ansatz schwer zu erfassende Parameter notwendig sind (SCHULLA & JASPER 1998, BRONSTERT 1994, EAGELSON 1970, GERMANN 1990).

## **4.3 Felduntersuchungen in der Standortskala**

### **4.3.1 Standort Lüttewitz**

Die Ergebnisse der Beregnungsversuche in Lüttewitz (Tab. 15 und 16) sind eindeutig. Vergleichbar mit anderen Untersuchungen (ZACHARIAS 2007, NITZSCHE et al. 2002, ZIMMERLING 2004, 2002, KORNMANN 2006) liegen die Mengen für Oberflächenabfluss und Bodenabtrag auf den konservierend bzw. in Direktsaat bestellten Flächen unter denen der Pflugparzelle. Auf den konservierenden bzw. in Direktsaat bestellten Flächen versickert nahezu der gesamte Niederschlag. Im Gegensatz dazu fließt auf den gepflügten Flächen über 60 % des Niederschlagswassers oberflächlich ab. Der Bodenabtrag der Pflugparzelle ist fast um das Achtfache höher als auf den konservierend bearbeiteten Flächen. Die Ursachen für dieses Verhalten sind der bereits erwähnte höhere Makroporenanteil und die höhere Aggregatstabilität auf konservierend bearbeiteten Flächen aufgrund des verminderten mechanischen Eingriffs in den Boden.

Die gemessenen Feldzustände stellen die Charakteristika der verschiedenen Anbauverfahren gut dar. Die Mulchbedeckung nimmt mit verringerter Bearbeitung um ein Vielfaches zu. Trotz höherer Lagerungsdichten zeichnen sich die konservierend und in Direktsaat bestellten Flächen durch höhere Wassergehalte aus, die auf geringere Evaporationsverluste infolge Mulchbedeckung zurückzuführen sind.

**Tabelle 15: Randbedingungen der Beregnungsversuche in Lüttewitz**

Parameter	Direktsaat	Mulch	Pflug
Hangneigung [%]	3,4 - 4	0 - 2,4	4
Bedeckungsgrad [%]	83 ± 2	33 ± 5	0,5 ± 0,6

**Tabelle 16: Ergebnisse der Beregnungsversuche in Lüttewitz**

Parameter	Direktsaat	Mulch	Pflug
Oberflächenabfluss [mm]	2,2 ± 0,1	2,2 ± 0,3	22,5 ± 4,7
Infiltrationsanteil [%]	94	94	39
Bodenabtrag [g]	28 ± 25	23 ± 7	194 ± 84
Wassergehalt (TDR) [Vol%]			
initial	27,6 ± 1,3	27,2 ± 1,2	24,4 ± 1,5
nach Beregnung	32,8 ± 1,3	33,8 ± 2,3	30,1 ± 2,7
Differenz	5,2	6,6	5,7

#### 4.3.2 Mockritz

Die Ergebnisse der Beregnung in Mockritz (Tab. 17 und 18) ergeben ein weniger eindeutiges Bild, als es in Lüttewitz der Fall war. Deutlich wird eine Zunahme der Infiltration mit einer Abnahme der Bearbeitungsintensität und -tiefe. Allerdings können auch bei verringertem Eingriff im Rahmen der konservierenden Bodenbearbeitung nicht die gleichen Effekte wie im Versuch Lüttewitz (Tab. 16) erzielt werden. Bei der extensivsten Bearbeitungsform (Grubber - flach, Tab. 18) können noch 65 % infiltrieren, der infiltrationsfördernde Beitrag der konservierenden Bodenbearbeitung kann jedoch mit zunehmender Bearbeitungstiefe nicht mehr in dieser Größenordnung erreicht werden. Deutlich korrelieren auch in diesem Beispiel Oberflächenabfluss und Bodenabtrag. Der Vergleich der Ergebnisse der Beregnungsversuche in Lüttewitz (Tab. 16) und Mockritz (Tab. 17) zeigt die große Spannweite des Oberflächenabflusses bei konservierender Bodenbearbeitung. Von entscheidender Bedeutung ist hierbei neben der Bodenart die auf der Ackerfläche praktizierte Fruchtfolge, die Intensität (Tiefe und Häufigkeit) der Bodenbearbeitung, die Anwendungsdauer der konservierenden Bodenbearbeitung, die Zufuhr an organischer Substanz und vieles mehr.

**Tabelle 17: Randbedingungen der Beregnungsversuche in Mockritz**

Parameter	Grubber flach	Grubber mittel	Grubber tief	Stoppelpflug	Pflug
Hangneigung [%]	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Bedeckungsgrad [%]	13,5 ± 4,2	11 ± 4,3	8,7 ± 0,8	6,7 ± 3,6	1 ± 0

**Tabelle 18: Ergebnisse der Beregnungsversuche in Mockritz**

Parameter	Grubber flach	Grubber mittel	Grubber tief	Schäl-pflug	Pflug
Oberflächenabfluss [mm]	13,3	23,4	23,1	26,1	27,8
Infiltrationsanteil [%]	65	38	39	31	27
Bodenabtrag* [g]	73	145	174	207	309
Bodenfeuchte (TDR) [Vol%]					
initial	27,9	26,5	26,6	26,8	26,9
nach Beregnung	34	31,7	30,6	31,3	30,1
Differenz	6,1	5,2	4,1	4,6	3,2

\* Bodenabtrag wurde jeweils dreiminütig gemessen

Aus den Ergebnissen der Beregnungen wird deutlich, dass die konservierende Bodenbearbeitung aufgrund ihrer positiven Effekte auf den Infiltrationsvorgang zur Abflussretention auf landwirtschaftlich genutzten Flächen beitragen kann (NITZSCHE et al. 2000, ZIMMERLING 2004, MICHAEL et al. 1996, KORNMANN 2006, ZACHARIAS 2007). Die gepflügten Varianten neigen in höherem Maße zu Oberflächenabfluss und Erosion. Allerdings ist das Ausmaß der Wasserinfiltration auf konservierend bestellten Flächen stark abhängig von der Intensität der Bodenbearbeitung (Häufigkeit, Arbeitstiefe usw.), der Fruchtfolgegestaltung und der Versorgung mit organischer Substanz. Diesbezügliche Datenlücken gilt es durch Folgeuntersuchungen zu schließen, um den DPROC um entsprechende Kategorien erweitern zu können.

#### 4.4 N-A-Simulation Plot-Skala

Die zwölf im Rahmen des Bodenerosionsmessprogramms Sachsens 1994 auf dem Bodenbearbeitungsversuch Methau durchgeführten Beregnungsversuche wurden parametrisiert und mit E3D berechnet. Die berechneten Abflussverläufe werden nur bei einigen Versuchen gut abgebildet, wohingegen bei den Gesamtvolumina größere Gemeinsamkeiten existieren. Aus Tabelle 19 geht hervor, dass die Berechnung der realen Zustände (d. h. Annahme einer Bodenschichtung im bearbeiteten Krumbereich und im unbearbeiteten Unterboden) eher zu einer Unterschätzung der Abflussvolumina führt. Begründet werden kann das zum einen, dass die verwendeten Daten die Zustände im Unterboden nur ansatzweise wiedergeben und zum anderen, dass die Parametrisie-

zung der unterlagernden Horizonte im direkten Zusammenhang mit den berechneten Abweichungen stehen.

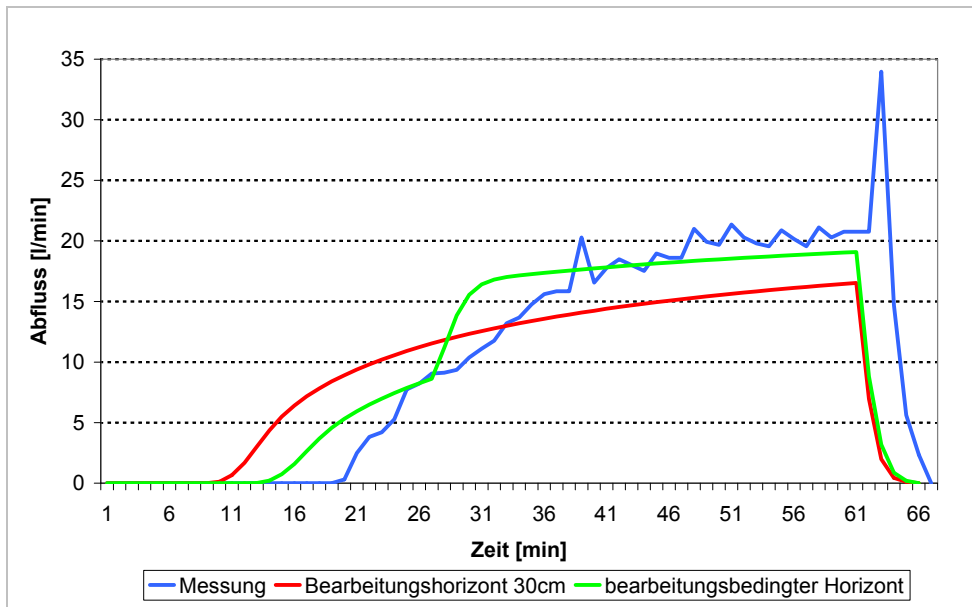
**Tabelle 19: Mit E3D ermittelte Abflussvolumina der Plot-Versuche in Methau, mit und ohne Korrektur der Bearbeitungshorizonte**

Versuch	Messung [l]	Simulation homogener Bearbeitungshorizont [l]	Abweichung [%]	Simulation realer Bearbeitungshorizont [l]	Abweichung [%]
65	321	408	+27	318	-1
66	483	421	-13	475	-2
67	1138	1043	-8	115	-2
68	1204	1067	-11	1191	-1
69	333	311	-7	347	+4
70	743	360	-62	707	-5
71	709	634	-10	685	-3
72	918	810	-12	879	-4
73	543	441	-9	540	-1
74	845	507	-40	795	-6
75	295	273	-7	297	+1
76	890	850	-4	875	-2

Da keine Skinfaktoren für die unterlagernden Horizonte vorlagen, wurden diese in Abhängigkeit der realen Horizontierung mittels Simulation abgeleitet.

Die Parametrisierung der bearbeitungsbedingten Horizonte (Tab. A 4) führt zu deutlich verbesserten Ergebnissen in der Gesamtmenge des Abflusses und der Form der Abflusskurve (Abb. 22) mit ihrer beispielhaften Darstellung des Abflussverlaufs für Versuch 71 - Grubbervariante.

Dieses Beispiel macht deutlich, dass die Parametrisierung der realen Bearbeitungshorizonte bzw. der Bodenhorizonte ein grundsätzliches Problem darstellt und überarbeitet werden muss. Vor allem bei langjährig pfluglos bestellten Flächen können die Eigenschaften des bearbeiteten Horizontes nicht bis auf die Tiefe des ehemaligen Pflughorizontes bzw. auf die aus den amtlichen Bodenkarten abgeleitete Horizonttiefe übertragen werden.



**Abbildung 22: Abflussverlauf ohne und mit Korrektur der Bearbeitungshorizonte (Bodenbearbeitungsversuch Methau, Beregnungsversuch 71 – Grubbervariante, Bodenerosionsmessung Sachsen 1994)**

Folgende Schlussfolgerungen sind für zukünftige Anwendungen von EROSION 3D (Mehrschichten-Infiltrationsansatz) zu ziehen:

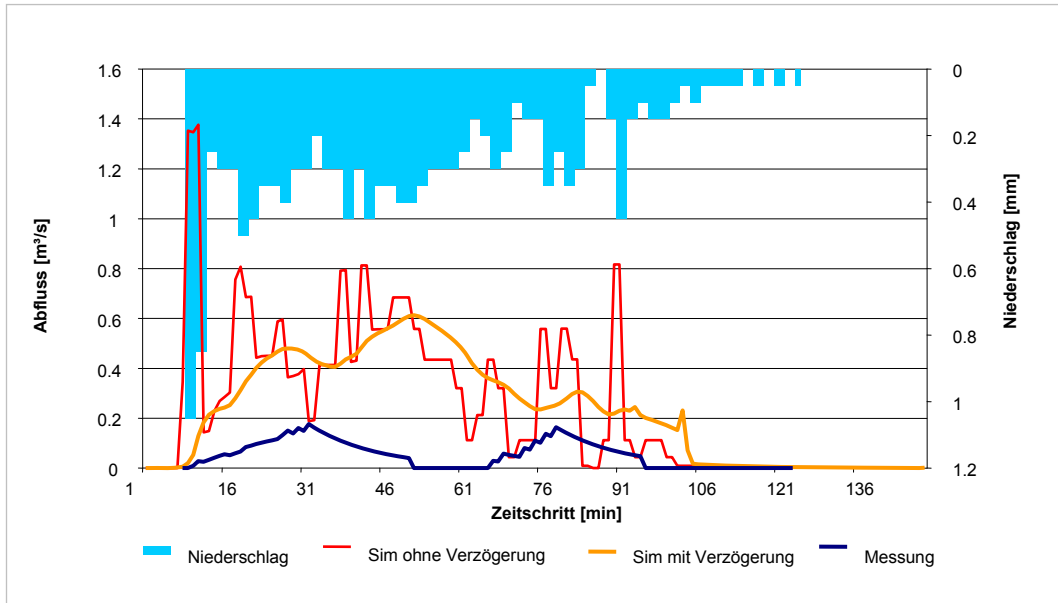
- Unterschiedliche Bodenbearbeitungen greifen unterschiedlich tief in den Boden ein und müssen demzufolge in der Parametrisierung von Gebietszuständen so erfasst werden.
- Bei der Abbildung von Verschlämmung ist es ausreichend, die obersten 1- 5 cm des Bodens als verschlämmt zu betrachten.
- Die Parametrisierung unterlagernder Horizonte (z. B. Skinfaktor) muss durch eine experimentell ermittelte Datengrundlage abgesichert werden.
- Es empfiehlt sich, eine Infiltrationsrückgangskonstante für verschiedene Bodenbearbeitungen ähnlich  $k_{rec}$  (Rückgang der gesättigten Leitfähigkeit, WaSiM-ETH) zu integrieren. Diese ist besonders bei gepflügten Flächen angebracht, da dort die Bodendichte sprunghaft mit der Tiefe zunimmt.

## 4.5 NA-Simulationen EZG-Skala E3D

### 4.5.1 Rechengüte

#### 4.5.1.1 Abbildung des Abflussverlaufs und der Abflussverzögerung

Zur Abbildung des Abflussverlaufs und der Abflussverzögerung auf Einzugsgebietsebene wurde das Modell E3D aufgrund seiner Abweichungen der Mess- von den Simulationsergebnissen in der Ein-Schichtversion getestet. Anschließend wurde die Mehr-Schichtversion von E3D – Ver. 3.11 mit und ohne Abflussverzögerung geprüft, um die Abweichung der Ergebnisse zu bewerten (siehe Abb. 23).



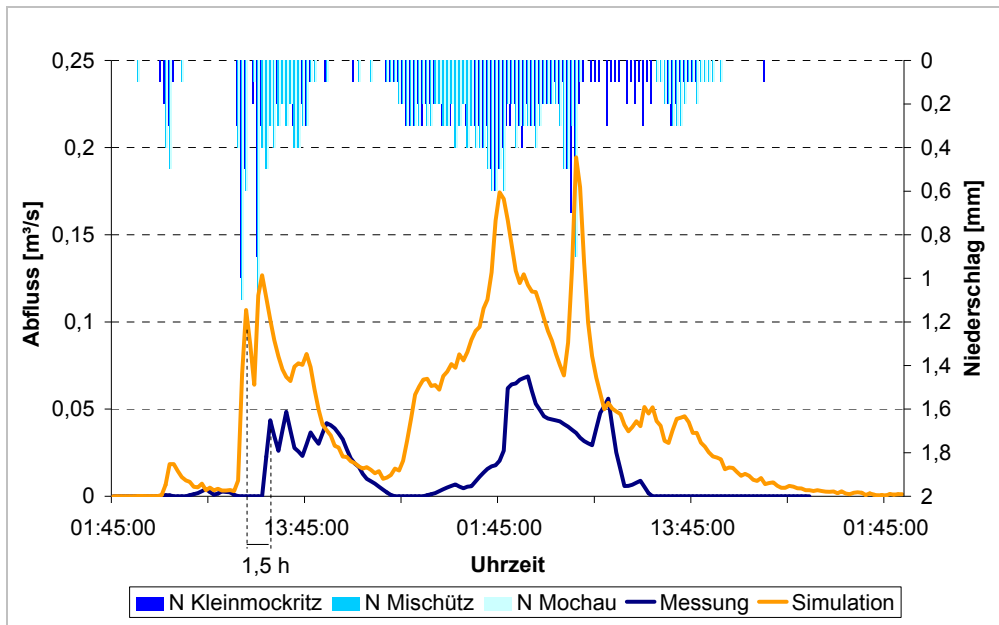
**Abbildung 23: Simulation Abflussverlauf mit E3D (Ver. 3.11) ohne und mit Abflussverzögerung durch Nutzung von Translations- und Retentionsansatz (EZG Lippersdorfer Bach, Niederschlagsereignis vom 06.05.2004)**

Unabhängig von der Einzugsgebietsgröße sind die Abweichungen zwischen beobachtetem und modelliertem Abflussbeginn unterschiedlich hoch. Die Werte reichen von keiner Differenz bis hin zu 3 h 45 min. Es ließen sich deutlich geringere Abweichungen bei dem wesentlich größeren Baderitz-Einzugsgebiet beobachten (Tab. 20, Abb. 24). Die Ursache dafür ist wahrscheinlich die größere Oberfläche des Fließgewässers, die im Verlauf des Niederschlages mehr Wasser aufnehmen kann, was zu deutlicheren Pegelreaktionen führt.

Betrachtet man die Abweichung des Auftretens der Abflussspitzen, liegen diese zwar in ähnlicher Größenordnung, aber es existiert eine deutliche Abhängigkeit zur Einzugsgebietsgröße. Die Verzögerung im Baderitzgebiet ist im Mittel mit 114 min fast doppelt so hoch wie im EZG Lippersdorfer Bach (Tab. 20).

**Tabelle 20: Abfluss- und Abflussscheitelverzögerung**

Einzugsgebiet	Verzögerung Beginn		Verzögerung Scheitel	
Lippersdorf	0 – 3 h 45 min	Ø 2 h 15 min	0 – 3 h	Ø 58 min
Baderitz	0 – 1 h 45 min	Ø 15 min	30 min – 5 h	Ø 114 min



**Abbildung 24: Gemessene und mit E3D (Ver. 3.11) simulierte Abflussverzögerung (EZG Baderitz, Niederschlagsereignis vom 18.11.2004)**

Der Abflussverlauf wird durch EROSION 3D mit erweitertem Translations- und Retentionsansatz besser dargestellt als ohne diese Erweiterung. Die Ganglinie orientiert sich weniger an dem Verlauf des Niederschlages und ist in ihren Spitzen gekappt, wie es auch durch den beobachteten Verlauf dargestellt wird (Abb. 23).

Die mittleren Abweichungen der Oberflächenabflussmenge bei Simulationen mit EROSION 3D mit und ohne kinematischen Ansatz liegen bei ca. 30 %. Es werden generell höhere Abflüsse ohne Abflussverzögerung berechnet (Tab. 21).

Begründet werden kann dies durch die längeren Verweilzeiten von Überschusswasser in Form des Filmspeichers an der Bodenoberfläche. Das hat zur Folge, dass längere Zeiträume für die Infiltration dieses Wassers zur Verfügung stehen. Die Simulation von realen Szenarien mit besonderer Berücksichtigung des Abflussverlaufs und der Oberflächenabflussmenge sollte daher mit dem kinematischen Ansatz erfolgen. Stehen allerdings Aussagen zur Abschätzung der gebietspezifischen Bodenabträge und Oberflächenabflüsse unter Berücksichtigung verschiedener Landnutzungsszenarien im Vordergrund, kann auf den kinematischen Ansatz, auch im Hinblick auf kürzere Simulationszeiten, verzichtet werden.

**Tabelle 21: Abweichungen in der Oberflächenabflussmenge ohne und mit Verzögerung durch Nutzung von Translations- und Retentionsansatz**

EZG	$\Delta Q$ ohne Verzögerung/mit Verzögerung [in %] bei Bodenfeuchte		
	gering	normal	hoch
Lippersdorf	147	136	139
Baderitz	113	122	124

(100 % = keine Veränderung der Oberflächenabflussmenge)

Diese Ergebnisse können allerdings nicht unabhängig von der simulierten Infiltration betrachtet werden. Treten bei der Berechnung der Infiltration Fehler auf, pflanzen sich diese bis zur hydrodynamischen Prozessabbildung des Modells fort. Mit anderen Worten, wenn der Zeitpunkt des Eintretens von Oberflächenabfluss zu früh berechnet wird, erreicht der simulierte Abflussscheitel den Auslass auch früher.

Diskutiert werden muss die Simulation der Abflusswelle im Gerinne mit E3D. Auf Grundlage des angewendeten Dünnschichtenabflusses, der für Landoberflächen geeignet ist, können hydrodynamische Prozesse in Fließgewässern mit E3D nur ansatzweise beschrieben werden.

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Größe des EZG, das heißt auch die Länge des Fließweges, auf die Abschätzung des Zeitpunktes, an dem die Abflusswellen den Pegel passiert, einen großen Einfluss hat.

Das Modell E3D wurde in erster Linie für die Bilanzierung von Sedimentstoffeinträgen und sedimentgebundenen Stoffeinträgen in Gewässer entwickelt. Daher ist zu prüfen, ob eine verbesserte hydrodynamische Beschreibung für Gerinne in E3D integriert werden soll oder ob das Modell E3D zur Modellierung des Gerinneabflusses besser mit bestehenden hydrodynamischen Modellen gekoppelt werden sollte.

#### **4.5.1.2 Abbildung der Oberflächenabflussmenge**

##### Ein-Schicht-Infiltration mit E3D - Ver. 3.11

Die Oberflächenabflussmenge wird durch den Ein-Schicht-Infiltrations-Ansatz (Modellversion E3D, Ver. 3.11) in der Regel gut abgebildet. Abhängig von der Bodenfeuchte und von der Art der Abtrennung der Oberflächenabflüsse werden in den drei Einzugsgebieten Abweichungen von 3 bis 890 % der gemessenen Abflussmenge erreicht (Tab. 22).

Deutlich zu erkennen sind die Abweichungen zwischen den einzelnen Verfahren zur Separation der Basisabflüsse. Bei rezessiver Separation werden aufgrund gering abgeschätzter Oberflächenabflussanteile höhere Abweichungen zur linearen Abtrennungsmethode erreicht. Diese sind im Gesamtmittel ca. 2,5 bis 4,1-mal höher (Tab. 22).



**Tabelle 22: Abweichungen simulierter und gemessener Oberflächenabflüsse (E3D – Ver. 3.11, Einschicht-Infiltrationsansatz)**

EZG		ΔQ Simulation/Messung [%] lineare Ganglinienseparation bei Bodenfeuchte			ΔQ Simulation/Messung [%] rezessive Ganglinienseparation bei Bodenfeuchte		
		gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Hölzelbergbach	∅	3,1	4,2	8,4	10,6	15,2	33,8
	Median	1,9	2,5	3,9	9,8	13	14,7
Lippersdorfer Bach	∅	39,3	46,4	50,3	102,4	146,6	152,1
	Median	20,3	24,6	25,2	106,2	123,2	126,2
Stausee Baderitz	∅	81,6	164,4	275,3	249,7	476,5	890
	Median	62,5	136,2	207,3	123	250	304

Hervorzuheben sind die im Median geringeren Unterschiede zwischen „normalen“ und „hohen“ Bodenfeuchtezuständen im Gegensatz zu den Unterschieden zwischen „geringen und „normalen“ Bodenfeuchten. Diese liegen für alle Einzugsgebiete im Mittel um ca. 20 % höher und weisen auf eine Nichtlinearität des Zusammenhangs Bodenfeuchte und berechnete Infiltration hin (Abb. 22).

Mehr-Schicht-Infiltration (E3D – Ver. 3.11 und 3.14)

Verglichen mit den Ergebnissen des Ein-Schicht-Infiltrationsansatzes (Tab. 22) werden mit dem Mehr-Schicht-Infiltrationsansatz der Version 3.11 deutlich höhere Abflussvolumina berechnet. Diese liegen für alle drei Einzugsgebiete, abhängig von der Vorbodenfeuchte, um ein Vielfaches über denen der Ein-Schicht-Version (Tab. 23).

**Tabelle 23: Abweichungen simulierter und gemessener Oberflächenabflüsse (E3D – Ver. 3.11, Mehr-Schicht-Infiltrationsansatz)**

EZG		ΔQ Simulation/Messung [%] lineare Ganglinienseparation bei Bodenfeuchte			ΔQ Simulation/Messung [%] rezessive Ganglinienseparation bei Bodenfeuchte		
		gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Hölzelbergbach	∅	26,1	1254,2	1364,5	107,1	3839,8	4237,5
	Median	23,3	501,4	556,9	29,5	2431,4	2947,1
Lippersdorfer Bach	∅	119,9	918,5	941,9	293,6	2017,2	2219,7
	Median	52,3	481,1	719,9	192,5	1399,3	2061
Stausee Baderitz	∅	175,7	2133,8	2811,1	547,9	5703,1	8667,83
	Median	133,7	1515,1	2131,4	343,2	5148,3	7873,7

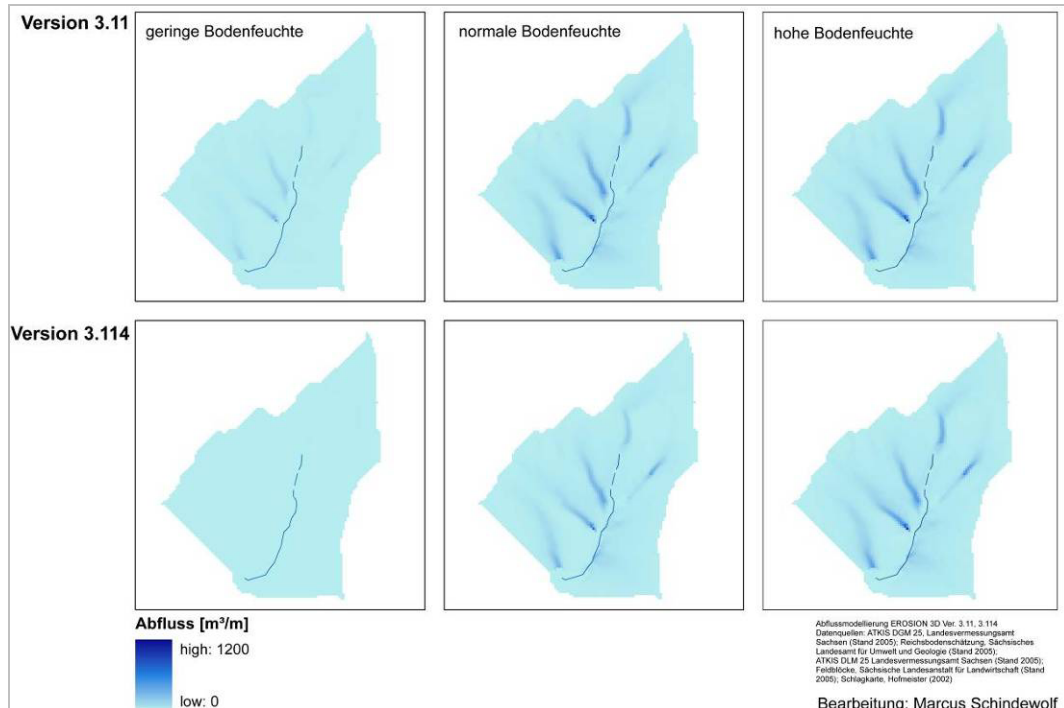
**Tabelle 24: Abweichungen simulierter und gemessener Oberflächenabflüsse (E3D – Ver. 3.14, Mehr-Schicht-Infiltrationsansatz)**

EZG		ΔQ Simulation/Messung [%] lineare Ganglinienseparation bei Bodenfeuchte			ΔQ Simulation/Messung [%] rezessive Ganglinienseparation bei Bodenfeuchte		
		gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Hölzelbergbach	∅	13,7	466,8	4624,1	59,4	1633,3	18461,4
	Median	3,8	426	512,4	10,5	790,7	1743,1
Lippersdorfer Bach	∅	185,8	868,5	1233,6	413,0	1662,8	2537,1
	Median	168,8	615,1	942,4	396,6	153,1	2216,2
Stausee Baderitz	∅	122,9	478,2	4429,7	241,9	706,6	8203,4
	Median	108,2	230,8	2726,9	227	670,1	6788,2

Die Abweichungen zwischen „normalen“ und „hohen“ Bodenfeuchten sind im Mittel um das Zehnfache geringer als zwischen „normalen“ und „gering“, d. h., dass die oben angesprochene Nichtlinearität bei dieser Modellversion (3.11) auf ein unplausibles Maß zunimmt (Tab. 23).

Die Version 3.14 (Mehr-Schicht-Infiltrationsansatz) schneidet in der Abschätzung der Direktabflüsse im Vergleich zur Version 3.11 deutlich besser ab. Abhängig von Ereignis, Einzugsgebiet und Art der Ganglinienseparation liegen die gemittelten Ergebnisse für „normale“ Bodenfeuchten zwischen 466 % und 1662 % (Tab. 24) im Gegensatz zu 918 % bis 5703 %, welche die Version 3.11 errechnete.

nete (Tab. 23). Auch die geringen Unterschiede zwischen „normalen“ und „hohen“ Bodenfeuchten treten bei dieser Version nicht mehr auf (Tab. 24 und Abb. 25). Die Versionen 3.11 und 3.14 (Mehrschicht-Infiltrationsansatz) geben im Mittel die Abflüsse bei „geringen“ Bodenfeuchten mit der höchsten Genauigkeit wieder (Tab. 23 und 24).



**Abbildung 25: Oberflächenabfluss EZG Hölzelbergbach, Vergleich der Modellversionen (Niederschlagsmessung vom 11.08.2002)**

Die im Vergleich zur Ein-Schicht-Infiltration (Tab. 22) höheren Abflüsse der Mehr-Schicht-Infiltrationsmodellierung mit EROSION 3D (Tab. 23 und Tab. 24) resultieren aus der abrupten Dichtezunahme der unterlagernden Horizonte in den digitalen Bodenkarten. Diese geben in den meisten Fällen Lagerungsdichten von  $1,7 \text{ g/cm}^3$  an. Die Sensitivitätsanalyse zeigte, dass Lagerungsdichten in dieser Größenordnung zum äußerst schnellen Voranschreiten der Befeuchtungsfront bei geringer Infiltrationsrate und Wasserspeicherkapazität im jeweiligen Horizont führen. Es kommt demzufolge bereits bei Überschreitung des ersten Horizontes zu Rückstauereffekten, die durch höhere Oberflächenabflüsse gekennzeichnet sind.

In der Literatur werden selten Bodendichten in dieser Größenordnung beschrieben (NITZSCHE et al. 2002). Die Arbeitsgruppe „Physikalischer Bodenschutz“ der Bodenkundlichen Gesellschaft in der Schweiz (BGS) gibt den Wert von  $1,7 \text{ g/cm}^3$  sogar als Richtwert einer schädlichen Bodenverdichtung an (DISPERENS & SCHIESS 2004).

Die Auseinandersetzung mit dieser Datengrundlage und der KA5 Symbolik führt zu dem Schluss, dass es sich bei den verwendeten Bodendichten um effektive Lagerungsdichten (AG BODEN 2005)

handelt. Dieser Summenparameter soll die schlechte Wasserleitfähigkeit von tonigen Substraten abbilden. Tonige Böden lagern häufig weniger dicht und würden über die tabellarische Schätzung der hydraulischen Leitfähigkeiten bessere Wassertransfereigenschaften besitzen, als es in der Realität der Fall ist. Aus diesem Grund werden Trockenrohdichten mit  $0.009 \cdot \text{Tongehalt}$  addiert. Die modellinterne Pedotransferfunktion (VERECKEN et al. 1989) und die Funktion zur Ermittlung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (CAMBELL 1985) benötigen Trockenrohdichten und binden den Tongehalt separat mit ein. Die Sensitivitätsanalyse hat deutlich gemacht, welche Auswirkungen eine Überschätzung dieses Parameters haben kann (vgl. Kap 4.1).

In der vorliegenden Arbeit wurden deshalb die verwendeten effektiven Lagerungsdichten über folgende Gleichung zurückgerechnet.

$$\rho T = Ld - 0.009 \cdot T \quad (\text{Gl. 15})$$

$T$	Tongehalt	[%]
$\rho T$	Trockenrohdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$Ld$	Lagerungsdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]

Im Folgenden werden Lösungsmöglichkeiten entwickelt, um die Modellansätze den realen Gegebenheiten anzupassen.

#### 4.5.1.3 Einfluss der Datengrundlage auf die Oberflächenabflussmenge

Um den Einfluss der Datengrundlage zu testen, wurden bei Verwendung der jeweiligen Landnutzungs- und Bodeninformation auf die jeweils niedrigere Detailebene zurückgegriffen. Die  $BK_{\text{konz}}$  wurde durch die BÜK200 ersetzt und die Schlagkarte durch die InVeKoS-Feldblöcke. Die Bodenbearbeitung auf den InVeKoS-Feldblöcken wurde mit Hilfe der im Rahmen des Förderprogramms „Umweltgerechte Landwirtschaft“ (UL) getesteten Mulchsaatanträge (UL-Antrag) abgeleitet. Es gilt die Annahme, dass ein Feldblock als konservierend bestellt gilt, wenn für mehr als 50 % der Fläche ein Förderantrag UL existiert.

**Tabelle 25: Einfluss der Datenlage auf das Simulationsergebnis hinsichtlich Oberflächenabflussmenge Q (Abschätzung mit E3D – Ver. 3.11)**

EZG		$\Delta Q$ Sim. BÜK 200/ Sim. BK <sub>konz</sub> [%] bei Bodenfeuchte			$\Delta Q$ Sim. InVeKoS /Sim. Schlag [%] bei Bodenfeuchte		
		gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Lippersdorfer Bach	∅	136	142	122	90	95	99
	Median	127	132	126	100	96	99
Stausee Baderitz	∅	126	170	175	100	83	95
	Median	142	93	104	100	86	98

(100 % = keine Abweichung der Simulationsergebnisse bei Veränderung der Datengrundlage)

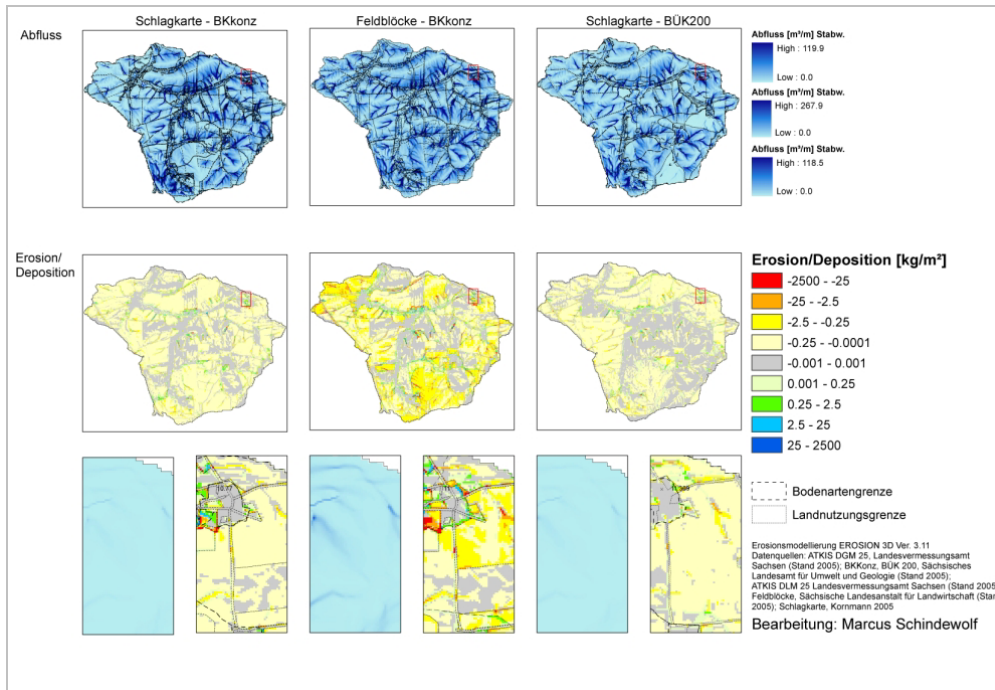
Die Tabelle 25 zeigt, dass eine Änderung der Bodendateninformation (BÜK 200 bzw. BK<sub>konz</sub>) generell einen größeren Einfluss auf die simulierte Oberflächenabflussmenge hat als eine Änderung der Landnutzungsinformation. Die mittlere Abweichung beträgt bei ausschließlicher Verwendung der BÜK 200 145 % im Vergleich zu 93 % bei Verwendung der InVeKoS-Daten.

Die Ursache dieses Verhaltens ist die höhere Abhängigkeit der modellseitig abgebildeten Infiltration von den digitalen Bodeninformationen (Abb. A 24 und A 25). Das betrifft v. a. Textur, Lagerungsdichte des Unterbodens und Skinfaktor. Die Landnutzung hat bezüglich der Infiltration nur einen Einfluss auf die Lagerungsdichte des Oberbodens und den Skinfaktor, worauf das Modell weniger sensitiv reagiert (vgl. Kap. 4.1).

Darüber hinaus führen Simulationen mit den InVeKoS-Daten im Mittel zu einer Verringerung der Abflussmenge, die Verwendung der BÜK 200 hingegen zu einer Erhöhung der simulierten Abflüsse (Tab. 25).

Die Lagerungsdichten bewegen sich in beiden EZG in der gleichen Größenordnung. Ab dem zweiten Horizont werden in der Regel Werte von 1,7 g/cm<sup>3</sup> angegeben. Unterschiede existieren in der räumlichen Verteilung und Heterogenität der Bodenarten. In beiden EZG gibt die BÜK 200 eine größere Ausbreitung infiltrationshemmender Substrate vor (Ut3 vs. Uls; Slu vs. Sl2). Dies könnte die Ursache für die im Rahmen der Simulation ermittelten höheren Abflüsse bei Verwendung der BÜK 200 Bodendaten sein.

Um diesbezüglich belastbare Ergebnisse zu erhalten, sollte in weiteren Untersuchungen dieser Fragestellung nachgegangen werden.



**Abbildung 26: Abhängigkeit des Simulationsergebnisses von der Datengrundlage (EZG Baderitz, Niederschlagsereignis vom 05.07.2005)**

#### 4.5.2 Simulation von Landnutzungsszenarien

Um das Modell für die planerische Praxis verfügbar zu machen, muss es in der Lage sein, Landnutzungsszenarien abzubilden. Da eine Vielzahl an möglichen Maßnahmen zur Verbesserung der Infiltration in Einzugsgebieten existiert, wurden nur landwirtschaftliche Maßnahmen in die Betrachtung einbezogen.

Es soll in erster Linie geprüft werden, wie das Modell auf eine Änderung der Bearbeitungsverfahren (Pflug und Grubber) und der Kulturarten (Ist-Stand, Grünland, Mais und Winterweizen) reagiert. Darüber hinaus wurden verschlämmte und unverschlämmte Feldzustände generiert, um den Einfluss einer intensiven Vorberegnung abzubilden. Die Ergebnisse dieser Szenarien wurden auf ihre Plausibilität hin untersucht. Generell können folgende Annahmen zur Plausibilitätsprüfung behilflich sein:

- Grünlandnutzung wirkt aufgrund des hohen Makroporenanteils und geringer Verschlämmungsneigung infiltrationsfördernder als Ackerbau.
- Die Infiltrationsleistung von Winterweizen ist im Frühjahr bis Sommer höher als die von Mais.
- Konservierend bearbeitete Flächen besitzen höhere Infiltrationsleistungen als konventionell bestellte Flächen.
- Verschlämmte Flächen besitzen geringere Infiltrationsleistungen als unverschlämmte Flächen.

**Tabelle 26: Vergleich der Einflüsse der Bodenbearbeitung mit Pflug bzw. Grubber auf die Oberflächenabflussmenge Q (Abschätzung mit E3D – Ver. 3.11)**

EZG		Ein-Schicht-Infiltration			Mehr-Schicht-Infiltration		
		$\Delta Q$ Sim. Pflug/ Sim. Grubber [%]			$\Delta Q$ Sim. Pflug/ Sim. Grubber [%]		
		bei Bodenfeuchte			bei Bodenfeuchte		
		gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Lippersdorfer Bach	Ø	102	110	119	125	79	93
	Median	102	103	100	123	79	93
Stausee Baderitz	Ø	112	157	155	133	79	93
	Median	102	95	96	130	79	93

(100 % = keine Abweichung der Simulationsergebnisse bei Veränderung der Datengrundlage)

In Tabelle 26 sind die Ergebnisse der Szenarienrechnungen für konservierende und konventionelle Bodenbearbeitungen für das Ein- und Mehr-Schicht-Infiltrationsmodell dargestellt. Es wird deutlich, dass die Ein-Schicht-Version von EROSION 3D besser in der Lage ist, verringerten Oberflächenabfluss infolge Makroporeninfiltration abzubilden.

Die Mehr-Schicht-Version kann diesen Effekt nur noch bei „geringen“ Vorfeuchtebedingungen plausibel wiedergeben. Bei höheren Bodenfeuchten, d. h. geringeren Saugspannungen und auffällbarem Porenvolumen, gelangt das Niederschlagswasser auf den konservierend parametrisierten Flächen schneller in größere Tiefen, auf Bodenhorizonte mit dichtebedingt geringen Wasserleit- und Wasserspeichereigenschaften. Da in diesen Horizonten keine Korrektur der Infiltrationsleistung (Skinfaktor = 1) stattfindet, tritt durch Rückstau effekt Oberflächenabfluss ein. Der dichtebedingte Infiltrationsüberschuss in tiefer liegenden Horizonten ist jedoch höher als der durch den Skinfaktor im ersten Horizont berechnete. Demzufolge werden bei Anwendung der beschriebenen Parametrisierungsregel mit dem Mehrschichtenansatz im Mittel höhere Abflüsse auf konservierend bearbeiteten Flächen als auf konventionell bestellten Flächen errechnet.

Diese Modellergebnisse stehen im Gegensatz zu zahlreichen Untersuchungen, die einen eindeutig tiefreichenden, infiltrationsfördernden Effekt der konservierenden im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung nachgewiesen haben (NITZSCHE et al. 2002, ZIMMERLING 2004, ZACHARIAS 2007, KORNMANN 2006) (siehe auch Tab. 16 und 18).

Diese unzureichende Abbildung der Infiltrationsleistung des Unterbodens kann beseitigt werden, wenn den unteren (B-) Horizonten Skinfaktorwerte größer als 1 zugewiesen werden, welche die generell bis über den bearbeiteten Horizont hinausgehende Makroporen-Wirkung erfassen. ZIMMERLING (2004) hat Makroporen bis 50 cm untersucht und eine Verringerung der Porendichte um ca. 70 – 90 % nachgewiesen.

Um diese ausschließlich durch die nutzerseitige Parametrisierung bedingte Fehlerquelle (Parameter-Artefakt) bei der Abbildung der Infiltrationsleistung des Unterbodens zu minimieren, werden nachfolgend zwei Lösungswege erörtert (vgl. Kap. 4.2):

- Ist die Abbildung einer Makroporeninfiltration als Zusammenspiel von Wasserspeicherung und Wassertransfer über den Skinfaktor als Steuergröße des Wassertransfers möglich?
- Wie verhalten sich tiefer liegende Horizonte mit hohem Makroporenanteil?

Eine programmtechnische Veränderung war im Projekt nicht vorgesehen. Daher konnte eine Verbesserung der Abflussprognose nur über eine Änderung der Eingangsdaten erreicht werden. Ähnliche Probleme ergeben sich bei der Abbildung der Verschlämmung unter Verwendung des Mehr-Schicht-Infiltrationsansatzes (Tab. 27). Hierbei wirkt sich eine verminderte Infiltration verschlammter Bodenoberflächen für die Wasseraufnahme im Gesamtprofil vorteilhaft aus. Qualitativ ist dieses Verhalten ebenfalls auf den Rückstau effekt durch ein schnelleres Vorrücken der Befeuchtungsfront zurückzuführen. Lediglich quantitativ treten Unterschiede auf. Die Abweichungen beim Vergleich der Bodenzustände (Tab. 27) liegen in der Größenordnung einiger Prozent im Gegensatz zum Vergleich der Bearbeitungsvarianten (Tab. 26).

**Tabelle 27: Vergleich der Einflüsse der Bodenzustände unverschlämmt bzw. verschlämmt auf die Oberflächenabflussmenge Q (Abschätzung mit E3D – Ver. 3.11 mit Ein-Schicht- bzw. Mehr-Schicht-Infiltrationsansatz)**

EZG		Ein-Schicht-Infiltration $\Delta Q$ Sim. verschlämmt/ Sim. unverschlämmt [%] bei Bodenfeuchte			Mehr-Schicht-Infiltration $\Delta Q$ Sim. verschlämmt/ Sim. unverschlämmt [%] bei Bodenfeuchte		
		gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Lippersdorfer Bach	Ø	103	115	139	103	95	102
	Median	103	103	111	104	95	99
Stausee Baderitz	Ø	116	172	248	100	100	98
	Median	119	107	108	104	96	97

(100 % = keine Abweichung der Simulationsergebnisse bei Veränderung der Skinfaktoren)

Bei dem Vergleich der Kulturarten kommt der Autor zu einem ähnlichen Schluss. Die Ein-Schicht-Version gibt die im Voraus getroffenen Annahmen gut wieder (Tab. 28 und Abb. 27).

Dabei schneidet Maisnutzung in der Regel schlechter ab, da zum Großteil Szenarien der Monate Mai bis August berechnet wurden. Winterweizen schneidet im Verhältnis zu Grünland oftmals besser ab. Dies kann aber aufgrund hoher Skinfaktoren für Winterweizen durchaus eintreten (Tab.28). Da im Rahmen des Bodenerosionsprogramms Sachsen schwerpunktmäßig Ackerflächen beregnet wurden, sind nur wenige Daten zur Infiltration auf Grünlandflächen verfügbar. Die Verbesserung

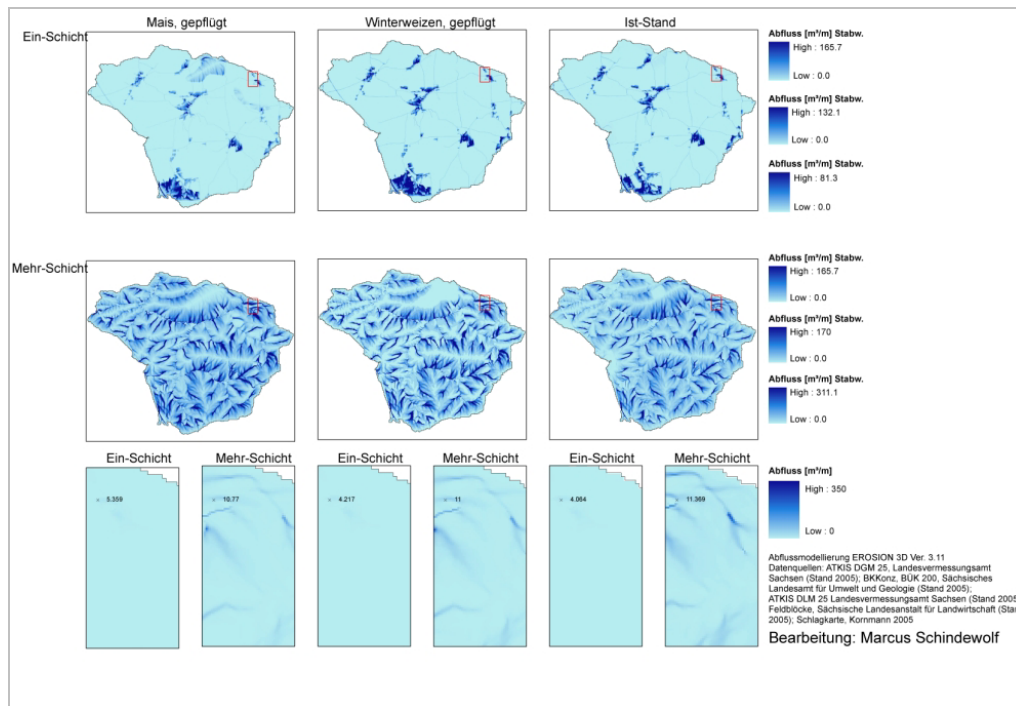


dieser Datengrundlage für die hydrologische Modellierung, insbesondere für die Anwendung von E3D, muss daher durch weiterführende Untersuchungen sichergestellt werden.

**Tabelle 28: Vergleich verschiedener Nutzungsszenarien (ackerbauliche Nutzung bzw. Grünlandnutzung) auf das Infiltrationsverhalten (Abschätzung mit E3D – Ver. 3.11 mit Ein-Schicht- bzw. Mehr-Schicht-Infiltrationsansatz)**

Vergleich	Ein-Schicht-Infiltration [%] bei Bodenfeuchte			Mehr-Schicht-Infiltration [%] bei Bodenfeuchte		
	gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
	Mais (Pflug) vs. Grünland	116	123	162	98	112
Mais (Grubber) vs. Grünland	116	172	110	82	99	90
Winterweizen (Pflug) vs. Grünland	76	83	85	139	82	87
Winterweizen (Grubber) vs. Grünland	75	109	88	85	95	88
Mais vs. Winterweizen	138	125	118	76	54	89

(100 % = keine Abweichung der Simulationsergebnisse bei Veränderung der Landnutzung und Bodenbearbeitung)



**Abbildung 27: Simulierter Oberflächenabfluss in Abhängigkeit der Landnutzung (EZG Baderitz, Niederschlagsereignis vom 22.07.2004, E3D; Ver. 3.11)**

## 4.6 Erarbeiten und Testen von Modellverbesserungen

### 4.6.1 Optimierung der Datengrundlage für EROSION 3D

Über die Notwendigkeit der Verbesserung der Datengrundlage für Simulationen mit EROSION 3D wurde bereits im Kapitel Sensitivitätsanalyse hingewiesen (Kap. 4.1, Korrektur der Lagerungsdichte). Um den Fehler hinsichtlich der Lagerungsdichte zu beheben, wurden die Trockenrohdichten aus den vorhandenen Angaben der Bodenkarten ermittelt (Gl. 15). Die aus Bodenkarten bzw. aus der KA5 abgeleitete effektive Lagerungsdichte wurde durch die Trockenrohdichte ersetzt. Eine Prüfung und ggf. Modifikation der Datengrundlage auf diese Weise vermindert das Risiko, dass die Oberflächenabflussvolumina überprognostiziert werden. Im Mittel führt die Anwendung dieses Modifikationsschrittes der Bodendaten zur einer Halbierung der von EROSION 3D - Ver. 3.11 simulierten Abflüsse (Tab. 29).

Die geringsten Abweichungen werden für „geringe“ Feuchtezustände errechnet, da größere freie Porenvolumina im Oberboden aufgefüllt werden können. Das Wasser erreicht somit langsamer die tiefer lagernde Schicht.

Da EROSION 3D - Ver. 3.14 besser zur Abflusssimulation geeignet ist, sind auch bessere Ergebnisse durch Korrektur der Lagerungsdichte (Ersatz der effektiven Lagerungsdichte durch Trockenrohdichte) zu erwarten. EROSION 3D-Simulationen im Baderitzgebiet auf Grundlage der Trockenrohdichtewerte erbrachten einen um annähernd 60 % reduzierten Abfluss (Tab. 30). Diese Zusammenhänge werden auch aus der Abbildung 28 ersichtlich.

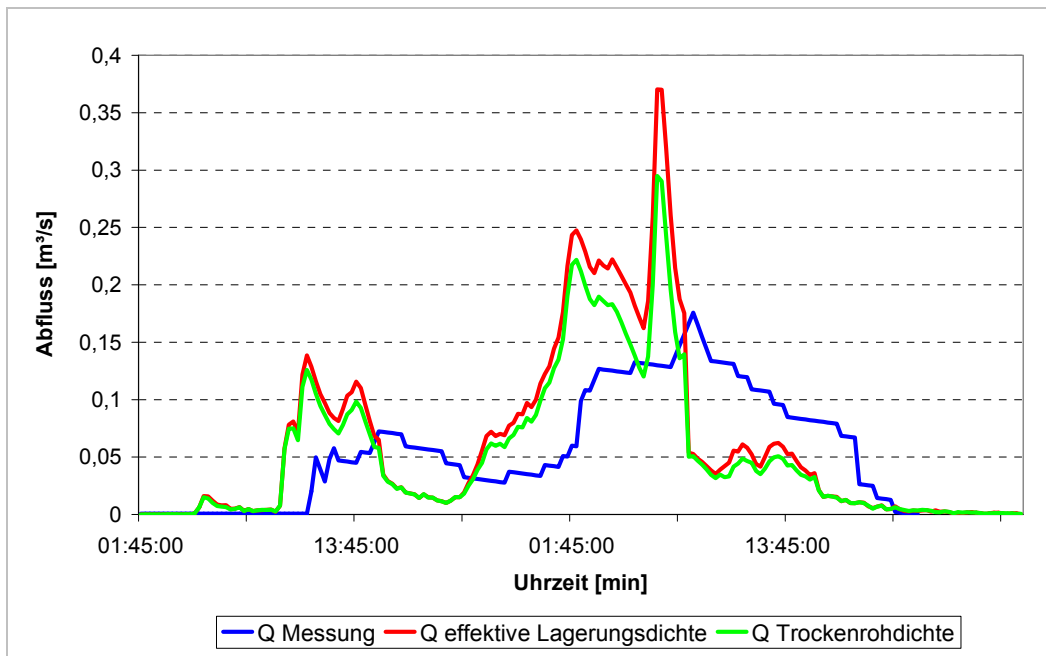
**Tabelle 29: Abweichung (in %) von mit E3D (Ver. 3.11) simulierten Oberflächenabflüsse ( $\Delta Q$  Sim) für effektive Lagerungsdichte und Trockenrohdichte im Vergleich zu Messwerten im EZG Lippersdorfer Bach**

Ereignis	$\Delta Q$ Sim. effektive Lagerungsdichte/Messung [%]	$\Delta Q$ Sim. Trockenrohdichte/Messung [%]	$\Delta Q$ Sim. Trockenrohdichte /effektive Lagerungsdichte [%]
05.05.2004	2665	1070	40
06.05.2004	481	329	68
10.05.2004	327	189	58

**Tabelle 30: Abweichung (in %) von mit E3D (Ver. 3.14) simulierten Oberflächenabflüsse ( $\Delta Q$  Sim) für effektive Lagerungsdichte und Trockenrohdichte im Vergleich zu Messwerten im EZG Baderitz**

Ereignis	$\Delta Q$ Sim. Effektive Lagerungsdichte/Messung [%]	$\Delta Q$ Sim. Trockenrohdichte/Messung [%]	$\Delta Q$ Sim. Trockenrohdichte /effektive Lagerungsdichte [%]
22.11.2004	295	112	38
01.07.2005	175	57	33

Eine Simulation der Oberflächenabflüsse und Bodenabträge mit EROSION 3D unter Einbeziehung der effektiven Lagerungsdichten wird auf Grundlage der vorab dargestellten Modellergebnisse generell als unplausibel erachtet und sollte vermieden werden. Die Gleichungen zur Berechnung der bodenhydraulischen Parameter müssen über die Angabe der Trockenrohdichte gelöst werden. Es empfiehlt sich, für zukünftige Modellanwendungen von EROSION 3D eine homogene und wenn erforderlich korrigierte Bodendatengrundlage zu schaffen.



**Abbildung 28: N-A-Simulation mit E3D (Ver. 3.14) für das EZG Baderitz in Abhängigkeit von effektiver Lagerungsdichte bzw. von der Trockenrohdichte, (mittlere Bodenfeuchte, Niederschlagsereignis vom 18.11.2004)**

#### 4.6.2 Verbesserte Abbildung der Konservierenden Bodenbearbeitung

Die Simulation von Landnutzungsszenarien zeigte, dass die Abbildung der infiltrationsfördernden Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung stark von der Parametrisierung der Unterboden-Eigenschaften abhängt (vgl. Kap. 4.2.1).

Es wurden an dieser Stelle weitere Versuche unternommen, über eine Anpassung der Datenlage eine Verbesserung der Szenarienrechnung zu erhalten. Wie schon erwähnt, besitzen konservierend bearbeitete Flächen aufgrund ihrer dichteren Lagerung einen geringeren Anteil auffüllbaren Porenvolumens in der Bodenmatrix. Diese Matrix wird aber durch einen höheren Anteil an Makroporen durchzogen, als es bei konventionell bestellten Flächen der Fall ist. Diese wirken als Wasserspeicher und fördern die Infiltration in tiefere Bodenschichten. Um die bodenhydrologischen Kennwerte der Matrix zu erfassen, versucht man, bei Probenahmen besonders poröse Bereiche aus der Beprobung auszuklammern und vernachlässigt den Anteil der Makroporen am Gesamtporenvolumen.

Um diese Charakteristika abzubilden, wurden für Simulationen mit EROSION 3D (Ergebnisse s. Tab. 31 und 32) folgende Annahmen getroffen:

- Die Trockenrohdichten konservierend bestellter Flächen wurden in tieferen Schichten um 0.05g/cm<sup>3</sup> verringert,
- die Infiltrationsrate konservierend bestellter Flächen wurde in tieferen Schichten verdoppelt bzw. verdreifacht (Skinfaktor 2 bzw. 3).

**Tabelle 31: Vergleich der Korrekturen (Trockenrohdichte, Skinfaktor) zur verbesserten Abbildung der konservierenden Bodenbearbeitung hinsichtlich Oberflächenabfluss mit E3D - Ver. 3.11 am Beispiel des Lippersdorfer Baches**

	Niederschlagsereignis am 05.05.2004 bei Bodenfeuchte			Niederschlagsereignis am 10.05.2004 bei Bodenfeuchte		
	gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Δ Q Dichtekorrektur I/Messung	287	1071	1626	52	190	254
Δ Q Dichtekorrektur II/Messung	286	1007	1536	52	178	254
Δ Q Dichtekorrektur II/Dichtekorrektur I	0	94	94	0	97	94
Δ Q Skinkorrektur/Messung	287	942	1359	52	166	251
Δ Q Skinkorrektur/ Dichtekorrektur II	0	93	93	0	93	88

(Angaben in %, 100 % = keine Abweichung gegenüber nicht korrigierten Bodendichtewerten und Skinfaktoren)

**Tabelle 32: Vergleich der Korrekturen (Trockenrohdichte, Skinfaktor) zur verbesserten Abbildung der konservierenden Bodenbearbeitung hinsichtlich Oberflächenabfluss mit E3D - Ver. 3.14 am Beispiel des Lippersdorfer Baches**

	Niederschlagsereignis am 05.05.2004 bei Bodenfeuchte			Niederschlagsereignis am 10.05.2004 bei Bodenfeuchte		
	gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Δ Q Dichtekorrektur I/Messung	131	236	896	21	37	135
Δ Q Dichtekorrektur II/Messung	131	236	794	21	37	123
Δ Q Dichtekorrektur II/Dichtekorrektur I	0	0	88	0	0	90
Δ Q Skinkorrektur/Messung	131	236	713	21	37	111
Δ Q dir Skinkorrektur/Dichtekorrektur II	0	0	90	0	0	90

(Angaben in %, 100 % = keine Abweichung gegenüber nicht korrigierten Bodendichtewerten und Skinfaktoren)

Verglichen mit der Korrektur der Lagerungsdichte (vgl. Kap. 4.7.1) sind die Effekte bezüglich einer Abflussreduzierung auf konservierend bestellten Flächen bei Korrektur der Trockenrohdichte bzw. des Skinfaktors (s. o.) nicht in dem Maße eingetreten. Für „geringe“ Bodenfeuchtezustände werden

keine nennenswerten Reduzierungen erreicht. Ein Feuchte bedingtes Sättigungsdefizit wird durch eine Verringerung der Bodendichte weiter erhöht und kann durch die verwendeten Niederschlagsintensitäten nicht ausgeglichen werden (Tab. 31 und 32).

Dieser Effekt tritt bei Version 3.14 zusätzlich für „normale“ Feuchten auf (Tab. 32), was die große Sensitivität dieser Modellversion auf hohe Bodenfeuchten (vgl. Kap. 4.1) unterstreicht. Es wird darüber hinaus deutlich, dass Abflussreduzierungen durch Korrekturen der Bodendichte und Skinfaktoren in der EROSION 3D-Modellversion 3.14 fast den doppelten Betrag erreichen. Es werden also deutlich bessere Ergebnisse erzielt (Tab. 32).

Im weiteren Verlauf wird geprüft, ob die vorgenommenen Korrekturen auch für die Berechnung von Landnutzungsszenarien und Bodenzustände plausible Ergebnisse erzielen.

**Tabelle 33: Szenarienvergleich unverschlämmte vs. verschlämmte Feldzustände bei unterschiedlichen Feldkulturen bzw. Bodenbearbeitung - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14**

Szenario	$\Delta Q$ unverschlämmt/verschlämmt [%] bei Bodenfeuchte (E3D – Ver. 3.11)			$\Delta Q$ unverschlämmt/verschlämmt [%] bei Bodenfeuchte (E3D – Ver. 3.14)		
	gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Grünland	103	111	99	99	99	73
Mais (Grubber)	97	100	99	99	96	97
Mais (Pflug)	98	105	113	99	96	33
WW (Grubber)	96	100	99	99	96	144
WW (Pflug)	112	89	102	118	130	46
Ist-Stand	99	100	99	99	97	-9
Ist-Stand (Grubber)	96	99	98	99	96	95
Ist-Stand (Pflug)	101	105	103	99	97	90

(ohne Korrektur von Lagerungsdichte bzw. Skinfaktor; Werte über 100 % = unplausible Abflussabschätzung)

**Tabelle 34: Szenarienvergleich Grubber vs. Pflug - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14**

Szenario	Δ Q Grubber/Pflug [%] bei Bodenfeuchte (E3D – Ver. 3.11)			Δ Q Grubber/Pflug [%] bei Bodenfeuchte (E3D – Ver. 3.14)		
	gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Mais unverschlämmt	60	126	101	90	129	340
Mais verschlämmt	60	132	115	90	130	82
WW unverschlämmt	59	109	100	90	129	263
WW verschlämmt	62	123	103	89	130	66
Ist-Stand unver- schlämmt	56	116	101	92	130	253
Ist-Stand verschlämmt	58	122	107	91	131	237

(ohne Korrektur von Lagerungsdichte bzw. Skinfaktor; Werte über 100 % = unplausible Abflussabschätzung)

**Tabelle 35: Szenarienvergleich unverschlämmt vs. verschlämmt Feldzustände bei unterschiedlicher Feldkultur bzw. Bodenbearbeitung - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14**

Szenario	Δ Q unverschlämmt/verschlämmt [%] bei Bodenfeuchte (E3D - Ver. 3.11)			Δ Q unverschlämmt/verschlämmt [%] bei Bodenfeuchte (E3D - Ver. 3.14)		
	gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Grünland	109	97	91	99	98	71
Mais (Grubber)	95	100	99	99	96	96
Mais (Pflug)	94	100	108	99	97	86
WW (Grubber)	97	100	99	99	96	162
WW (Pflug)	122	97	98	116	128	88
Ist-Stand	97	97	97	99	97	89
Ist-Stand (Grubber)	97	99	97	99	96	94
Ist-Stand (Pflug)	97	100	100	99	97	86

(mit Korrektur von Lagerungsdichte (Trockenrohndichte); Werte über 100 % = unplausible Abflussabschätzung)

**Tabelle 36: Szenarienvergleich Grubber vs. Pflug - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14**

Szenario	Δ Q Grubber/Pflug [%] bei Bodenfeuchte (E3D - Ver. 3.11)			Δ Q Grubber/Pflug [%] bei Bodenfeuchte (E3D - Ver. 3.14)		
	gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Mais unverschlämmt	64	122	100	91	120	314
Mais verschlämmt	62	122	110	90	121	180
WW unverschlämmt	63	109	100	91	120	301
WW verschlämmt	-61	113	99	90	121	162
Ist-Stand unverschlämmt	-60	115	100	92	118	250
Ist-Stand verschlämmt	59	117	103	92	119	228

(mit Korrektur von Lagerungsdichte (Trockenrohdichte); Werte über 100 % = unplausible Abflussabschätzung)

**Tabelle 37: Szenarienvergleich unverschlämmt vs. verschlämmt Feldzustände - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14**

Szenario	Δ Q unverschlämmt/verschlämmt [%] bei Bodenfeuchte (E3D - Ver. 3.11)			Δ Q unverschlämmt/verschlämmt [%] bei Bodenfeuchte (E3D - Ver. 3.14)		
	gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Mais (Grubber)	98	101	99	99	96	95
WW (Grubber)	98	101	99	99	96	95
Ist-Stand	97	100	98	99	97	89
Ist-Stand (Grubber)	98	100	97	98	96	93

(mit Korrektur der Trockenrohdichte bei konservierender Bodenbearbeitung; Werte über 100 % = unplausible Abflussabschätzung)

**Tabelle 38: Szenarienvergleich Grubber vs. Pflug Korrektur - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14**

Szenario	Δ Q Grubber/Pflug [%] bei Bodenfeuchte (E3D - Ver. 3.11)			Δ Q Grubber/Pflug [%] bei Bodenfeuchte (E3D - Ver. 3.14)		
	gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Mais unverschlämmt	20	58	88	37	46	367
Mais verschlämmt	21	65	97	36	11	240
WW unverschlämmt	17	58	88	37	22	352
WW verschlämmt	20	58	88	36	9	239
Ist-Stand unverschlämmt	16	57	88	53	26	309
Ist-Stand verschlämmt	17	59	91	52	26	292

(mit Korrektur von Trockenrohdichte bei konservierender Bodenbearbeitung; Werte über 100 % = unplausible Abflussabschätzung)

**Tabelle 39: Szenarienvergleich unverschlämmt vs. verschlämmt Feldzustände - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14**

Szenario	Δ Q unverschlämmt/verschlämmt [%] bei Bodenfeuchte (E3D – Ver. 3.11)			Δ Q unverschlämmt/verschlämmt [%] bei Bodenfeuchte (E3D - Ver. 3.14)		
	gering	normal	hoch	gering	normal	hoch
Mais (Grubber)	99	100	82	99	97	94
WW (Grubber)	71	100	82	99	85	95
Ist-Stand	100	100	100	99	97	89
Ist-Stand (Grubber)	99	99	95	99	97	93

(mit Korrektur von Skinfaktor für konservierende Bearbeitung; Werte über 100 % = unplausible Abflussabschätzung)



**Tabelle 40: Szenarienvergleich Grubber vs. Pflug Korrektur Skinfaktor konservierende Bearbeitung - Oberflächenabflussabschätzung mit EROSION 3D – Ver. 3.11 bzw. Ver. 3.14**

Szenario	Δ Q Grubber/Pflug [%] bei Bodenfeuchte (E3D – Ver. 3.11)			Δ Q Grubber/Pflug [%] bei Bodenfeuchte (E3D – Ver. 3.14)			
	gering	normal	hoch	gering	normal	hoch	
						Skin 2	Skin 3
Mais unverschlämmt	16	41	41	48	45	151	98
Mais verschlämmt	16	45	54	47	40	137	89
WW unverschlämmt	14	41	41	49	24	86	
WW verschlämmt	24	41	49	47	25	79	
Ist-Stand unverschlämmt	13	40	48	54	28	112	55
Ist-Stand verschlämmt	13	41	50	43	25	103	42

(mit Korrektur von Skinfaktor für konservierende Bearbeitung; Werte über 100 % = unplausible Abflussabschätzung)

Die Tabellen 33 - 40 stellen jeweils die Verhältniszahlen zwischen den simulierten Szenarien dar. Es werden unverschlämmt und verschlämmt sowie konservierende und konventionelle Szenarien gegenübergestellt. Ergebnisse größer 100 % stehen für eine unplausible Abflussabschätzung im Sinne der im Kapitel 4.5.3 festgelegten Plausibilitätskriterien.

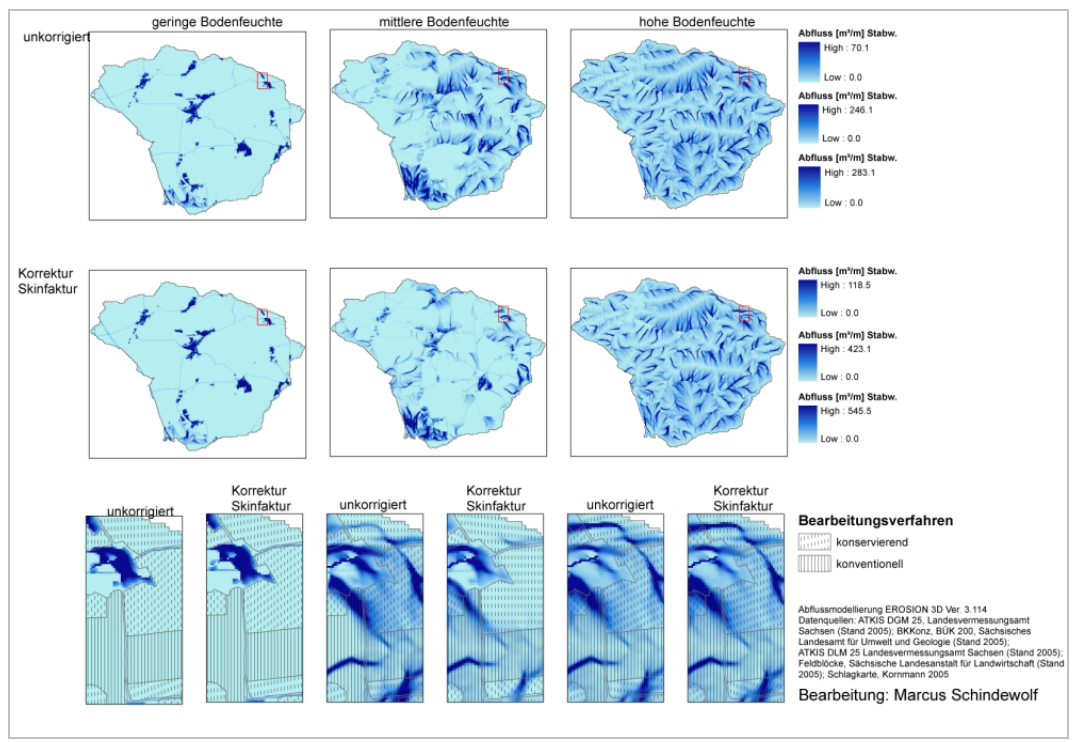
Im ersten Korrekturschritt (Trockenrohddichte) werden für die Modellversion 3.11 bereits einige Verbesserungen erreicht (Tab. 35 im Vergleich zu Tab. 33 und 34). Oberflächenabflüsse auf verschlämten Flächen werden gut wiedergegeben. Im Gegensatz dazu steigen die simulierten Oberflächenabflüsse bei Version 3.14 an (Tab. 40).

Im zweiten Korrekturschritt (Trockenrohddichtekorrektur konservierende Bodenbearbeitung) sind die Ergebnisse bereits eindeutiger. Die Abbildung der Verschlämmung führt zu einer Verbesserung der Prognosegüte. Lediglich die Version 3.11 zeigt bei der Bodenfeuchte-Zustandsstufe „normal“ eine nur geringe Fähigkeit, die eindeutig infiltrationshemmende Wirkung einer Verschlammungsschicht abzubilden (Tab. 37). Die konservierende Bodenbearbeitung wiederum kann in dieser Version besser wiedergegeben werden, als es bei Version 3.14 der Fall ist. Hier schneidet diese vor allem bei „feuchten“ Feldzuständen schlechter ab (Tab. 38).

Dieser Trend lässt sich über die nächste Korrektur (Anpassung des Skinfaktors bei konservierender Bodenbearbeitung) fortsetzen. Version 3.11 reagiert in der Regel plausibel (Tab. 39). Die Version 3.14 kann erst bei Skinfaktoren von 3 eindeutig plausible Ergebnisse erzielen (Tab. 40 und

Abb. 29). Diese Annahme ist mit Untersuchungen von GROSCH (2007) vergleichbar, der für Direktsaatflächen mit Haubeninfiltrometertests Skinfaktoren zwischen 0.3 und 43 für den B-Horizont ermittelte.

Die Korrekturen erfolgten ohne Änderung des Modellansatzes. Die Effekte sind spürbar und bringen qualitativ plausible Ergebnisse. Um diese Erkenntnisse auch quantitativ für eine optimierte Modellnutzung zur Verfügung zu stellen, bedarf es geeigneter Messungen innerhalb der den Bearbeitungshorizont unterlagernden Bodenhorizonte, vor allem zur Bestimmung des Skinfaktors und des Wasserretentionsvermögens in den Makroporen.



**Abbildung 29: Verbesserung der Szenarienrechnung durch Korrektur der Datengrundlage (E3D – Ver. 3.14, Infiltrationskorrektur 20.07.2004)**

**4.6.3 Verbesserung der Initialbedingungen (Bodenfeuchte)**

Die Sensitivitätsanalyse und N-A-Simulation der Bodenfeuchteszenarien hat den großen Einfluss des Parameters Anfangsbodenfeuchte deutlich gemacht. Dadurch werden die Einflüsse von Relief und Wasserentzug durch Pflanzen im Jahresgang vernachlässigt. Im Folgenden soll versucht werden, diesen Parameter sowohl räumlich als auch zeitlich besser abschätzen zu können. Im Datenbankprozessor werden die Vorbodenfeuchten für gleiche Elementarflächen gleich geschätzt.

#### 4.6.3.1 Testen des Topographischen Bodenfeuchteindex in der Mehrschichtversion

Der Topographische Index gilt als Maß für die relative Vorsättigung in einem Gebiet. Er wird gebildet durch:

$$\ln \frac{a}{\tan \beta} \quad (\text{Gl. 16})$$

$a$  Einzugsgebietsfläche der Zelle

$\beta$  Hangneigung der Zelle

In der vorliegenden Arbeit wird die Annahme getroffen, dass dem Gebietsmittel des Topographischen Indexes (Gl. 16) eine Änderung der Bodenfeuchte von 0 % entspricht. Höhere Werte werden als Volumenprozent Wassergehalt addiert, niedrigere subtrahiert. Auf diese Weise erhält man ein typisches Muster der Bodenfeuchte mit relativ trockeneren Kuppenstandorten und relativ feuchteren Tiefenlinien. Diese Herangehensweise lässt keine Rückschlüsse auf die tatsächliche Situation im jeweiligen Gebiet zu, sondern dient der Hervorhebung lokaler Unterschiede.

Die Verwendung des Topographischen Indexes bewirkt methodenbedingt keine nennenswerte Verbesserung der simulierten Gebietsreaktion (Tab. 41). Die Spannweite der Abflussabbildung ist besonders bei „geringen“ Bodenfeuchten am höchsten. Die „hohen“ und „normalen“ Bodenfeuchtezustände zeichnen sich durch geringfügig höhere Gesamtabflüsse als bei einer Feuchtegenerierung über den Datenbankprozessor DPROC aus. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass die reliefabhängige Abbildung der Bodenfeuchte für die Identifizierung von besonders abflussbildenden Flächen Vorteile mit sich bringt. Es gelingt mit dieser Methode, die räumliche Verteilung und die Proportionalisierung der Oberflächenabflüsse auf bestimmten Reliefpositionen zu verbessern (Abb. 30 und Abb. A 26). Eine Anwendung dieses Konzeptes in der planungsbezogenen Modellierung mit EROSION 3D kann allerdings nur durch weiterführende Untersuchungen zu dieser Problematik gewährleistet werden.

**Tabelle 41: Vergleich der simulierten Oberflächenabflüsse bei Bodenfeuchtegenerierung mit DPROC und Modifizierung mit Topographischen Index Ver. 3.11**

Einzugsgebiet		$\Delta Q \text{ DPROC/DPROC+Top. Index}$ [%] bei Bodenfeuchte		
		gering	normal	hoch
Hölzelbergbach	Ø	264	98	100
	Median	147	98	97
Lippersdorfer Bach	Ø	110	96	85
	Median	111	101	100

#### 4.6.3.2 Testen der WaSiM-ETH Anfangsbodenfeuchten mit der Mehrschichtversion von EROSION 3D

Die initialen Bodenfeuchten für die Simulationen mit E3D-Versionen 3.11 und 3.14 wurden über die Wasserhaushaltssimulation mit dem Modell WaSiM-ETH berechnet. Es wurde bei der Kalibrierung darauf Wert gelegt, sowohl eine hohe Qualität der Gütemaße zu gewährleisten als auch die Abschätzung der Trockenwetterabflüsse angemessen abzubilden.

In Abhängigkeit von Einzugsgebiet und Simulationsjahr werden unterschiedliche Qualitäten erreicht. So schneiden die Anfangsjahre der Simulation mit WaSiM-ETH 1999 (Hölzelbergbach) und 2004 (Lippersdorfer Bach) in ihrer Bewertung aufgrund fehlender Initialbedingungen schlechter ab (Tab. 42).

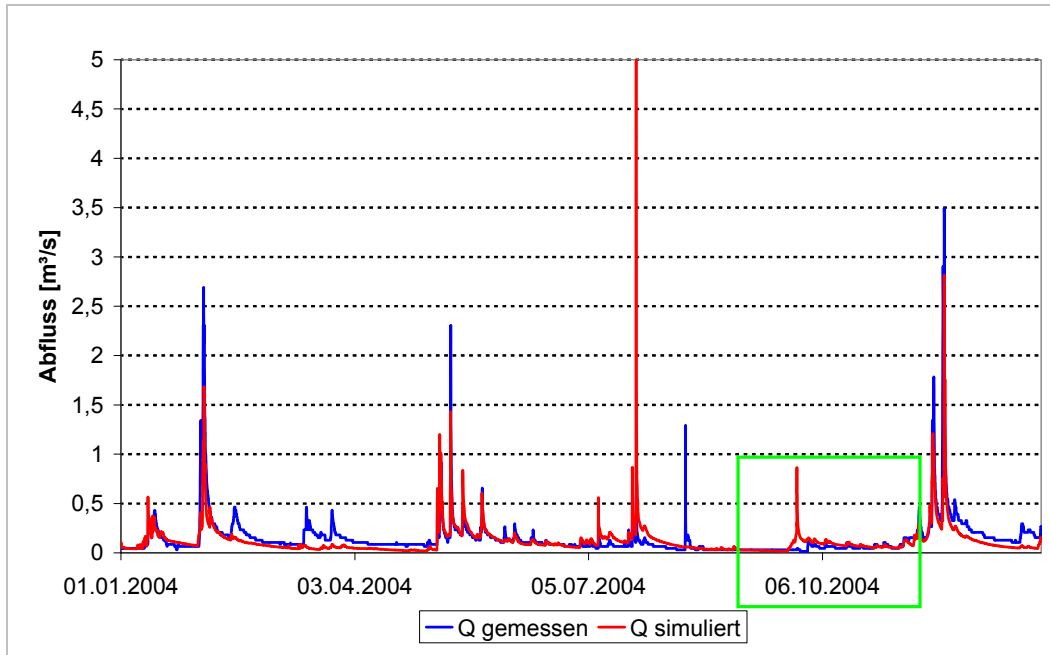
**Tabelle 42: Gütemaße der kontinuierlichen Wasserhaushaltssimulation mit WaSiM-ETH**

EZG	Jahr	R <sup>2</sup>	EV	VE
Hölzelbergbach	1999	0,37	0,18	22,0
	2000	0,71	0,44	81,0
	2001	0,35	0,80	152,0
	2002	0,82	0,71	88,0
Lippersdorfer Bach	2004	0,45	0,41	83,7
	2005	0,82	0,70	70,4

Für das EZG Baderitzer Teich wurden keine Initialbedingungen bestimmt, da die Pegelaufzeichnung gerade bezüglich der Trockenwetterabflüsse deutliche Defizite aufwies.

Die zum Teil geringe Güte der Modellierung kann auf Unsicherheiten in den Niederschlagsdaten für das Saidenbachgebiet zurückgeführt werden. Am Beispiel des Simulationsjahres 2004 (Abb. 30) wird deutlich, dass mit WaSiM-ETH sowohl Abflussereignisse nicht wiedergegeben als auch unrealistische Abflussscheitel berechnet werden. Diese Unsicherheiten müssen bei Ableitung der Anfangsbodenfeuchten in die Diskussion möglicher Fehlerquellen mit einbezogen werden.

Die Simulationen mit EROSION 3D mit Nutzung der mit WaSiM-ETH berechneten Bodenfeuchtwerte liefern bessere Ergebnisse, als es bei der Annahme „normaler“ Bodenfeuchten im Gebiet der Fall ist. In einigen Fällen liegen die Abweichungen nur zwischen 50 und 150 % der gemessenen Abflüsse. Besonders gut werden die Durchflüsse beim Hölzelbergbach-EZG getroffen (Tab. 43).



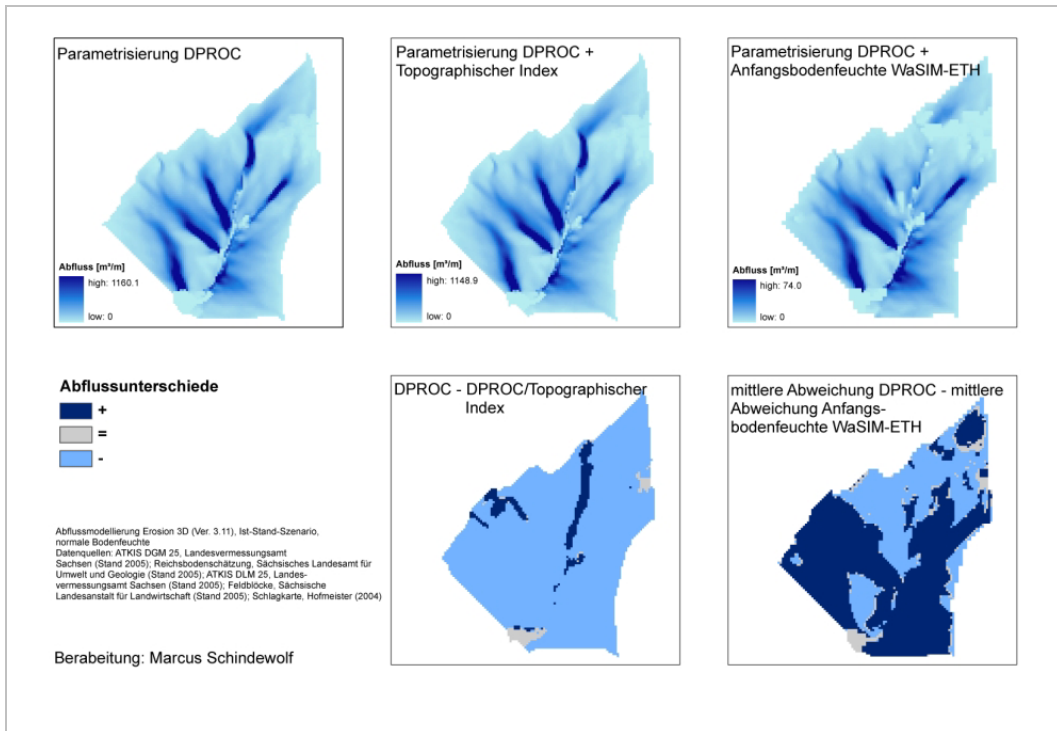
**Abbildung 30: Unsicherheiten in der mit WASiM-ETH simulierten Gebietsreaktion im EZG-Lippersdorf (Berechnungszeitraum 2004)**

**Tabelle 43: Mit EROSION 3D (Ver. 3.11 und 3.14) ermittelte Oberflächenabflüsse bei mit WaSiM-ETH bestimmten Ausgangsbodenfeuchten (Initial) und „normaler“ bzw. abgeschätzter Bodenfeuchte (BF normal) (lineare Abflussabtrennung)**

EZG	Ereignis	Ver. 3.11 [%]		Ver. 3.14 [%]	
		Initial	BF normal	Initial	BF normal
Hölzelbergbach	18.06.1999	1784	2266	3346	4249
	05.07.1999	102	103	52	52
	07.11.2001	39	207	3	16
	05.12.2001	50	252	3	17
	14.04.2002	20	140	79	536
	16.07.2002	2102	9094	2461	10648
	11.08.2002	177	892	188	947
Lippersdorfer Bach	05.05.2004	1254	2084	293	487
	06.05.2004	624	1815	349	1017
	18.11.2004	292	739	95	253
	05.07.2005	324	847	108	282
	22.08.2005	128	687	31	167

(100 % = keine Abweichung vom gemessenen Abfluss)

Eine Ursache der besseren Rechengüte von EROSION 3D liegt in der modellseitigen Abschätzung der Initialbedingungen selbst. Diese werden vom Modell WaSiM-ETH jeweils nur für die Wurzelzone oder die gesamte ungesättigte Zone, gemittelt in Form des relativen Wassergehaltes, berechnet. Die horizontbezogene Berechnung der Initialbedingungen ist nicht möglich. Daher muss der relative Wassergehalt über die verwendete Pedotransferfunktion, in diesem Falle ZACHARIAS & BOHNE (2007), auf den tatsächlichen Wassergehalt zurückgerechnet werden. Bei der vereinfachten Annahme gemittelter Bedingungen im Bodenprofil kann es jedoch zur Überschätzung der tatsächlichen Wassergehalte im oberen Bodenhorizont und zur Unterschätzung in den darunter liegenden kommen. Das Modell EROSION 3D reagiert sehr sensitiv auf diesen Parameter. Außerdem profitiert gerade das Wasserspeichervermögen der unteren Horizonte mit hohen Lagerungsdichten, von geringer unterschätzten Wassergehalten und damit verbundenen größeren freien Porenraumvolumina. Es kann festgehalten werden, dass die Rechengüte von E3D mit Bestimmung der Initialbedingungen hinsichtlich Bodenfeuchte sowohl gebiets- als auch flächenspezifisch verbessert wird (Abb. 31).



**Abbildung 31: Räumliche Verteilung des Abflusses bei Bodenfeuchtebestimmung über Wasserhaushaltssimulation und Topographischen Index (EZG Hölzelbergbach vom 16.07.2002)**

#### 4.6.4 Verbesserungsvorschläge für den Datenbankprozessor DPROC

Die Parametrisierung der Standardzustände und Szenarien für die Modellierung mit EROSION 3D (Ver. 3.11 und 3.14) erfolgte ausschließlich mit dem Programm DPROC. Dieses Werkzeug ermöglicht eine schnelle und einfache Ableitung von Modelleingangsdaten für EROSION 3D, birgt jedoch

- bei ungeprüfter Anwendung fehlerbehafteter Datengrundlagen - die Gefahr implausibler Prognoseergebnisse. Um eine transparente Nutzung dieses Tools zu ermöglichen, sollten im Programm selbst Veränderungen durchgeführt sowie die Quantität und Qualität der Datenbasis verbessert werden.

#### Programmtechnische Anpassungen

Im Datenbankabfragemenü von EROSION 3D ist oft nicht erkennbar, welcher Parameterwert erzeugt wird. Das sollte im jeweiligen Menü kenntlich gemacht werden. Bei der eigentlichen Abfrage wird ein Skript erstellt, das über die Gesamtqualität der für EROSION 3D-Modellierungen verwendeten Daten Auskunft gibt. Bei Nichtvorhandensein von Datenwerten kann dem Nutzer im Protokoll die Ursache dieser Nicht-Attributierung dargestellt werden. Das ermöglicht eine schnellere und effizientere Parametrisierung von Feldzuständen zwischen November und April.

#### Verbesserung der Datengrundlage

Im vorliegenden Bericht sind Möglichkeiten aufgeführt, wie man über eine Verbesserung der Datengrundlage die Rechengüte des Modells optimieren kann (vgl. Kap. 4.4 und 4.7). Es handelt sich um die Parameter Skinfaktor, Bodendichte, Bodenfeuchte und Horizontmächtigkeit (vgl. Kap. 4.1, 4.2.1, 4.4, 4.7.1, 4.7.2 und 4.7.3).

Um die Abbildung dieser Infiltration mit dem Mehrschichtenmodell EROSION 3D (Ver. 3.11 und 3.14) vor allem auf konservierend bearbeiteten Flächen zu verbessern, müssen Skinfaktoren für die unteren Bodenhorizonte ermittelt werden. Weiterhin ist es notwendig, die Datenbasis für Oberbodenhorizonte auf langjährig pfluglos bearbeiteten Flächen zu erweitern, da im Rahmen der Datenerhebung 1994 in Sachsen noch keine derartigen Flächen vorhanden waren. Es sollte versucht werden, auf trockenen Standorten angepasste Datenwerte zu ermitteln, da aus den vorliegenden Ergebnissen die Infiltration auf diesen Standorten vor allem bei verschlammten Oberflächen deutlich überschätzt wird.

Bodendichten und Skinfaktoren sollten in Abhängigkeit der realen Bearbeitungshorizonte abgeleitet werden, um der ungleichen Verteilung dieser Parameter im ehemaligen Bearbeitungshorizont bzw. tieferen Bodenschichten gerecht zu werden.

Weitere vorgeschlagene Modifikationen sind die Ableitung der Bodenfeuchte über Wassergehalts-Wasserspannungs-Beziehungen oder einen Topographischen Index. Ergänzend dazu kann der Entwässerungsansatz von ZACHARIAS & BOHNE (1998) zur Ermittlung von Feldzuständen bei einer definierten Vorentwässerungsdauer angewendet werden.

## 5 Schlussfolgerung

Das Bodenerosionsmodell EROSION 3D wurde bezüglich seiner Prozessabbildung erweitert. Bei den Erweiterungen handelt es sich um einen kinematischen Abflussretentions- und Translationsansatz und um einen Mehr-Schicht-Infiltrationsansatz im Modell EROSION 3D – Ver. 3.11 und 3.14. Im Rahmen des Projektes wurden diese Erweiterungen in drei Einzugsgebieten in Sachsen getestet und Möglichkeiten einer Weiterentwicklung aufgezeigt, um eine operationalisierte Nutzung des Modells in der planerischen Praxis in Zukunft im Bereich der Oberflächenabflussabschätzung zu ermöglichen. Das primäre Ziel der Validierung lag in der Aufdeckung von Modellsensitivitäten und möglichen Fehlerquellen, die entweder durch die Parametrisierung, die Prozessabbildung oder unvollständiges Anwenderwissen bedingt sind. Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Optimierung der Modellergebnisse durch Verbesserung der Eingangsdaten.

Das Modell E3D (Ver. 3.11 und 3.14) ist in der Lage, über den integrierten Abflussretentions- und Translationsansatz den Verlauf der Wellenbewegung am Auslasspunkt des Einzugsgebietes deutlich verbessert abzubilden. Die Berechnung mit diesem Ansatz wirkt abflussverringend, da Niederschlagswasser länger auf der Bodenoberfläche verbleibt. Mit zunehmender Einzugsgebietsgröße werden die Abweichungen zwischen berechneten und simulierten Abflussscheiteln größer, weil die hydrodynamischen Prozesse im Gerinne über diesen Ansatz nur ansatzweise beschrieben werden. Es empfiehlt sich, entweder das Modell EROSION 3D um einen Ansatz zur Beschreibung hydrodynamischer Prozesse in Gerinnen zu erweitern oder den Gerinneabfluss über eine Modellkopplung mit hydraulischen Modellen separat zu beschreiben.

Eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse hat den enormen Einfluss der Bodendichte und der Anfangsbodenfeuchte auf den Infiltrationsprozess herausgestellt. Für eine effektive Modellanwendung müssen vor allem diese Parameter möglichst genau abgeschätzt werden.

Die Simulationen in der Plot-Skala haben gezeigt, dass die im Rahmen des Bodenerosionsprogramms Sachsen durchgeführten Berechnungen und Modellanpassungen nicht ohne weiteres auf die Mehr-Schicht-Infiltrationsversion von EROSION 3D übertragen werden können.

Die im Erosions-Messprogramm Sachsen ermittelten Skinfaktoren führen zu einer Unterschätzung der Abflüsse und schlechten Abbildung der Abflusskurve. Erst die Diskretisierung in „reale“ Bearbeitungshorizonte und Attributierung dieser Schichten ermöglichte eine gute Übereinstimmung der Abflusswerte in Qualität und Quantität. Aus diesem Grund wird empfohlen, die Horizontmächtigkeit des Bearbeitungshorizontes nicht aus den Bodenkarten zu übernehmen, sondern auf übliche bearbeitungsabhängige Bearbeitungstiefen zurückzugreifen und eine Rückgangskonstante für die hydraulische Leitfähigkeit zu integrieren.

Die Berechnung der N-A-Ereignisse wurde unabhängig vom Bodenzustand für drei Bodenfeuchtezustände durchgeführt. Bei „normalen“ und „hohen“ Bodenfeuchtezuständen werden mit der vorliegenden Mehr-Schicht-Infiltration-Version 3.11 des Modells EROSION 3D die Abflussvolumina bei



fast allen Ereignissen und Einzugsgebieten überschätzt. Diese liegen im Mittel bei 1 350 % für „normale“ und 1683 % Überschätzung des Oberflächenabflusses für „hohe“ Bodenfeuchtezustände (Ver. 3.11). Bei Version 3.14 liegen die Überschätzungen des Oberflächenabflusses zwischen 454 % („normale“ Bodenfeuchte) und 4324 % (für „hohe“ Bodenfeuchte), bildet also die Reaktionen für „normale“ Bodenfeuchtezustände deutlich besser ab.

Für „geringe“ Bodenfeuchtezustände werden in der Regel akzeptable Ergebnisse erzielt, die im Mittel bei 106 % (Ver. 3.11) bzw. 61 % (Ver. 3.14) der gemessenen Abflüsse liegen.

Da der Bodenabtrag im Modell EROSION 3D auch über den Impulsstrom des Oberflächenabflusses ermittelt wird, bewirken überschätzte Oberflächenabflüsse erhöhte Bodenabträge. Da Abweichungen in dieser Größenordnung bei der Ein-Schicht-Infiltrationsversion von EROSION 3D nicht aufgetreten sind, liegt der Schluss nahe, dass die bisher vorhandenen Parametrisierungsgrundlagen der unterlagernden Bodenschichten für diese Überschätzung des Oberflächenabflusses mit der Mehr-Schichten-Version des Modells EROSION 3D verantwortlich sind.

Eine Fehlerquelle bilden die hohen Bodendichten der unteren Bodenhorizonte aus den digitalen Bodenkarten. Das Modell EROSION 3D benötigt zur Ermittlung des Wasserspeichervolumens und der aktuellen Infiltrationsrate Trockenrohddichten als Eingabeparameter. Laut Kartierschlüssel der KA5 (AG BODEN 2005) handelt es sich bei den angegebenen Werten um effektive Lagerungsdichten, die um den Summand  $0.009 \cdot \text{Tongehalt}$  erhöht wurden. Infolge der hohen Modellsensitivität gegenüber dem Parameter Bodendichte treten bei der Verwendung nicht korrigierter Werte deutlich überschätzte Abflüsse auf.

Ein grundsätzliches Problem ist die modellseitig vollständige Abbildung der bodenbearbeitungsinduzierten Änderung des Infiltrationsverhaltens des Unterbodens. Im Gegensatz zu den Felduntersuchungen zahlreicher Autoren (TEBRÜGGE & ABELSOVA 1999, ZIMMERLING 2004, NITZSCHE et al. 2002, SCHMIDT et al. 1996, SCHRÖDER 2000, ZACHARIAS 2007) ist die infiltrationsfördernde Wirkung der konservierenden Bodenbearbeitung über die N-A-Simulationen mit beiden Modellversionen nicht eindeutig nachweisbar. Die Ursache dieses unplausiblen Modellverhaltens ist die Kombination des GREEN-AMPT-Infiltrationsansatzes mit einer unzureichenden Parametrisierung der Makroporen-Leitfähigkeit in Verbindung mit den hohen Bodendichten der digitalen Bodenkarten im Unterboden. Modellseitig bildet EROSION 3D über den Skinfaktor die verbesserte hydraulische Leitfähigkeit konservierend bearbeiteter Flächen ab. Dieser Skalierungsfaktor wirkt jedoch nur auf die Flussgrößen, während hingegen die erhöhte Wasserspeicherkapazität in den Makroporen nicht berücksichtigt wird. Infolge einer erhöhten Infiltrationsrate gelangt das Niederschlagswasser schneller in tiefere Schichten, die eine dichtebedingt geringe Infiltrationsleistung aufweisen. Durch Rückstaueffekte kommt es zu einem erhöhten Oberflächenabfluss.

Eine Verbesserung der Rechengüte könnte über die Integrierung eines Makroporenansatzes mittels Bypass-Ansatz in EROSION 3D erreicht werden, der sowohl Wassertransport als auch Wasserretention abbildet.

Im Rahmen der Arbeit wurde durch Optimierung der Eingangsdaten positive Effekte für die N-A-Simulation mit EROSION 3D erzielt. Im ersten Schritt wurde der Parameter effektive Lagerungsdichte in die modellseitig benötigte Trockenrohdichte umgerechnet. Die abflussmindernde Wirkung dieser Parameteroptimierung liegt versionsabhängig zwischen -40 und -70 %.

Um die konservierende Bodenbearbeitung besser abzubilden, wurde die Bodendichte der unterlagernden Horizonte auf konservierend bearbeiteten Flächen um  $0,05 \text{ g/cm}^3$  verringert und im Anschluss der Skinfaktor für diese Horizonte auf 2 bzw. 3 erhöht. Im Ergebnis können die Unterschiede zwischen beiden Bearbeitungsvarianten qualitativ besser geltend gemacht werden. Sie müssen aber durch Messwerte quantitativ abgesichert werden. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf.

Die Schätzung der räumlichen Variabilität der Anfangsbodenfeuchte unter Verwendung des Topographischen Indexes (TOPMODEL-Ansatz) führt zu einer Verbesserung der Abflussbildung. Dieser Ansatz ermöglicht die Abbildung höherer Abflüsse in Tiefenlinien (Sättigungsflächen) und geringere Abflüsse auf Kuppenstandorten. Auf die Gebietsreaktion hat dieser Ansatz nur geringen Einfluss.

Die zeitliche Dynamik der Anfangsbodenfeuchte wurde mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH simuliert. Die Abflussprognose konnte bei Anwendung dieser Methode für beide Modellversionen von EROSION 3D im Vergleich zu „normalen“ Bodenfeuchtezuständen verbessert werden.

Der operationalisierten Anwendung dieses Ansatzes auf größere Gebiete steht jedoch der enorme Parametrisierungs- und Kalibrierungsaufwand gegenüber. Zur Abschätzung der Gebietsreaktion bei Szenarienrechnungen können andere Herangehensweisen (vgl. ZACHARIAS & BOHNE 1998) schneller und effizienter zur Anwendung kommen.

Weiterführende Aufgaben sind:

- Integrierung eines kinematischen Gerinneabflusses oder Modellkopplung zur kinematischen Berechnung bzw. Beschreibung des Gerinneabflusses in größeren Einzugsgebieten.
- Überarbeitung der Eingangsdatengrundlage bezüglich
  - realer Bearbeitungshorizonte (Tiefe, Zustand)
  - Trockenrohdichten aus den digitalen Bodendaten
  - Trockenrohdichten für Unterbodenhorizonte konservierend bearbeiteter Flächen
  - Skinfaktoren für Unterbodenhorizonte konservierend bearbeiteter Flächen
  - Skinfaktoren für trockene Standorte
  - Standortbezogene Anfangsbodenfeuchte.

- Verbesserungsmöglichkeiten für den Datenbankprozessor:
  - Dynamische Erstellung des Skinfaktors für Oberböden als Funktion der Niederschlagsintensität und Zeit
  - Verbesserte Transparenz bei der Bestimmung von Feldzuständen in Übergangszeiträumen (z. B. Mais im November).

## 6 Zusammenfassung

Ziel des Projektes war die Prüfung des weiterentwickelten Bodenabtragsmodells EROSION 3D in zwei Versionen bezüglich der Simulation des hochwasserrelevanten Oberflächenabflusses. Der Mehr-Schicht-Infiltrations-Ansatz und der Abflussretentions- und -translationsansatz der EROSION 3D-Ver. 3.11 und 3.14 wurde in drei Einzugsgebieten anhand realer N-A-Ereignisse getestet.

Der Abflussretentions- und -translationsansatz bewirkt eine deutlich verbesserte Darstellung der Abflussganglinie. Eine fehlende hydrodynamische Beschreibung des Gerinneabflusses kann zu Fehleinschätzungen der Scheitelhöhe, Zeitpunkt des Scheiteldurchlaufes und Sedimentdynamik im Gerinne, besonders bei größeren Einzugsgebieten führen.

Der Mehr-Schicht-Infiltrationsansatz ermöglicht die Parametrisierung mehrerer Bodenhorizonte. Das Modell neigt zur Überschätzung der Oberflächenabflüsse, die in der Ein-Schicht-Variante nicht auftraten. Eine mögliche Ursache dafür ist der zu hoch abgeschätzte Parameter Lagerungsdichte aus den digitalen Bodenkarten. Weitere Probleme traten bei der Berechnung von Landnutzungs- und Bewirtschaftungsszenarien auf.

Eine unkritische Parametrisierung der unteren Horizonte durch die sensitiven Parameter Lagerungsdichte und Skinfaktor führt zur Fehleinschätzung der Szenarien durch EROSION 3D. Durch die Optimierung der Eingangsdaten konnten die Probleme qualitativ behoben werden. Ziel weiterführender Untersuchungen muss es sein, die Eingangsdatengrundlage für EROSION 3D durch weitere Feldmessergebnisse zu verbessern.

## 7 Quellenverweis

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage. Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. E. Schweizerbart Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- AHRENS, B. (2003): Evaluation of precipitation forecasting with the limited area model ALADIN in an alpine watershed. Meteorologische Zeitschrift 12 (5): S. 245 - 255.
- AITKEN, A. P. (1973): Assessing systematic errors in rainfall-runoff models. Journal of Hydrology 20: S. 121 - 136.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; MUTTHIAH, R.; BERNHARD, G. (1995): Automated base flow separation and recession analysis techniques. Ground Water 33/6: S. 1010 - 1018.

- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M. (1999): Automated methods for estimating base flow and ground water recharge from stream flow records. *Journal of the American Water Resources Association* 35 (2): S. 411 - 424.
- ATV (1986): Arbeitsberichte der ATV/DWK-Arbeitsgruppe 1.2.6 „Hydrologie der Stadtentwässerung“: Die Berechnung des Oberflächenabflusses in Kanalnetzmodellen, Teil I – Abflussbildung. *KORRESPONDENZ ABWASSER* 1986/2. S. 157 - 182.
- BEIER, M. [BEARB.] (1996): Hydrologisches Gutachten zur Beurteilung der hydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der Saidenbach-Talsperre. G.E.O.S. Freiberg Ingenieurgesellschaft mbH, 15. S. Freiberg.
- BENS, O.; HÜTTL, R. (2006): Trockenheitsinduzierte Bodenveränderungen in gemäßigten Breiten: Zum Einfluss von Landnutzung und Bodenbearbeitung auf das Phänomen der Hydrophobizität. Vortrag auf Tagung: BODEN UND DESERTIFIKATION Integriertes Forschen für den nachhaltigen Umgang mit den Böden in Trockengebieten. 05. - 06. Mai 2006 Biozentrum Klein Flottbek, Hamburg.
- BEVEN, K. J.; KIRBY, M. (1979): A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24 S. 43 - 69.
- BIERMANN, U. (2000): Die Talsperre Zschaitz (Stau Baderitz) und ihre Rolle im Verlauf der Jahna. In: Freistaat Sachsen (Hrsg.): *Ökologische Studie: Beiträge zur Entwicklung eines ökologischen Leitbildes für Flusslandschaften am Beispiel der Jahna, einem Nebenfluss der Elbe in Sachsen.* Dresden.
- BRAUSE, H. [RED.] (1990): Beiträge zur Geodynamik des Saxothuringikums. *Geoprofil* 2., Freiberg.
- BRONSTERT, A. (1994): Modellierung der Abflussbildung und Abflussdynamik von Hängen. Diss. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft Universität Karlsruhe. Mitteilung des Instituts für Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe.
- BRONSTERT, A. (1994): Physikalisch begründete, prozessorientierte Modellierung der Wasserflüsse auf /in Hängen und Kleineinzugsgebieten. In: *Mittlg. der dt. bodenkundl. Gesell.* 74: S. 253 - 256.
- BRONSTERT, A. (2004): Wasserhaushalt und Abfluss. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): *Flussgebietsbewirtschaftung - quo vadis Modellierung.*
- BRUNNER, G. W. (2006): HEC-RAS, River Analysis System User's Manual. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (HEC). Davis.
- BUCHER, W. (2003): Bodengefüge im Rahmen der Fruchtfolge stabilisieren. In: Umweltbundesamt (Hrsg.) *Bodenschutz und landwirtschaftliche Bodennutzung – Umweltwirkungen am Beispiel der konservierenden Bodenbearbeitung.* Texte 35/04: S. 36 - 45.
- BUDER, W.; GROGER, TH.; STEINERT, S. (2000): Charakteristik des Einzugsgebietes der Jahna. In: Freistaat Sachsen (Hrsg.): *Ökologische Studie. Beiträge zur Entwicklung eines ökologischen Leitbildes für Flusslandschaften am Beispiel der Jahna, einem Nebenfluss der Elbe in Sachsen.* Dresden.
- CAMBELL, G. S. (1985): *Soil Physics with BASIC*, Elsevier Science Ltd. Amsterdam.
- COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; LEWY, H. (1928): Über die partiellen Differentialgleichungen der mathematischen Physik. In: *Mathematische Annalen* 100, 32-74.

- DISPERENS, E.; SPIESS, E. (2004): Wechselwirkungen zwischen Fahrwerk und Ackerboden – TASC: Eine PC-Anwendung zum Beurteilen und Optimieren der Bodenbeanspruchung. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik. Schweiz.
- DUTMANN, R. (1999): Partikuläre Stoffverlagerungen in Landschaften. Ansätze zur flächenhaften Vorhersage von Transportpfaden und Stoffumlagerungen auf verschiedenen Maßstabsebenen unter besonderer Berücksichtigung räumlich-zeitlicher Veränderungen der Bodenfeuchte. Geosynthesis (Veröffentlichungen der Abteilung Physische Geographie und Landschaftsökologie am Geographischen Institut der Universität Hannover), H. 10. Hannover.
- DVWK (1999): Einflüsse land- und forstwirtschaftlicher Maßnahmen auf den Hochwasserabfluss – Wissensstand, Skalenprobleme, Modellansätze. DVWK- Materialien 7/1999.
- DVWK (1999): Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, DVWK- Schriften, Heft 127. Kommissionsvertrieb Wirtschaft- und Verlagsgesellschaft Gas, Wasser mbH, Bonn.
- DYCK, S.; PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- ECKHARDT, K. (2001): Vergleich zweier Verfahren zur automatischen Modellkalibrierung. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 46/2: S. 69 - 73.
- FELDMAN, A. D. (ED.) (2000): Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineer, Hydrologic Engineering Center (HEC). Davis.
- GEOGNOSTICS (2005): Abfluss und Erosionsprognose für das Einzugsgebiet "Baderitzer Teich" (Jahna) für ausgewählte Niederschlagsereignisse 2004/2005. Projektbericht unveröff. Berlin.
- Giertz (2004): Analyse der hydrologischen Prozesse in den sub-humiden Tropen Westafrikas unter besonderer Berücksichtigung der Landnutzung am Beispiel des Agiuma-Einzugsgebietes in Benin. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- GOODRICH, D. C.; UNKRICH, C. L.; SMITH, R.; WOOLHISER, D. (2006): KINEROS2 - New features and capabilities. Proc. 3rd Fed. Interagency Hydrologic Modeling Conf. April 2 - 6, 2006. Reno, Nevada.
- 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, S. 1 - 24.
- GROSCH, J. (2007): Untersuchungen zum Infiltrationsverhalten auf unterschiedlich bearbeiteten Landwirtschaftsflächen – Vergleich von konventioneller und konservierender Bearbeitung und Direktsaatflächen. Diplomarbeit. TU Bergakademie Freiberg. Unveröffentlicht.
- GRUBE, J. (2003): Beurteilung von konservierenden Bodenbearbeitungssystemen zur Bewirtschaftung peripherer Ackerbaustandorte - unter Berücksichtigung verfahrenstechnischer, ökonomischer, ökologischer, sowie pflanzenbaulicher und physiologischer Parameter. Dissertation. Culliver Verlag, Göttingen.
- IPCC (2007): Climate Change 2001 – The Scientific Basis. Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I. Report of the Regional Panel on Climate Change (IPCC). Genf.
- JACOB, D. (2002): High Resolution climate change signal for regional impact studies. Terra Flops, News Letter des Deutschen Klimarechenzentrums DKRZ, Mai 2002. S. 4 - 5. Hamburg.

- JANSSON, P. E.; KARLEBERG, L. (2001): Coupled Heat and Mass Transfer Model for Soil-Plant-Atmosphere Systems. Stockholm. Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering. ([www.lwrkth.se/CoupModel/CoupModel.pdf](http://www.lwrkth.se/CoupModel/CoupModel.pdf)).
- JETTEN, V. (2002): LISEM, Limburg Soil Erosion Model, User's Manual. University of Utrecht.
- JOSCHKO, M.; ROGASIK, H.; BRUNOTTE, H. (1996): Einfluss konservierender Bodenbearbeitung auf Bodentiere und Bodengefüge von Lehmböden. In: Wissenschaftliche Mitteilung für Landwirtschaft Braunschweig - Völkenrode (FAI), SH 178: S. 69 - 82.
- KACIREK, A. (2005): Modellierung und Analyse diffuser Stickstoff-Eintragspfade im Einzugsgebiet des Hölzelbergbaches, einem kleinen Einzugsgebiet der Trinkwassertalsperre Saidenbach. Diplomarbeit. Institut für Geographie, Fakultät für Physik und Geowissenschaften, Universität Leipzig.
- KAISER, M.; GEBEL, M.; GRUNEWALD, K. (2005): Quantifizierende Untersuchung der Auswirkungen bodenkonservierender Landbewirtschaftung auf Erosionsverhalten, Stoffhaushalt und Gewässerbiozönose am Beispiel des landwirtschaftlich genutzten Repräsentativgebietes EZG Stausee Baderitz im mittelsächsischen Lösshügellandbereich des Flusseinzugsgebietes der Jahnna. Endbericht im Auftrag des LfUG. Institut für Geographie, Technische Universität Dresden.
- KÖHLER, S. (2000): Eine Datenbank-Anwendung zur komfortablen Auswahl von Parametern für ein Bodenerosionsprogramm. Belegarbeit. Freiberg, TU Bergakademie.
- KORNMANN, M. (2006): Hochwasserschutz durch konservierende Bodenbearbeitung. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft H. 16/2006. Leipzig.
- KÖTHE, R.; BOCK, M.; VOGEL, E. (2005): Expertise zum Forschungsvorhaben. Landnutzung und Hochwasserschutz. Teilvorhaben Reliefanalyse Sachsen: Korrektur des ATKIS-DGM, Berechnung morphometrischer Reliefparameter, Erstellung einer Digitalen Geomorphographischen Karte (GMK20 Sachsen), Untersuchungen zur Erosion und Auenbödenverbreitung.
- KRON, W. (2004): Zunehmende Überschwemmungsschäden – Eine Gefahr für die Versicherungswirtschaft? ATV-DVWK-Bundestagung, S. 47 - 63.
- KUHNE, F. (2005): Profil- und Substrateigenschaften einer Bodensequenz im Mulde-Löss-Hügelland. Diplomarbeit. Fakultät Forst-, Geo-, und Hydrowissenschaften, Institut für Geographie, TU Dresden.
- LANGE, J. (2006): Abfluss von versiegelten Flächen: Prozessuntersuchungen und hydrologische Modellierung. Vortrag. Synap 2006. Dresden.
- LECHER, K.; LÜHR, H.-P.; ZANKE, U. C. E. (2001): Taschenbuch der Wasserwirtschaft. Hamburg, Parey.
- LFL (SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT) (2001): Hochauflösende Erosionsprognosekarten für das Gebiet Niederstriegis. Leipzig: LFL Fachbereich Bodenkultur und Pflanzenbau.
- LFL (2002): Untersuchung prinzipieller Handlungsmöglichkeiten des landwirtschaftlichen Hochwasser- und Bodenschutzes im Hölzelbach-Einzugsgebiet, für das katastrophale Niederschlagsereignis vom 11. bis 13. August 2002, Leipzig: LFL Fachbereich Bodenkultur und Pflanzenbau.
- LFL (2004): Abschätzung des Oberflächenabflusses und der Wasserinfiltration auf landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Hilfe des Modells EROSION 3D, Endbericht, LFL, Dresden-Pillnitz.

- LFL (2007): Abschlussbericht zum Projekt Honamu. Unveröffentlichtes Manuskript.
- LFL (2007): Exkursionsführer Landwirtschaftlicher Bodenschutz. Leipzig.
- LFUG (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE) (1994): Bodenerosionsmessprogramm Sachsen. 6. Zwischenbericht. Auswertung der Beregnungsversuche, S. 50 - 76. Freiberg.
- LFUG (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE) (1997): Talsperren, Wasserspeicher und Rückhaltebecken im Freistaat Sachsen. Materialien zur Wasserwirtschaft. Dresden.
- MADSEN, H.; WILSON, G.; AMMENTORP, H. C. (2002): Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. *J. of Hydrol.* 261: S. 48 -59.
- MICHAEL, A.; SCHMIDT, J.; SCHMIDT, W. A. (1996): Erosion 2D ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Bd. II Parameterkatalog Sachsen - Anwendung. Landesanstalt für Landwirtschaft, Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.
- MOORE, I. D.; GESSLER, P.; NIELSEN, G.; PERTERSON, G. (1993): Soil Attribute Prediction using Terrain Analysis. *Soil Science Society America Journal*, Vol. 57, S. 443 - 452.
- MPI (2007): Werden Hochwasser in deutschen Flüssen häufiger? Internetseite des Max-Planck-Institutes für Meteorologie, Hamburg. (<http://www.mpinet.mpg.de>).
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part I – a discussion of principles. *J. of Hydrol.* 10 (3): S. 238 - 250.
- NAUMANN, S. (2005): Abschätzung der punktuellen und diffusen Phosphoreinträge in den Lippersdorfer Bach, einem Teileinzugsgebiet der Talsperre Saidenbach. Diplomarbeit. Fakultät für Physik und Geowissenschaften, Institut für Geographie, Universität Leipzig.
- NEARING, M. A.; DEER-ASCOUGH, L.; LAFLEN, J. M. (1990): Sensitivity Analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. *Transaction of the ASAS* 33 (3). S. 839 - 849. St. Joseph.
- NIEHOFF, D. (2001): Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala. Dissertation. Universität Potsdam, mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät.
- NITZSCHE, O.; KRÜCK, S.; ZIMMERLING, M. (2002): Entwicklung von dauerhaft-umweltgerechten Landwirtschaftungsverfahren im sächsischen Einzugsgebiet der Elbe. Endbericht zum Teilprojekt im Rahmen des Forschungsverbunds 'Elbe-Ökologie'. Dresden/Leipzig: LFL.
- PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDREASSIAN, V. (2001): Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *J. of Hydrol.* 242: S. 275 - 301.
- PÖHLER, H. (2006): Anpassung von WaSiM-ETH und die Erstellung und Berechnung von Landnutzungs- und Klimaszenarien für die Niederschlags-Abflussmodellierung am Beispiel des Osterzgebirges. Dissertation, Technische Universität Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften.
- Refsgaard, J.C., Storm, B. (1996): Construction, calibration and validation of hydrological models. In: M.B. Abbott & J.C. Refsgaard (Hrsg.): *Distributed hydrological modeling*. Kluwer. Dordrecht. S. 41-54.
- RICHTER, H.; AURADA, K.-D. (1984): *Umweltforschung zur Analyse und Diagnose der Landschaft*, 1. Aufl. VEB Hermann Haak, Geographisch-Kartographische Anstalt Gotha.
- ROHDENBURG, H. (1995): Methods for the analysis of agro-ecosystems in Central Europe, with emphasis on geocological aspects. In: *Catena* 16: S. 12 - 57.

- SCHMIDT, J. (1984): Experimentelle Untersuchungen und Modellvorstellungen zur Bodenerosion durch Wasser. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 39: S. 139 - 144.
- SCHMIDT, J. (1991): A mathematical model to simulate rainfall erosion. *Catena Supplement*, 19: S. 101 - 109.
- SCHMIDT, J. (1996): Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter, landwirtschaftlicher Nutzflächen. *Berliner Geographische Abhandlungen* 61. Habilitation. Freie Universität Berlin.
- SCHMIDT, J. (1998): Modellbildung und Prognose zur Wassererosion. In: RICHTER, G. [Hrsg.] (1998): *Bodenerosion. Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*. S. 137 - 151. Darmstadt.
- SCHMIDT, K. (2004): Ereignisbezogene Erfassung hydrologisch relevanter Parameter an der Sondenmessstation im Einzugsgebiet Obere Jahna. Studienarbeit im Studiengang Geoökologie der TU- Bergakademie Freiberg. Unveröffentlicht.
- SCHMIDT, J.; VON WERNER, M.; MICHAEL, A. (1996): *Erosion 2D ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser*, Bd. I Modellgrundlagen – Bedienungsanleitung. Landesanstalt für Landwirtschaft, Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg.
- SCHMIDT, W.; NITZSCHE, O.; REICHEL, C.-P. (2004): Nachhaltiges Einzugsgebietsmanagement im Hinblick auf Stoffeinträge durch Erosion am Beispiel der Trinkwassertalsperre Saidenbach (Erzgebirge). *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 104: S. 59 - 60.
- SCHRÖDER, A.; VON WERNER, M. (2005): Abfluss- und Erosionsprognose für das Einzugsgebiet 'Baderitzer Teich' (Jahna) für ausgewählte Niederschlagsereignisse 2004/2005. *GEOGNOSTICS Boden und Gewässerschutz* (unveröffentlicht). Berlin.
- SCHRÖDER, R. (2000): Modellierung von Verschlammung und Infiltration in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. *Bonner Geographische Abhandlungen* 101. St. Augustin - Asgard.
- SCHULLA (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen der Klimaänderung. Diss. ETH 12018, Verlag Geographisches Institut ETH Zürich.
- SCHULLA & JASPER (2001): Modelbeschreibung WaSiM-ETH. Stand 21. Dezember 1998.
- SCHULLA & JASPER (2001): Model Description WaSiM-ETH. Last updated 19th July 2001.
- SCHUMANN, A.; MÜLLER, J. (1995): Klimatologische Kennzeichnung des mitteldeutschen Trockengebietes. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 77, S. 43 - 48.
- SCHWARZE, R. (2004): Regionalspezifische Untersuchungen in der Festgesteinsregion. In: Becker, A. & W. Lahmer [Hrsg.]: *Wasser- und Nährstoffhaushalt im Elbegebiet und Möglichkeiten zur Stoffeintragsminderung. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft 1*: S. 183 – 225. Berlin.
- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; OPPERDEN, K. (1995): On the residence time of runoff from small catchment areas in the Erzgebirgsregion. *Isotopes Environmental and Health Studies*, 31: S. 15 - 28.
- SCHWARZE, R.; DRÖGE, W.; OPPERDEN, K. (1996): Regionalisierung von Abflusskomponenten, Verweilzeiten und Umsatzräume für kleine Mittelgebirgseinzugsgebiete. Unveröff. Abschlussbericht zu Schwerpunkt 482 im DFG Schwerpunktprogramm „Regionalisierung in der Hydrologie“. Institut für Hydrologie und Meteorologie der Technischen Universität Dresden.



- SCHWARZE, R.; HERMANN, A.; MÜNCH, A.; GRÜNEWALD, U.; SCHÖNINGER, M. (1991): Rechnergestützte Analyse von Abflusskomponenten und Verweilzeiten in kleinen Einzugsgebieten. *Acta hydrophysica*, 35 (2): S: 143 - 184.
- SEIPT, P. (2003): Einfluss konservierender Bodenbearbeitung auf die Pegelzuflüsse in drei ausgewählten Teileinzugsgebieten der Talsperre Saidenbach. Diplomarbeit.
- SEIDEL, N. (2003): Vorschläge zur Verminderung der Wassererosion im Einzugsgebiet des Baderitzer Stausees - Sächsisches Lößhügelland. Fakultät für Geowissenschaften, Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- SIEKER, F. (2002): Innovativer Ansatz eines vorbeugenden Hochwasserschutzes durch dezentrale Maßnahmen im Bereich der Siedlungswasserversorgung und Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße.
- TEBRÜGGE; ABELSOVA, A. (1999): Auswirkung der Pflugbearbeitung und Direktsaat auf biogene Durchporung und ungesättigte Infiltrationsleistung des Bodens. *Landtechnik* 1/99, Landwirtschaftsverlag Münster - Hilstrup.
- THÜRKOW, D. (2002): GIS- basierte Methoden zur Analyse der Wasserqualitätsentwicklung in Trinkwasserbrunnen am Beispiel des Einzugsgebietes der Saidenbachtalsperre (Erzgebirge). *UFZ-Bericht*, 8/2002. Zugl: Univ. Halle – Wittenberg. Diss. Halle, Leipzig.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980): A closed form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: S: 892 - 898.
- VERECKEN, H., et al. (1989): Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density on carbon content. *Soil Science* 148: S: 389 - 403.
- VOLK, M. (2003): Programmbeschreibung "Baseflow" zur Separation des Basisabflusses aus Gerinneabflussdaten und Rezessionsanalysen. Übersetzung der Programmbeschreibung. Lpz.
- VON WERNER, M. (1995): GIS- orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten. Dissertation. Freie Universität Berlin.
- VON WERNER, M. (2004): Abschätzung des Oberflächenabflusses und der Wasserinfiltration auf landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Hilfe des Modells EROSION 3D. Endbericht. Berlin.
- VON WERNER, M.; SCHRÖDER, A. (2005): Erarbeitung der digitalen Datengrundlage von EROSION-3D auf mesoskaliger Maßstabsebene mit Durchführung einer Erosionssimulation für das zu bearbeitende Gebiet. Abschlussbericht. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden.
- WERNECKE, G. (1983): Beitrag zur Beschreibung von Wasser- und Stoffhaushaltsprozessen in Einzugsgebieten am Beispiel der Trinkwassertalsperren Saidenbach und Neunzehnhain II und den Pflanzennährstoffen Phosphor und Stickstoff. Diss. TU Dresden.
- WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. [HRSG.] (2000): *Terrain Analysis. Principles and Applications*. John Wiley. New York.
- WÖSTEN, J. H. M.; LILLY, A.; NEMES, A.; LE BAS, C. (1998): Using Existing Soil Data to Derive Hydraulic Parameters for Simulation Models in Environmental Studies and Land Use Planning. Final Report on the European Union Funded Project, Sc. DLO. Wageningen.
- ZACHARIAS, S.; WESSOLEK, G. (2007): Excluding organic matter content from pedotransfer predictors of soil water retention. In: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, S. 43 - 50. Madison.

ZIMMERLING, B. (2004): Berechnungsversuche zum Infiltrationsverhalten von Ackerböden nach Umstellung der konventionellen auf konservierende Bodenbearbeitung. Herrenhäuser Forschungsbeiträge zur Bodenkunde, Inst. F. Bodenkunde der Universität Hannover, BD. 15.

ZIMMERLING, B.; SCHMIDT, W. (2002): Beitrag der konservierenden Bodenbearbeitung zum vorbeugenden Hochwasserschutz. In Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft.

#### Software

Arc Map 9.1 (Environmental System Research Institute. Inc 2005).

<http://esri-germany.de>

Arc Catalog 9.1 (Environmental System Research Institute. Inc 2005).

<http://esri-germany.de>

Baseflow Filter (Arnold, J.G., P.M. Allen, R. Muttiah, and G. Bernhardt).

<http://www.brc.tamus.edu/swat/swatbase.html>

DPROC 1.50 (GEOGNOSTICS 2006)

<http://www.bodenerosion.com>

EROSION 3D 3.11 (GEOGNOSTICS 2005).

<http://www.bodenerosion.com>

EROSION 3D 3.14 (GEOGNOSTICS 2006).

<http://www.bodenerosion.com>

Log-linear interpolation of particle size fractions (Zacharias).

[s.zacharias@web.de](mailto:s.zacharias@web.de)

Saga 1.1 (Scilands GbR Göttingen 2005).

[http://www.scilands.de/d\\_index.htm?page=/service/downloads/saga/saga.htm](http://www.scilands.de/d_index.htm?page=/service/downloads/saga/saga.htm)

Surfer 8.03 (Golden Software Inc. 2003).

<http://www.goldensoftware.com>

Tanalis (Schulla 1997).

<http://homepage.hispeed.ch/wasimWaSiM/download.html>

WaSiM-ETH 7.2.7 (Schulla 2006).

<http://homepage.hispeed.ch/wasim/download.html>

WaSiM Helptool Grid.

<http://homepage.hispeed.ch/wasim/download.html>

## 8 Glossar

Basisabfluss	Auch als Grundwasserabfluss bezeichnet, ist vertikal abfließendes Bodenwasser, welches nach einiger Zeit als langsamste Abflusskomponente den Vorfluter erreicht.
Dünnschichtabfluss	Ist der Abfluss von Bodenoberflächen in Form eines dünnen Wasserfilms.
Einzugsgebiet	Auch hydrologisches Einzugsgebiet, ist ein klar abgrenzbares System in der Hydrologie und verwandten Wissenschaften, bei dem oberflächlich abfließendes Wasser aufgrund der Reliefbedingungen einem Punkt, dem EZG-Auslass zufließt. Kann über das Relief abgeleitet werden.
Ganglinienseparation	Ist ein Verfahren der Hydrologie, bei dem von einer gemessenen Abflusskurve die einzelnen Abflusskomponenten abgetrennt werden.
Kalibrierung	Anpassung eines Modells an die gemessenen Abflussdaten.
Kinematische Welle	1. Näherung der Bewegungsgleichung, wonach der Abfluss $Q$ eine Funktion der Wasserspiegelhöhe ist.
Matrixpotential	Auch Saugspannung genannt, bezeichnet die Summe aller von der Bodenmatrix ausgeübten Einwirkungen auf das Wasser. Je weniger Wasser ein Boden hat, umso stärker wird das verbleibende Wasser durch die Matrix fixiert, desto größer ist das Matrixpotential.
Makroporen	Poren $>50 \mu\text{m}$ , die vornehmlich durch biogene Aktivität entstehen. Es handelt sich um Wurzelröhren und Regenwurmgänge, die bei terrestrischen Böden wasserfrei sind und beim Auftreten von Oberflächenabfluss von Wasserüberstau auf der Bodenoberfläche in größere Tiefen abführen können.
Oberflächenabfluss	Niederschlagswasser, das nicht in den Boden infiltrieren kann und auf der Bodenoberfläche abfließt.
Pedotransferfunktion	Mathematische Funktionen, die den Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Wasserspannung eines Bodens über die Körnung, Lagerungsdichte und z. T. organische Substanz ableiten.
Retention	Rückhalt von Wasser im Boden, Wasserspeichervermögen oder Rückhalt von Abflusswasser auf der Bodenoberfläche durch Entstehung eines Filmspeichers.

Schichtdiskretisierung	Unterteilung eines Bodenprofils in mehrere Schichten/Horizonte mit unterschiedlichen bodenphysikalischen Parametern.
Skinfaktor	Auch als Korrekturfaktor bezeichnet, korrigiert die berechnete Infiltrationsrate in Abhängigkeit der Bodenart, des Bodenzustands, der Bodennutzung und der Bodenbearbeitung.
Splash	Bezeichnet den Aufprall des Regentropfens und die Ablösung von Bodenpartikeln durch die freigesetzte Energie.
Translation	Übergabe von Wasser von einer Zelle auf die nächste, wird im Modell als Kaskadenspeicher simuliert.
Validierung	Prüfung der Modellgenauigkeit/Modellgüte mit Hilfe von Referenzwerten; in der hydrologischen Modellierung werden in der Regel gemessene Abflussdaten als Referenzwerte verwendet.
Verschlämmung	Ist der Prozess, bei dem durch Splash (s. o.) Bodenpartikel aus dem Bodenverband gelöst werden, sich einlagern und die Bodenporen verstopfen. Die Verschlammungsschichten sind wenige Millimeter stark und führen durch stark verringerte gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten zu erhöhtem Oberflächenabfluss. Die Ausbildung solcher Schichten ist abhängig von der Bodenart, der Bodenbedeckung und der Niederschlagsintensität.
Zwischenabfluss	Auch als Zwischenschichtenabfluss bezeichnet, ist Bodenwasser, was sich parallel zur Bodenoberfläche hangabwärts Richtung Vorfluter bewegt. Ist in der Regel langsamer als oberflächlich abfließendes Wasser und schneller als Basisabfluss.

## **9 Anhang**

### **9.1 Handlungsempfehlung für den sachgerechten Umgang mit EROSION 3D**

Dieses Material soll als Gebrauchsanleitung verstanden werden, die den operationalisierten Umgang mit EROSION 3D erleichtern soll. Dabei geht es in erster Linie um die Datenaufbereitung, da diese den größten Zeitaufwand bei der Modellierung einnimmt.

Daran anschließend folgt die Erstellung von Parameterdatensätzen im Datenbankprozessor, ein Werkzeug zur effizienteren Erzeugung von Eingangsdaten bei unterschiedlichen Feldzuständen. Die eigentliche Modellierung wird nur zur Festlegung einiger Grundeinstellungen angesprochen.

#### **9.1.1 Datenzusammenstellung und Aufbereitung**

Bei den Modelleingangsdaten handelt es sich um Niederschlagsdaten, Reliefdaten, Boden- und Landnutzungsinformationen.

##### **9.1.1.1 Einzugsgebietsgrenze**

Bei der Berechnung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag auf Einzugsgebietsebene sollten im Voraus die Grenze des EZG bekannt und als \*.shp-Dateien vorliegen. Diese dient als Systemgrenze für den Zuschnitt der Flächeninformation.

Die Grenzen der offiziellen EZG liegen beim LfULG vor, sollten aber unbedingt auf deren Plausibilität geprüft werden, da besonders in großen Maßstabsebenen Fehler auftreten können.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der eigenständigen Ableitung von Einzugsgebieten mit geeigneten GIS-Werkzeugen. ArcGIS 9.x verfügt im Spatial Analyst über ein solches Tool, ArcView kann mit gängigen Erweiterungen (z. B. GeoHMS) ähnliche Routinen durchführen. Dafür sind lediglich ein ausreichend genaues DGM und die Koordinaten des Pegels bzw. eines virtuellen Auslasspunktes notwendig.

##### **9.1.1.2 Niederschlagsdaten**

Die offiziellen Niederschlagsinformationen (DWD, LTV, LfULG) liegen in unterschiedlichen Auflösungen vor. Das Modell benötigt zur effizienten Erosionssimulation Auflösungen von mindestens 10 min Zeitschrittlänge, um die Spitzenintensitäten (äußerst sensibler Parameter) richtig ableiten zu können (SCHMIDT 1996). Für NA-Simulationen ist die zeitliche Auflösung, Untersuchungen zur Folge, weniger sensitiv. Sie sollte jedoch Werte > 30 min nicht überschreiten.

Die Niederschlagsdaten müssen folgenden Aufbau haben:

**Tabelle A 1: Aufbau der Niederschlagsdaten**

Y,M,D,H,M,0	}	Tabellenkopf
Y,M,D,H,M,0		
Y,M,D,H,M,0		
Y,M,D,H,M,0		
Y,M,D,H,M,Forchheim		
2004,07,18,12,45,0.01	}	1. Zeitschritt

Es handelt sich um \*.csv Dateien, die mit handelsüblichen Tabellenkalkulationsprogrammen, wie z. B. **Surfer** oder **MS Excel**, erzeugt werden können.

Im Modell selbst besteht die Möglichkeit, interpolierte Niederschläge zu nutzen. In der Niederschlagsdatei müssen die synchronen Werte nebeneinander stehen und im Tabellenkopf eine numerische Bezeichnung (ID) besitzen. Für das zu simulierende Gebiet muss eine Rasterdatei erstellt werden, in der die vergebenen ID's die räumliche Ausdehnung repräsentieren, für welche diese Niederschlagsstation gültig ist. In der Regel handelt es sich hierbei um eine Thiessen-Polygonierung, da andere Interpolationsverfahren (IDW, SPLINE) einen deutlich höheren Arbeitsaufwand bei der Erstellung der Niederschlags- und Rasterdatei mit sich bringen.

### 9.1.1.3 Reliefdaten

Zur Bodenabtrags- und Abflussmodellierung benötigt das Modell relativ genaue Reliefdaten. Das offizielle DGM 25 (LVA) kann diesen Anspruch, auch nach dessen Überarbeitung (KÖTHE et al. 2005), nur zum Teil erfüllen. Für das Arbeiten in größeren Gebieten und für gebietsbezogene Aussagen ist die Auflösung hinreichend detailliert.

Stehen genaue Abtrags- und Depositionsprognosen mit exaktem Raumbezug in großen Maßstäben (< 1:25.000) im Vordergrund (z. B. bei Schadanalysen), sollte auf deutlich genauere DGM's oder eigene Reliefaufnahmen zurückgegriffen werden.

Das DGM muss vorher auf seine Plausibilität hin geprüft werden, z. B. auf Stufen, die von Kartenblatträndern herrühren o. ä. Besondere Aufmerksamkeit gilt der modellseitigen oder im GIS berechneten Fließgewässerverteilung. Weicht diese von der Verteilung in den Kartenwerken (DLM 25 u. a.) ab, sollten die Höheninformationen so modifiziert werden, dass beide nahezu diskret sind. Sollte dies nicht der Fall sein, können im Postprocessing Fehler bei der Interpretation der Ergebnisse entstehen, z. B. punktuelle Eintragspfade falsch verortet werden. Die Reliefinformation sollte, wenn dies nicht schon der Fall ist, im GIS gerastert werden und in ein \*.asc-Format exportiert werden.

Bei der Ableitung von Rasterdaten aus der Software SAGA (SCILANDS) müssen die Header-Informationen den ArcView-Vorgaben angepasst werden, um im Modell verwendet werden zu können.

Bei Nachbereitung des DGM in Bezug auf die Gewässernetzverteilung eignet sich die Routine „Stream Burn“ aus EROSION 3D im Relief Preprocessing. Dabei wird das aus Kartenmaterial abgeleitete Gewässernetz in das Geländemodell eingebrannt. Eine unrealistische Einbrenntiefe sollte nicht überschritten werden, da sie die Neigung der direkt an das Gewässernetz reichenden Rasterzellen künstlich verstärkt (mit der Folge eines erhöhten Oberflächenabflusses und erhöhter Erosion).

#### **9.1.1.4 Bodendaten**

Die physikalisch basierte Erosions- und Abflussmodellierung erfordert eine relativ genaue Kenntnis der physikalischen Bodeneigenschaften vor Ort. Die Abschätzung der wichtigen Kenngrößen der Bodenwasserdynamik, den VAN GENUCHTEN-Parametern, verlangt zumindest die Kenntnis der Trockenrohdichte, der Bodenart und gegebenenfalls des Gehalts an organischem Kohlenstoff. Diese Information liegt in Sachsen in unterschiedlicher Qualität und räumlicher Ausdehnung vor. Bei Nichtvorhandensein einer detaillierten Datenbasis oder nicht kartierten Bereichen kann die nächsthöhere Ebene (geringerer Detailgrad) benutzt werden.

##### **9.1.1.4.1 Bodenübersichtskarte (BÜK 200)**

Die räumlich gröbste Auflösung mit einem Maßstab von 1:200.000 besitzt die BÜK 200, die flächendeckend für Sachsen vorliegt. Diese Bodeninformation setzt sich zusammen aus einer Sachsen abdeckenden \*.shp-Datei, und einer zugehörigen Datenbank (fldat200) im \*.dbf-Format. Jedem Polygon ist ein sog. Leitprofil hinterlegt.

Bei der Erstellung einer Rasterdatei im Datenbankprozessor **DPROC** (GEOGNOSTICS 2006) müssen die Verknüpfungsfelder zwischen Rauminformation (PRONUM\_LFU) und Tabellenattributen (PRONUM1) bekannt sein.

##### **9.1.1.4.2 Konzeptbodenkarte (BKkonz 50)**

Die BK<sub>konz</sub> (LfULG) liegt in sachsenweiter Ausbreitung vor. Im Maßstab 1:25.000 bietet diese Bodenkarte eine relativ hohe Genauigkeit der räumlichen Verbreitung von Böden.

Dieses Kartenmaterial wurde abgeleitet aus den Mittelmaßstäblichen Landwirtschaftlichen Standortkarten MMK (M1:25.000) und der Forstlichen Standortkarte FSK (M 1:10.000). Aufgrund der unterschiedlichen Zielstellung beider Kartenwerke ist eine Datenkontinuität nur teilweise gegeben. Die jeweiligen Kartenblätter orientieren sich in den Blattsnitten der TK 25 und sind als \*.e00-Format auf der Internetseite des LfULG zu beziehen. In ArcView können diese Datensätze mit dem Werkzeug **Import 71** in \*.shp-Dateien umgewandelt werden.

Die notwendige Datenbank im \*.dbf-Format **MemaS** liegt im LfULG vor und kann von dort angefordert werden. Das Verknüpfungsfeld ist in beiden Fällen AGGNR.

#### **9.1.1.4.3 Reichsbodenschätzung (RBS 10)**

Die Reichsbodenschätzung (LfULG) stellt die genaueste Datengrundlage dar. Sie ist aber nur für wenige Gebiete Sachsens digital vorhanden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, analoge Bodenkarten zu digitalisieren. Dieses Vorgehen ist jedoch sehr arbeits- und zeitaufwändig und nur bei kleinen Gebieten und großen Maßstäben zu empfehlen.

#### **9.1.1.5 Landnutzungsdaten**

Die Landnutzungsdaten stellen neben den Bodendaten die wichtigste Eingangsinformation dar. Nur mit der genauen Kenntnis über die lokalen Bedingungen bezüglich Kulturart und Bearbeitung lässt sich die Datenbasis aus dem Parameterkatalog effektiv zur Simulation realer Feldzustände erschließen. Je genauer die räumliche Auflösung und der Detailgrad der Information werden, umso geringer werden die Einschränkungen bezüglich der Aussagekraft der simulierten Ergebnisse. Allerdings können Worst-Case-Szenarien auch mit einem Minimum an Landnutzungsinformation gewährleistet werden.

##### **9.1.1.5.1 ATKIS DLM**

Das Digitale Landschaftsmodell ATKIS DLM (LVA) im Maßstab 1:25.000 bietet räumliche Landnutzungsinformationen in einem niedrigen Detailgrad mit jedoch hoher Verfügbarkeit. Es stellt sachsenweit flächendeckend die Objektkategorien Siedlung, Verkehr, Vegetation, Gewässer zur Verfügung. Die landwirtschaftlich genutzten Flächen werden lediglich in die Kategorien Grünland und Ackerland unterteilt.

##### **9.1.1.5.2 Feldblöcke**

Die digitalen Feldblöcke des InVeKoS (LfULG) bilden eine sachsenweite Datengrundlage der landwirtschaftlich genutzten Flächen. Bei einem Feldblock handelt es sich um eine räumliche Nutzungseinheit, die durch zeitlich relativ statische Nutzungseinheiten (Wege, Gewässer, Siedlung etc.) abgegrenzt ist. Auf den Acker- und Grünlandfeldblöcken werden die Anteile der jährlich angebauten Kulturen von den Außenstellen des LfULG erfasst. Diese Information kann als Datenbank vom LfULG angefordert werden. Eine Verortung der einzelnen Fruchtarten auf dem Feldblock ist nicht möglich.

Bei dem Verknüpfungsfeld zwischen Rauminformation und Tabellenattributen handelt es sich um „FLIK“.

##### **9.1.1.5.3 Schlagdaten**

Offizielle digitale Schlagdaten sind in Sachsen nicht vorhanden.

Um eine genaue Verortung der angebauten Kulturen im Gelände zu ermöglichen, müssen diese Daten selbst erhoben werden. Das erfolgt wahlweise über die Vermessung der Schläge mit GPS und



eine Befragung der Landwirte. Dieses Vorgehen ist aufgrund des hohen Zeit- und Arbeitsaufwandes nur bei kleinen Gebieten und großen Maßstäben ratsam. Unter Umständen existieren bereits digitale Schlaginformationen aus vorangegangenen Untersuchungen, die für das Vorhaben verwendet werden können.

#### **9.1.1.5.4 Abflussdaten**

Die bei der LTV verfügbaren Abflussdaten liegen in der Regel in 15-minütiger Auflösung vor. Die Wasserstands-Durchflussbeziehung (WQ-Beziehung) wurde von der LTV erstellt und mit dem Datensatz übergeben. Im Hydrologischen Handbuch sind die verfügbaren Pegeldata aufgelistet. Bei anderen Messnetzen bzw. Messstellen müssen die WQ-Beziehungen gegebenenfalls selbst erstellt werden, was mit großen Unsicherheiten einhergehen kann.

#### **9.1.2 Erstellen von Eingangsparameterdateien mit dem Datenbankprozessor (DPROC)**

Mit der Software DPROC können relativ schnell und unkompliziert Bodendatensets erstellt werden. Im Folgenden werden die pull-down-Menüs erläutert, die dem Benutzer der Software zur Verfügung stehen.

##### Datei

In diesem Menü werden die Grundeinstellungen vorgenommen und das Projektverzeichnis festgelegt.

Über die Projekteigenschaften kann die räumliche Ausdehnung und die Rasterzellenweite der zu erstellenden Rasterdaten definiert werden. Das geschieht entweder über Einladen eines vorhandenen DGM des Gebietes oder manuell. Zusätzlich muss im Menü „Datum“ der Monat des jeweiligen Szenarios festgelegt werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die Parametrisierung von Feldzuständen in den Herbst- und Wintermonaten nur über das Vorhandensein von Landnutzungsinformationen für das kommende Jahr zu gewährleisten sind. Es gilt das jeweilige Erntejahr.

Im Menü „Verzeichnisse“ kann eine Ordnerstruktur zur übersichtlicheren Datenhaltung der erzeugten Daten festgelegt werden.

##### Landnutzung

Die zweite Registerkarte beinhaltet die Routinen zur Ableitung der Raster- und Tabellendateien mit Landnutzungsinformationen. Die Datengrundlagen können separat erstellt werden.

Die erste Möglichkeit bietet das Verarbeiten des ATKIS DLM. Im dazugehörigen Menü können sowohl Flächen als auch Linien gerastert werden. Das numerische Verknüpfungsfeld ist OBJ\_ID. Weiterhin können eventuelle Lücken im Datensatz durch globale Annahmen ersetzt werden. Im Menü Übersetzung können die Aggregationen der verwendbaren Landnutzungsinformation nachvollzogen werden.

Es ist darauf zu achten, dass nicht verwendbare Informationen wie z. B. Landesgrenzen über die Filterfunktion nicht weiterverarbeitet werden. Entsprechende Filterdateien befinden sich im Programmordner der Software.

Mit den weiteren Landnutzungsinformationen wird in ähnlicher Weise verfahren. Es müssen die Felder mit den Informationen zur FLIK (**FL**ächen**I**dentifizierungs**K**ode) und der Gesamtfläche des Polygons festgelegt werden. Im Menü Sachdaten werden den Feldblöcken die Tabelleninformationen zugeordnet. Das geschieht über das Feld „FLIK“. Um die Nutzung auf dem jeweiligen Feldblock abzuleiten, muss darüber hinaus das Feld mit dem Flächenanteil und dem Nutzungscode, der für diesen Flächenanteil gilt, festgelegt werden.

Um eine dominierende Landnutzung für den jeweiligen Feldblock abzuleiten, muss die Festlegung „größter Anteil“ oder „größte Empfindlichkeit“ getroffen werden.

Etwasige Fehlermeldungen über die Nichtvergabe von Attributen in bestimmte Zeilen sind auf fehlende Datenquellen für diese Fruchtarten in den jeweiligen Monaten zurückzuführen. Hierbei ist es hilfreich, im Menü „Übersetzung“ bestimmte Fruchtarten durch andere Feldzustände (z. B. Stoppeln, Brache) zu ersetzen und diese für weitere Verwendungen abzuspeichern. Sollten sich keine Übersetzungsdateien aufgrund von Softwarefehlern erstellen lassen, müssen die Attribute direkt im GIS angepasst werden.

Mit der Schlaginformation verfährt man analog. Handelt es sich um selbst erstellte Schlagdaten, müssen alphanumerische Kulturartenbezeichnungen im Voraus in numerische NutzungsCodes übersetzt werden. Geeignete Übersetzungen bilden die Filterdateien im Programmordner der Software.

Der letzte Schritt in diesem Hauptmenü ist die Überlagerung der Landnutzungsraaster. Hierbei ist darauf zu achten, dass die am höchsten aufgelöste Information sich in der Hierarchie über der geringer aufgelösten befindet. An oberster Stelle stehen die ATKIS Linienobjekte, gefolgt von Schlaginformation, InVeKoS-Feldblöcken und ATKIS Polygonobjekten.

### Boden

Die Vorgehensweise bei der Verarbeitung der Bodeninformation ist ähnlich. In der Ein-Schicht-Infiltrationsvariante ist es ausreichend, über das Menü „Geometrie“ die einzelnen Bodeninformationen als \*.shp-Datei einzuladen und festzulegen, in welchem Feld die Bodenart angegeben wird.

Wenn Datensätze für das Mehr-Schicht-Infiltrationsmodell erzeugt werden sollen, müssen im Untermenü „FIS Boden“ einige Festlegungen getroffen werden.

Über „Geometrie“ werden wieder die Raumdaten geladen und festgelegt, welches Feld die Rauminformation und die Datenbank verknüpft. Im Menü „Sachdaten“ ist die Datenbank, das Verknüp-

fungsfeld und die Tiefe der untersten Schicht anzugeben. Weiterhin müssen die Felder für die jeweiligen Bodeninformationen benannt werden.

Das Überlagern der Bodeninformationen erfolgt in gleicher Weise wie bei der Landnutzung.

#### db- Abfrage

Das Menü „db- Abfrage“ (Datenbankabfrage) dient zur eigentlichen Erzeugung von modelllesbaren Eingangparameter-Datensätzen. Es können sowohl Raster-Dateien für die Ein-Schicht-Version als auch Raster und Tabellen für die Mehr-Schicht-Version erstellt werden.

Im ersten Untermenü muss die vorab generierte Landnutzungs-Rasterdatei geladen und ein Nicht-Datenwert angegeben werden.

Das zweite Menü dient der Verarbeitung der Boden-Rasterdatei. Es muss angegeben werden, ob ein- oder mehrschichtige Datensätze verarbeitet werden sollen. Darüber hinaus gilt es, die Vorgaben zu treffen, ab welcher Schicht die abzuleitenden Parameterwerte aus den Bodeninformationen zu entnehmen sind. Die Voreinstellung „1“ bezeichnet den zweiten numerischen Horizont. Die Informationen des ersten Horizontes werden bei dieser Einstellung aus den Daten des Parameterkataloges Sachsen abgeleitet.

Im Untermenü Bearbeitung kann eine vorher generierte Rasterdatei geladen bzw. globale Angaben verwendet werden. Mit den übrigen Menüs wird analog verfahren. Sind alle Einstellungen getroffen, ist das Feld „starten“ aktiv und es können Datensätze in den Projektordner abgelegt werden.

### **9.1.3 Simulation mit EROSION 3D**

Es soll an dieser Stelle lediglich beschrieben werden, welche Voreinstellungen im Modell zu treffen sind, um mit der Mehr-Schicht-Version NA-Ereignisse zu simulieren.

#### Abflussmodell

Um Ereignisse mit der Abflussverzögerung zu simulieren, muss das Abflussmodell aktiviert werden. Als sinnvolle zeitliche Auflösung der Modellrechnung empfiehlt sich die Auflösung der Niederschlags- oder Abflussdaten. Um eine Tabelle mit zeitschrittbezogenen Gebietsreaktionen zu erhalten, muss in den Simulations-Optionen das Feld Output mit der Quelle für den Auslasspunkt festgelegt werden.

#### Infiltrationsmodell

Eine Mehr-Schicht-Infiltration wird nur mit Aktivierung des Infiltrationsmodells durchgeführt. Die Voreinstellungen können beibehalten werden, da sie keinen nennenswerten Einfluss auf die Modellrechnung haben.

#### Auswertung der Ergebnisdateien

Die Abflussganglinie ist in einer Datei namens pp\_data.csv abgelegt. Das Feld ch\_runoff gibt dabei die kumulierte Abflussmenge für den jeweiligen Zeitschritt wieder. Um die tatsächliche Menge im Zeitschritt in  $\text{m}^3/\text{s}$  zu erhalten, muss diese mit der des vorherigen subtrahiert, durch die zeitliche Auflösung (s) dividiert und mit der Rasterzellenbreite (m) multipliziert werden. Die angegebenen Informationen für Sedimentaustrag u. a. sind kritisch zu betrachten, da aufgrund der unzureichenden kinematischen Beschreibung des Gerinneabflusses die Transport-, Umlagerungs-, und Sedimentationsprozesse nicht ausreichend erfasst werden.

Die Rasterdatensätze lassen sich in ArcView darstellen. Für eine angemessene Darstellung müssen diese im Voraus reklassifiziert werden.

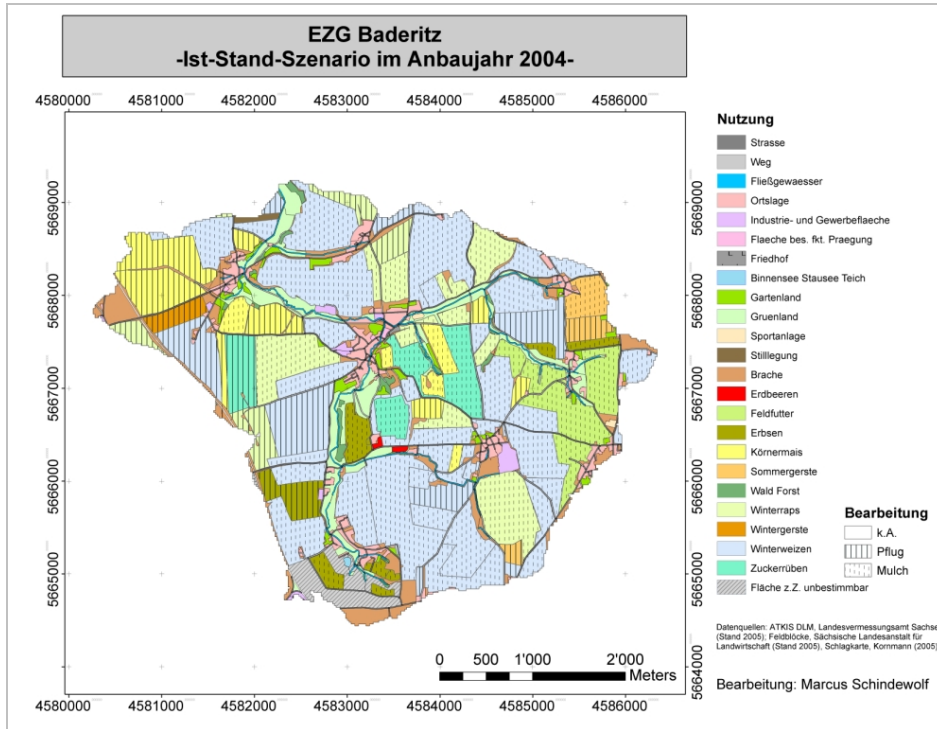


Abbildung A 1: Ist-Stand-Nutzung und Bearbeitung im EZG Baderitz – 2004

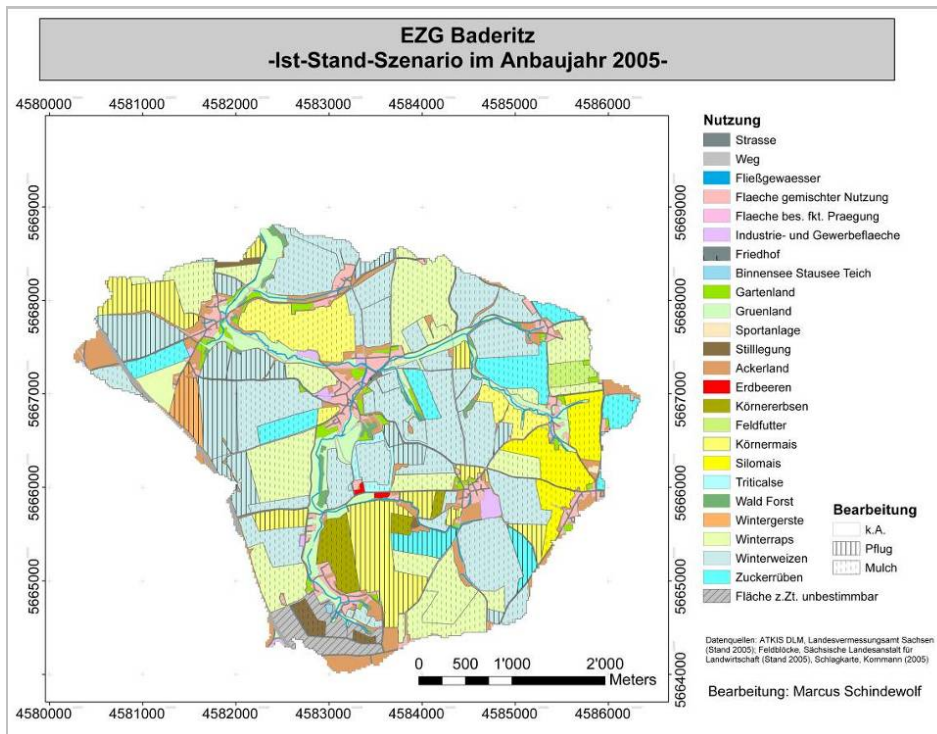


Abbildung A 2: Ist-Stand-Nutzung und Bearbeitung im EZG Baderitz - 2005

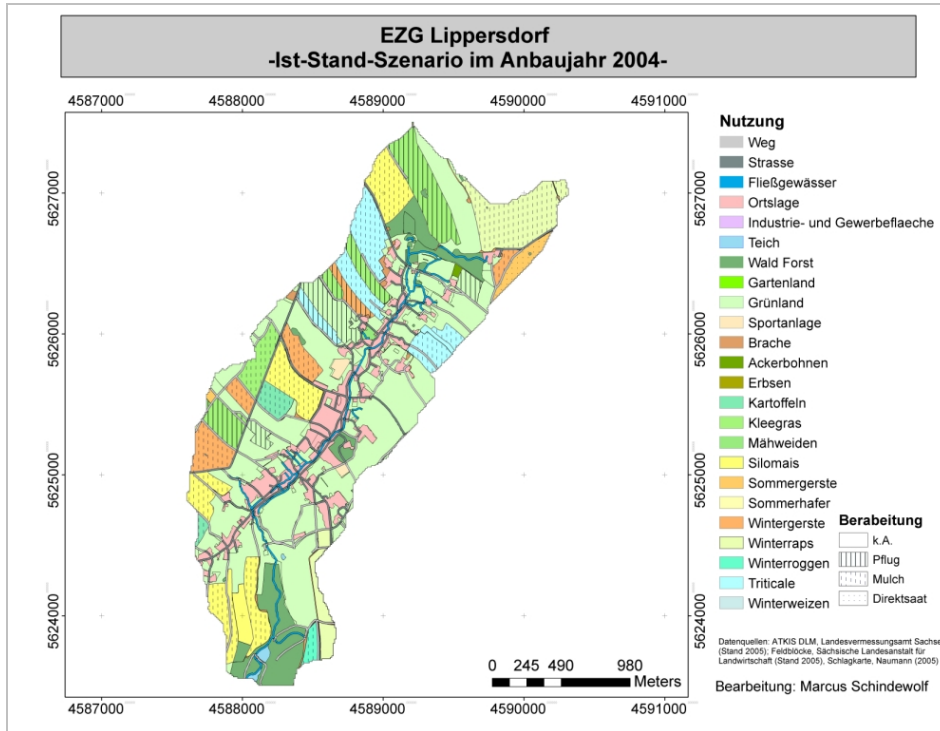


Abbildung A 3: Ist-Stand-Nutzung und Bearbeitung im EZG Lippersdorfer Bach 2004

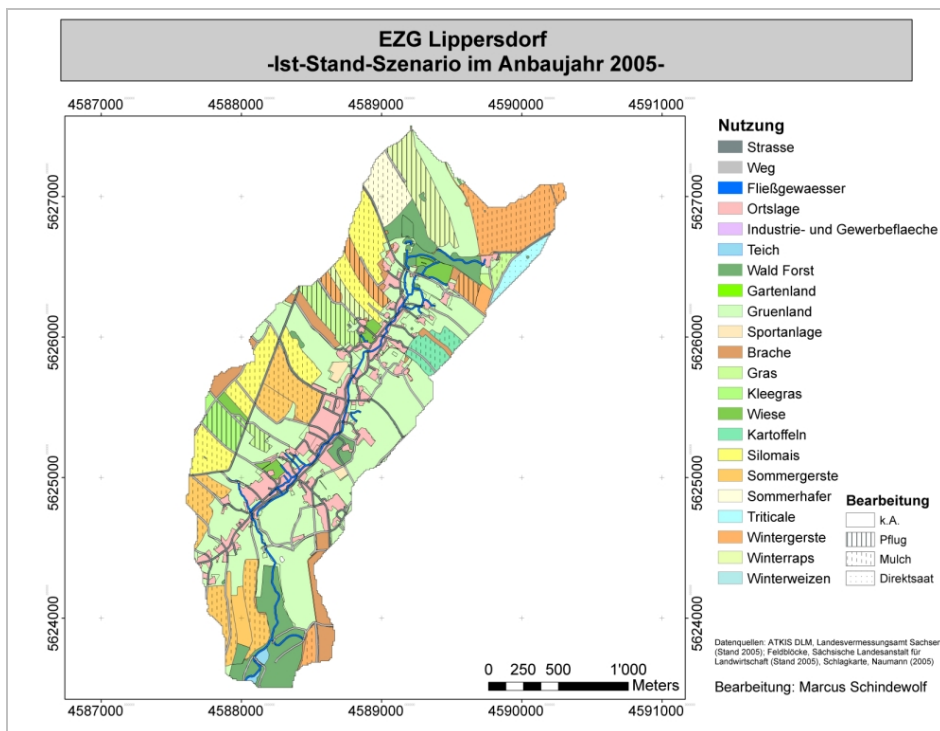
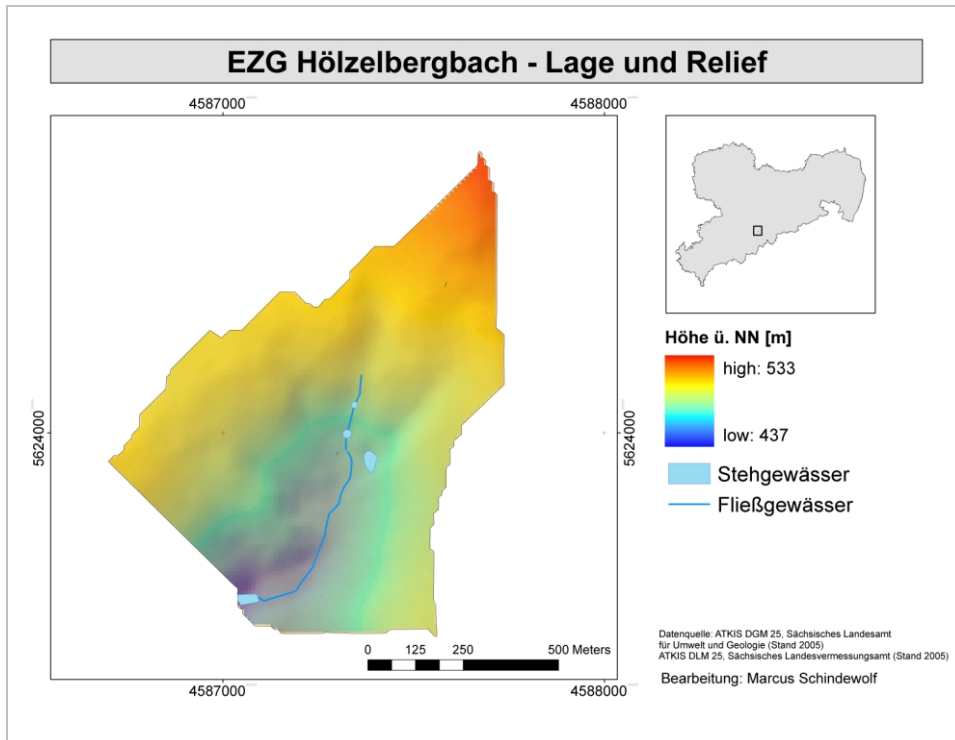
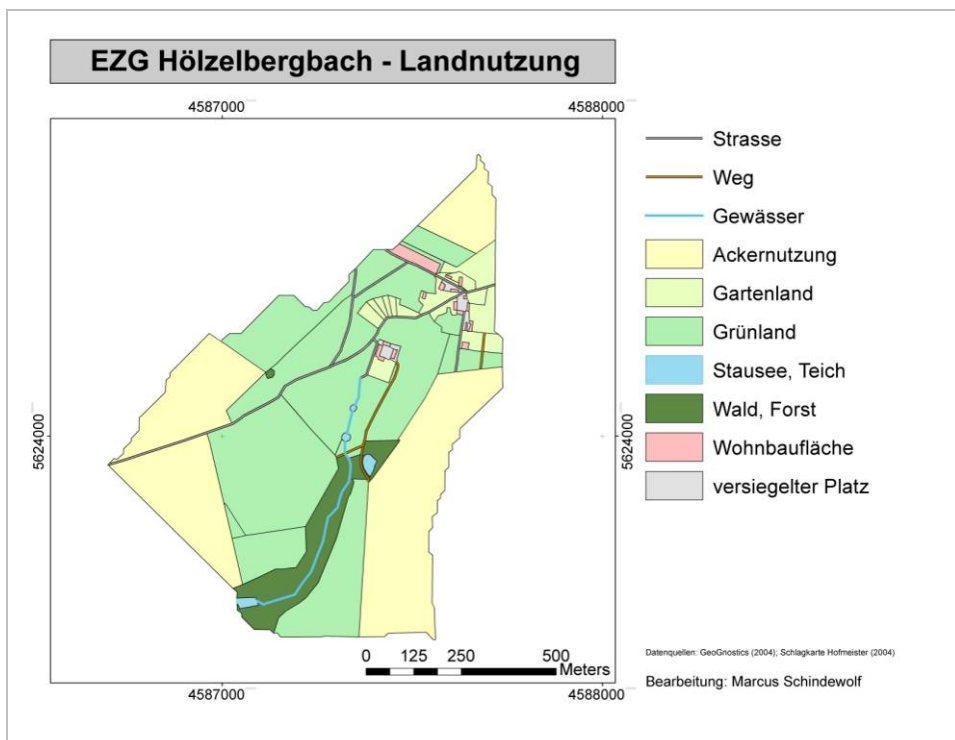


Abbildung A 4: Ist-Stand-Nutzung und Bearbeitung im EZG Lippersdorfer Bach 2005



**Abbildung A 5: EZG Hölzelbergbach, Lage und Relief**



**Abbildung A 6: Landnutzung im Hölzelbergbach-EZG**

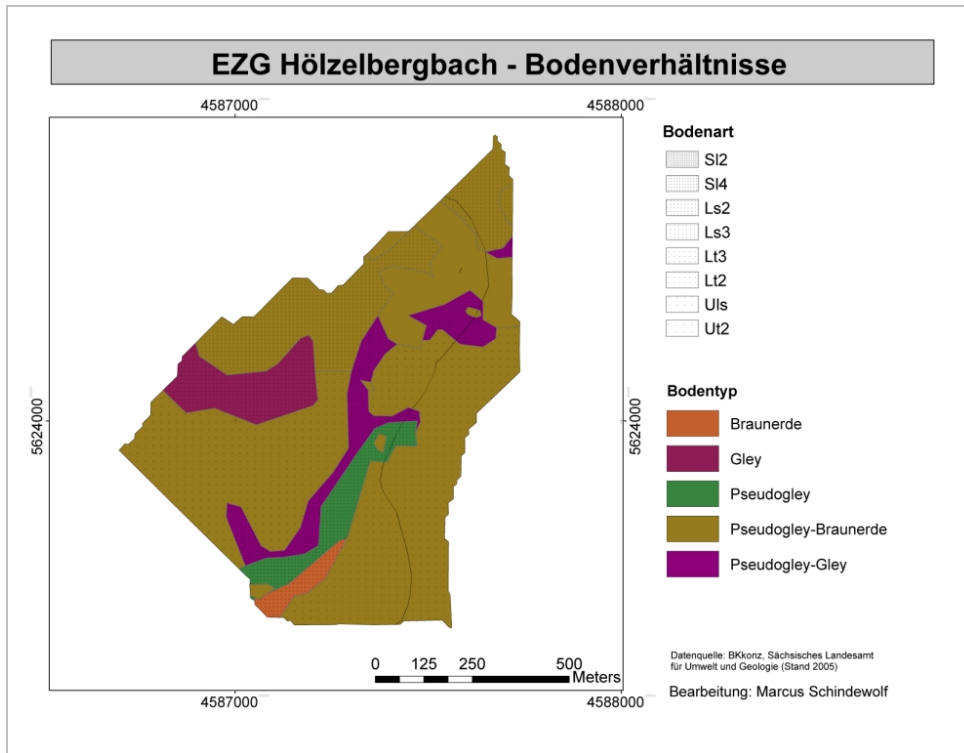


Abbildung A 7: Bodentypen und Bodenarten im EZG Hölzelbergbach

Tabelle A 2: Sensitivitäten Schicht 3 (EROSION 3D - Ver. 3.11)

Parameter	Dichte 1100 - 1800 [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte 1400 - 1750 [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte 1650 - 1800 [kg/m <sup>3</sup> ]	C <sub>org</sub> 0,5 - 4 [%]	Feuchte 17 - 42 [Vol.%]	Mächtigkeit 0,05 - 0,5 [m]
Eindringtiefe Be- feuchtungsfront	0,98	0,63	-1,17	0,04	-2,29	0,06
Summe der Infil- trationsraten	-1,02	-1,86		0,00	-1,26	0,00
Passierzeit		-7,36		0,09	0,004	-0,18
Summe der Infil- trationsraten (param. Schicht)		-8,37		0,09	0,004	-0,19



Tabelle A 3 Sensitivitäten Schicht 3 (EROSION 3D - Ver. 3.14)

Parameter	Dichte 1100 - 1750 [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte 1100 - 1500 [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte 1600 - 1650 [kg/m <sup>3</sup> ]	C <sub>org</sub> 0,5 - 4 [%]	Feuchte 17 - 42 [Vol. %]	Mächtigkeit 0,05 - 0,5 [m]
Eindringtiefe Be- feuchtungsfront	-1,46	1,22		0,06	0,03	-0,02
Summe der Infil- trationsraten	-1,28			0,002	-1,5	0,00
Passierzeit	-1,47		9,7	-0,51	-2,78	1,01
Summe der Infil- trationsraten (param. Schicht)	-3,5			-0,5	-2,8	1,00

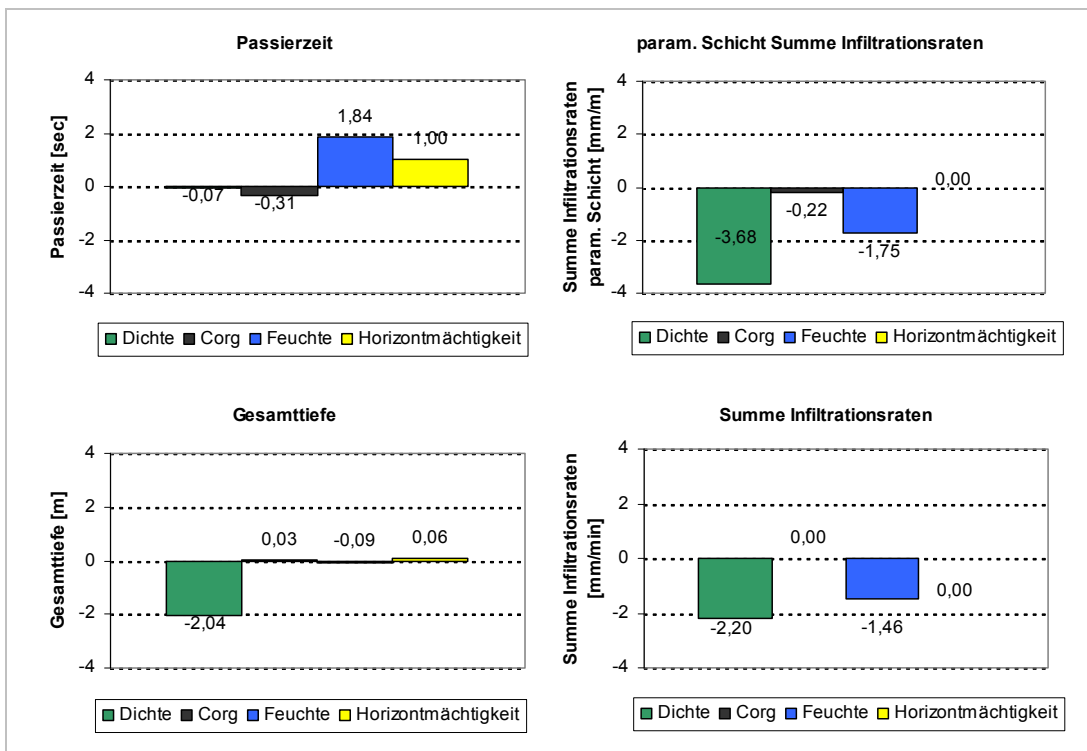


Abbildung A 8: Modellsensitivitäten der EROSION 3D - Ver. 3.11 im zweiten Horizont

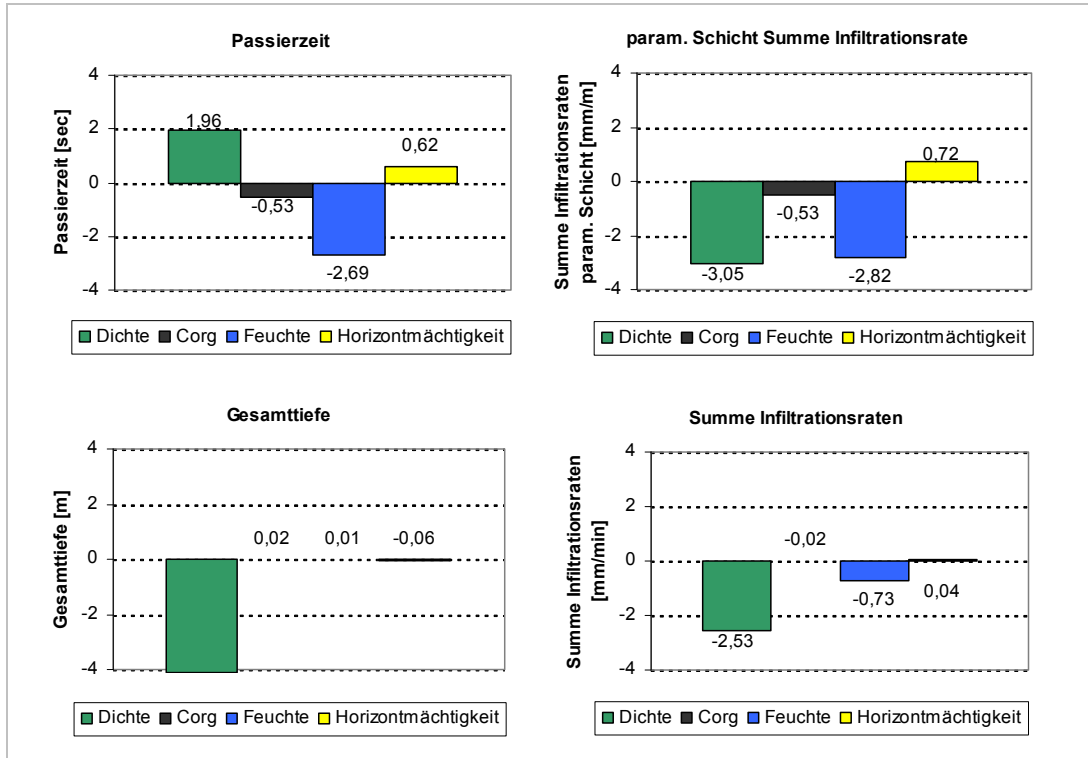


Abbildung A 9: Modellsensitivitäten der E3D - Ver. 3.14 im zweiten Horizont

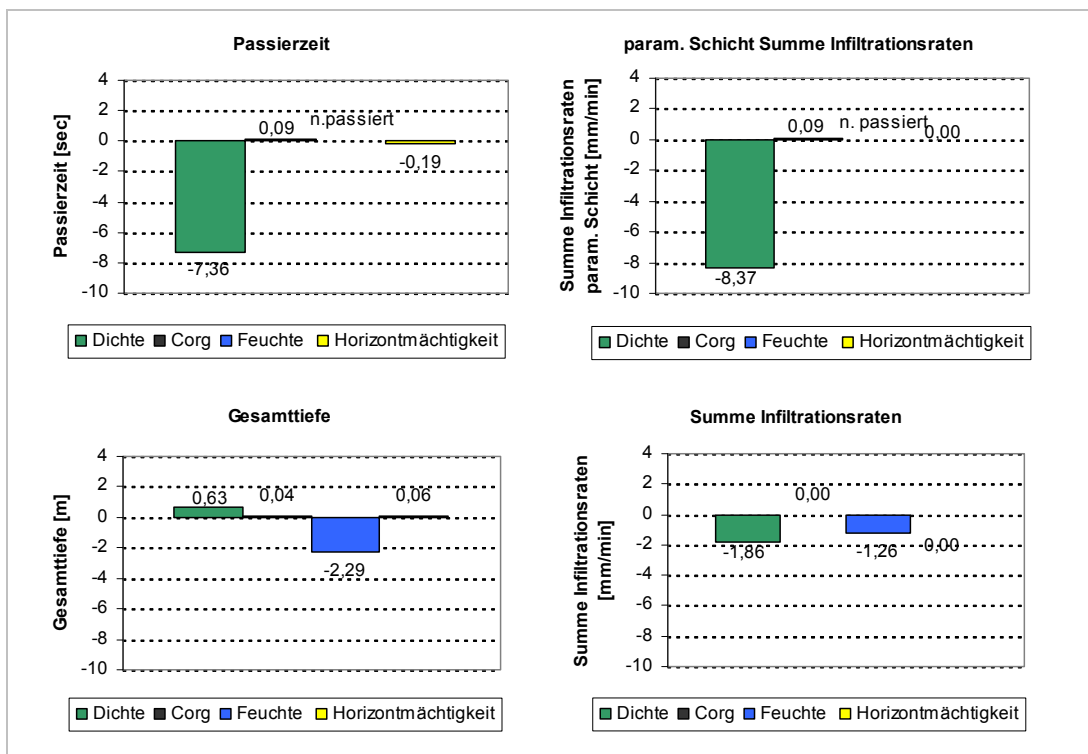


Abbildung A 10: Modellsensitivitäten der EROSION 3D - Ver. 3.11 im dritten Horizont

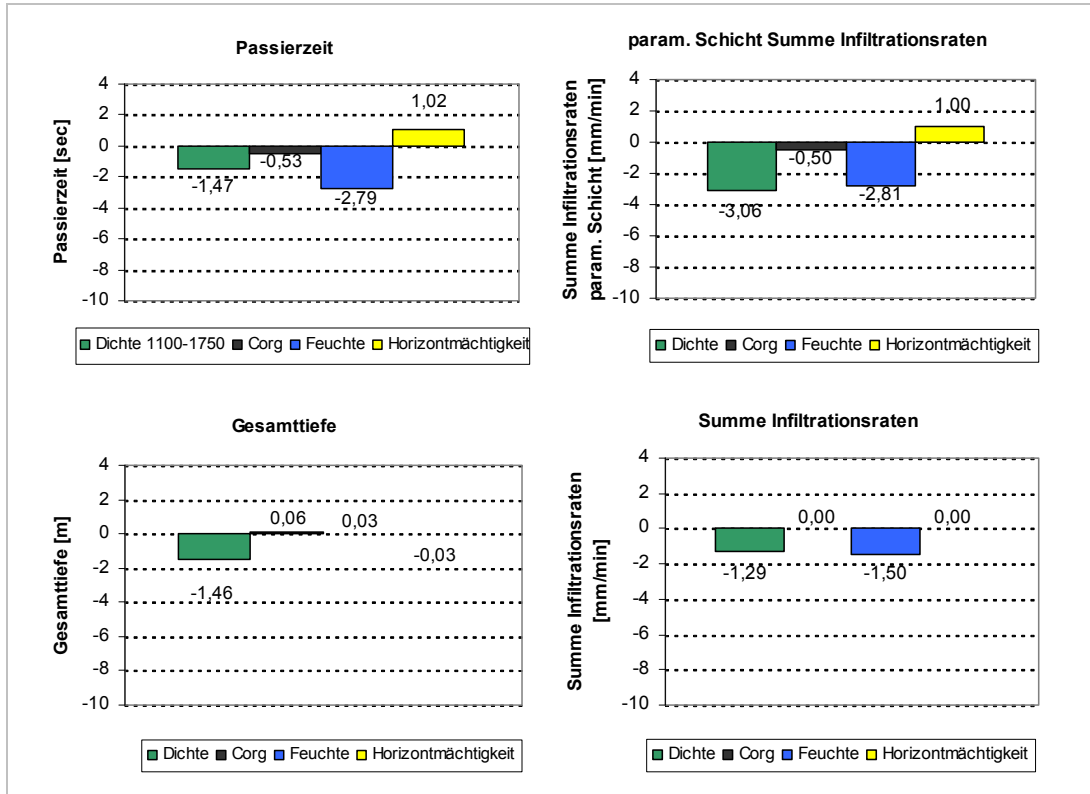


Abbildung A 11: Modellsensitivitäten der EROSION 3D - Ver. 3.14 im dritten Horizont

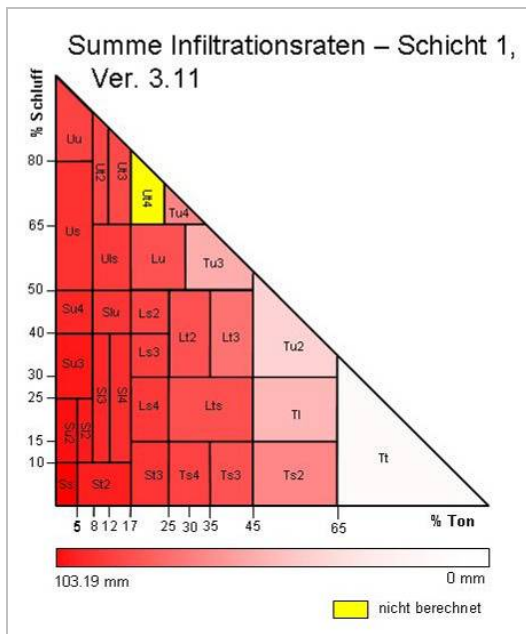
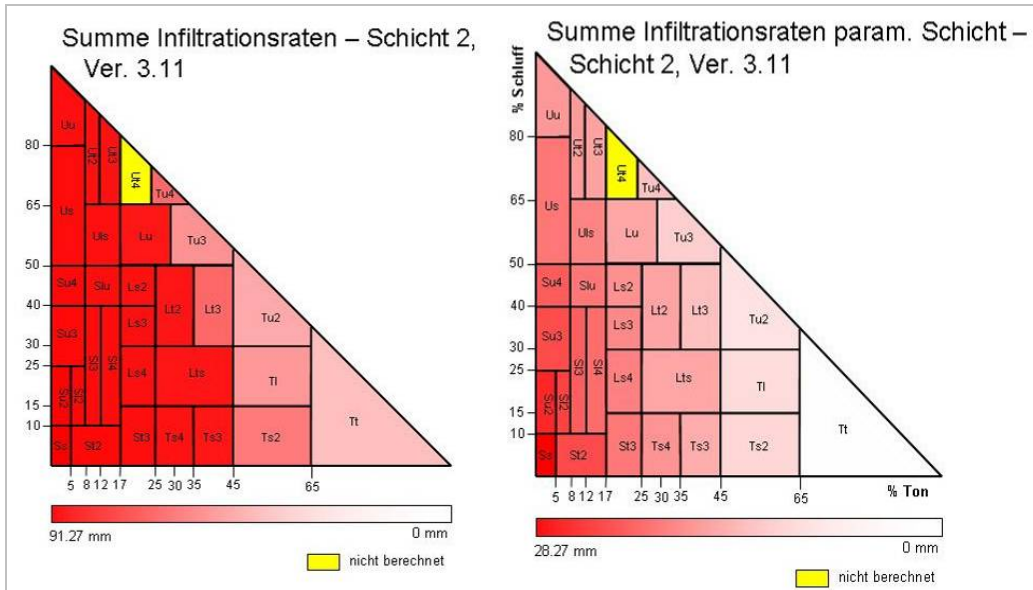
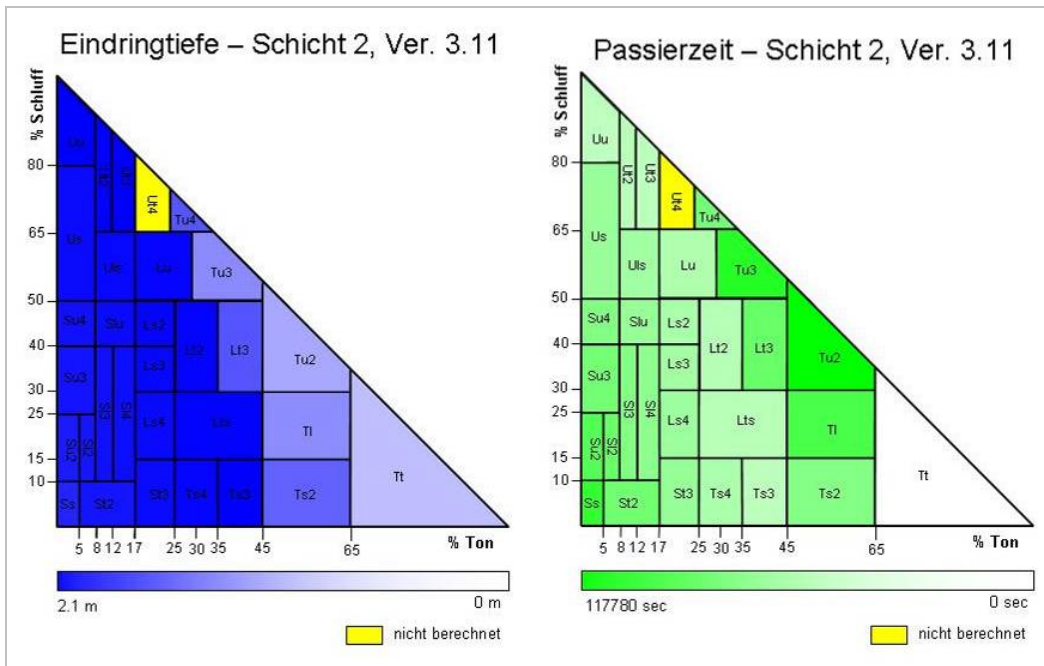


Abbildung A 12: Abhängigkeit der Summe der Infiltrationsraten von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.11)



**Abbildung A 13: Abhängigkeit der Summe der Infiltrationsraten von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.11)**



**Abbildung A 14: Abhängigkeit der Gesamteindringtiefe und Passierzeit von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.11)**

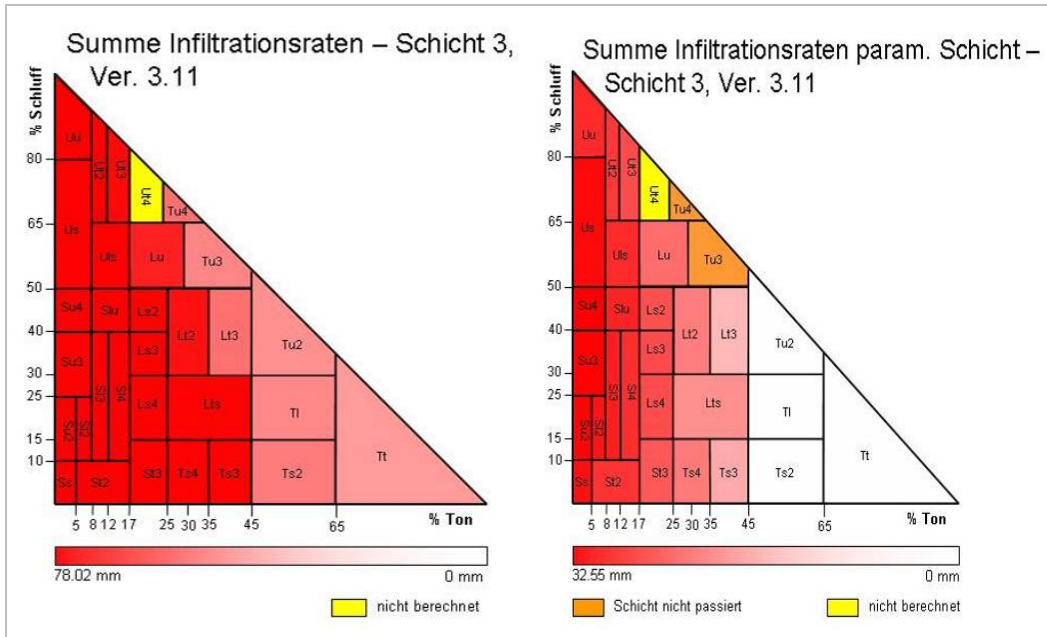


Abbildung A 15: Abhängigkeit der Summe der Infiltrationsraten von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.11)

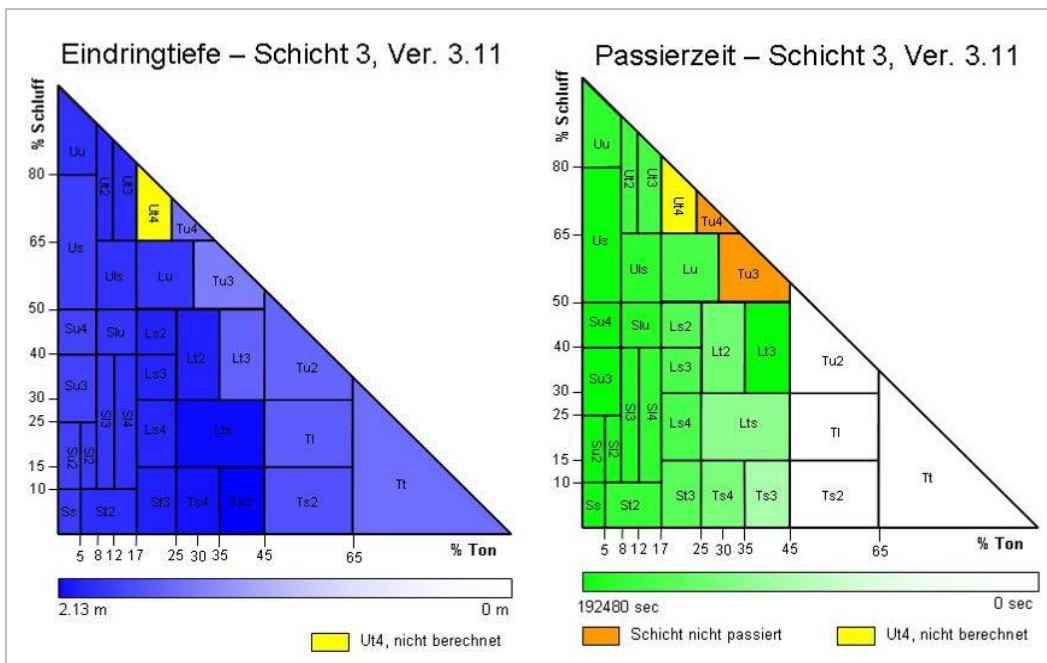


Abbildung A 16: Abhängigkeit der Gesamteindringtiefe und Passierzeit von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.11)

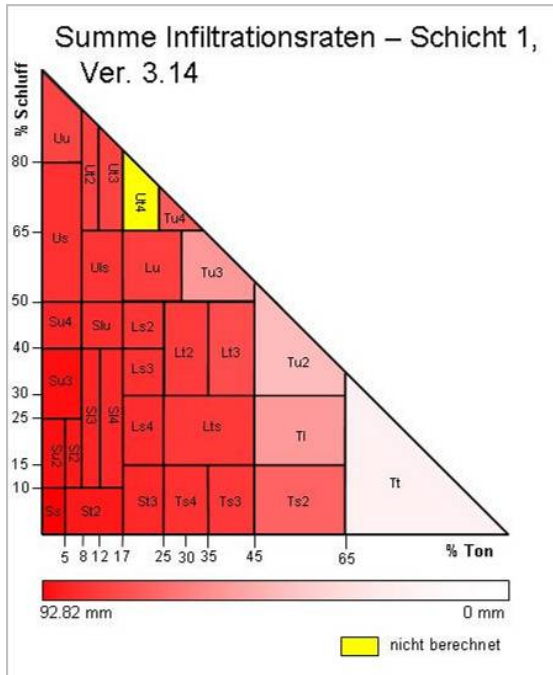


Abbildung A 17: Abhängigkeit der Summe der Infiltrationsraten von der Bodenart  
(EROSION 3D - Ver. 3.14)

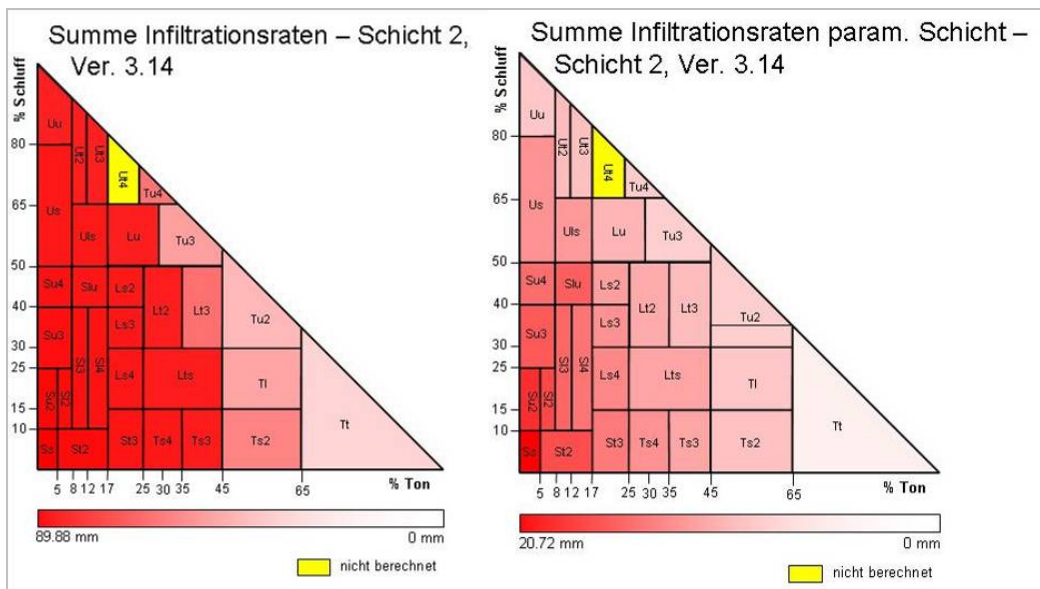
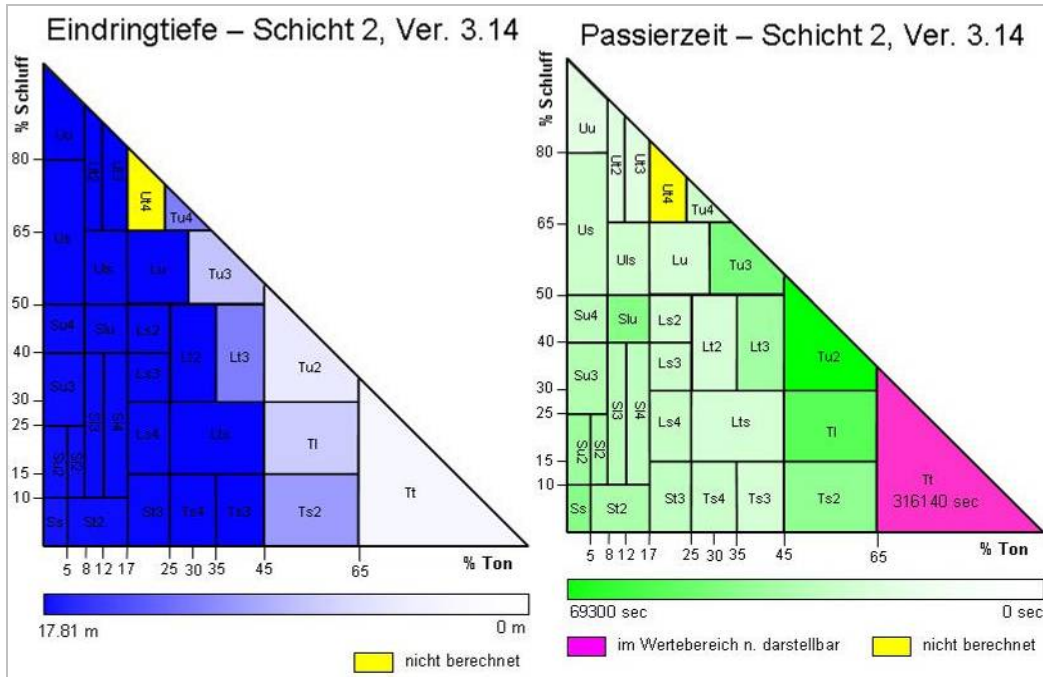
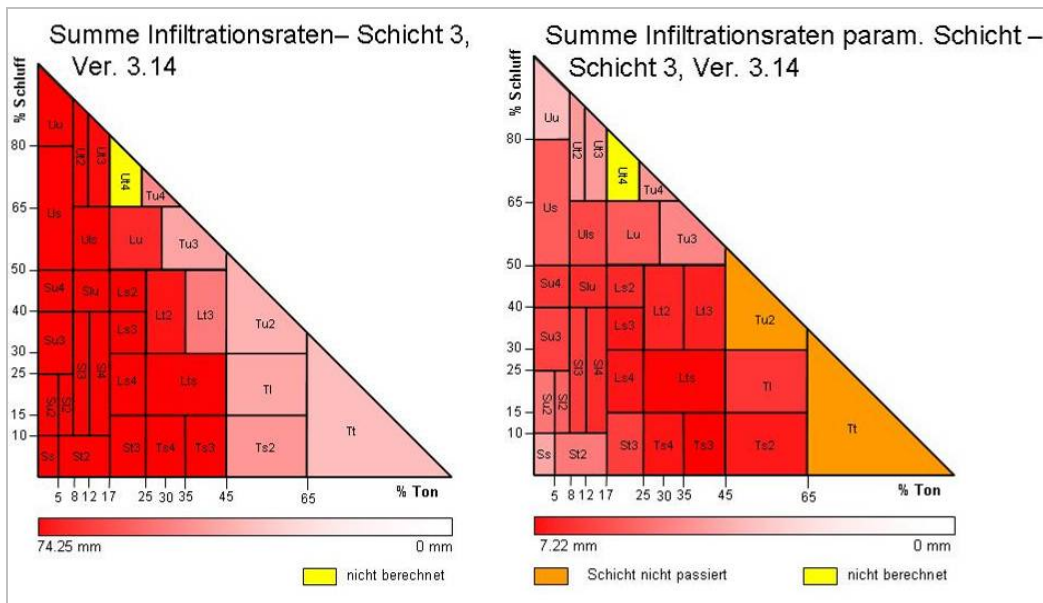


Abbildung A 18: Abhängigkeit der Summe der Infiltrationsraten von der Bodenart  
(EROSION 3D - Ver. 3.14)

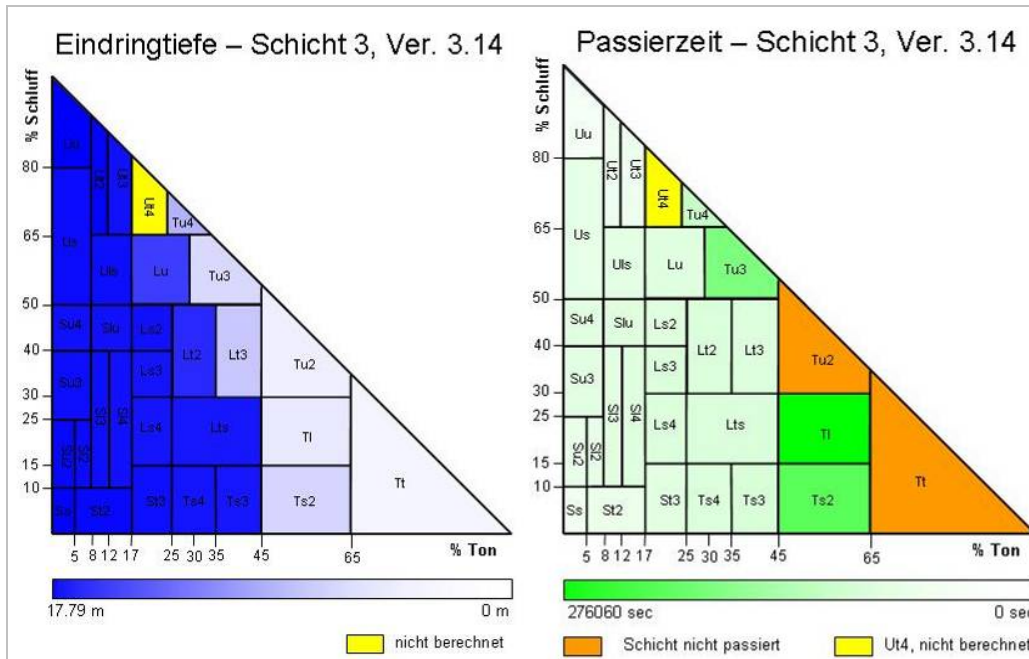




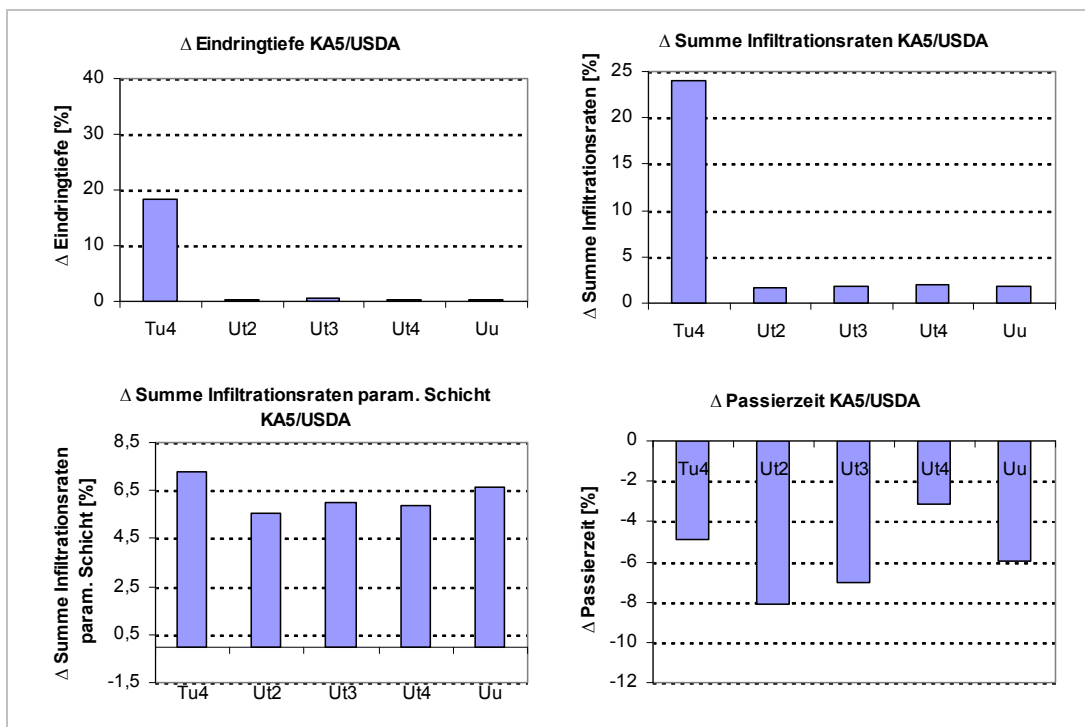
**Abbildung A 19: Abhängigkeit der Gesamteindringtiefe und Passierzeit von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.14)**



**Abbildung A 20: Abhängigkeit der Summe der Infiltrationsraten von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.14)**

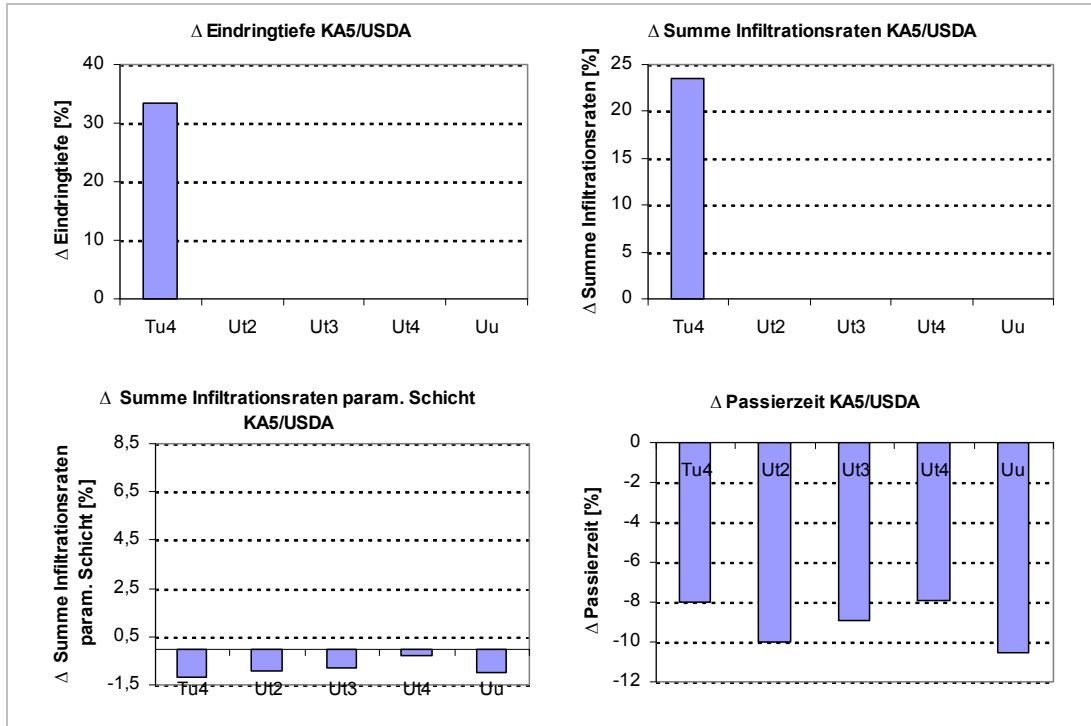


**Abbildung A 21: Abhängigkeit der Gesamteindringtiefe und Passierzeit von der Bodenart (EROSION 3D - Ver. 3.14)**



**Abbildung A 22: Einfluss der Klassifizierungsmethode zur Körngrößenverteilung auf die Modellsensitivität (EROSION 3D - Ver. 3.11)**

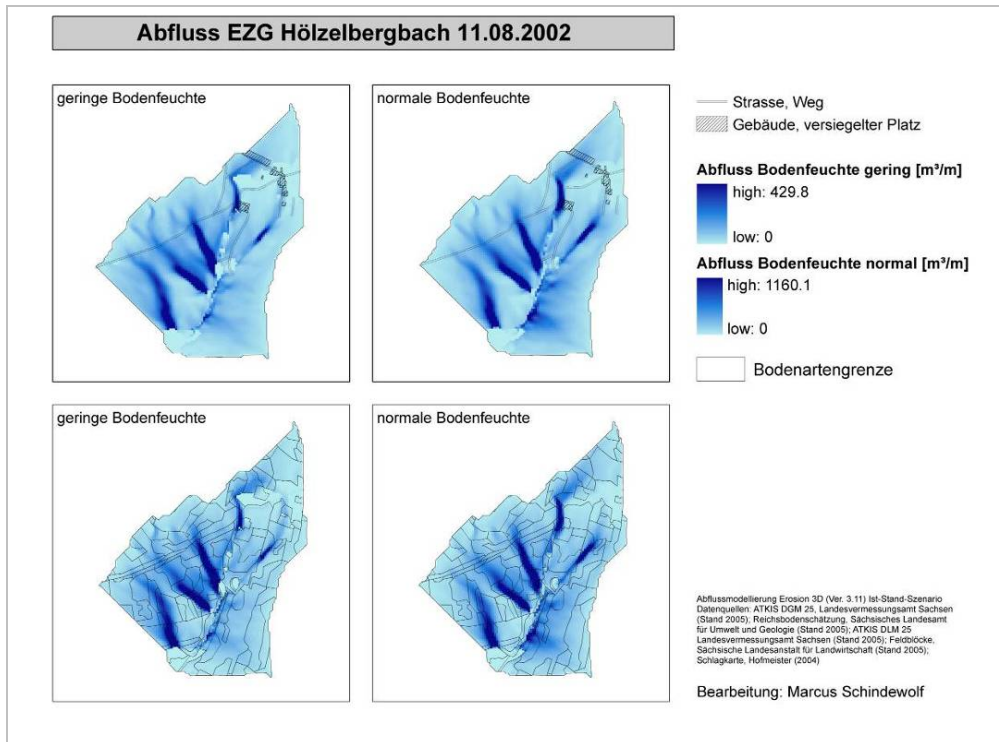




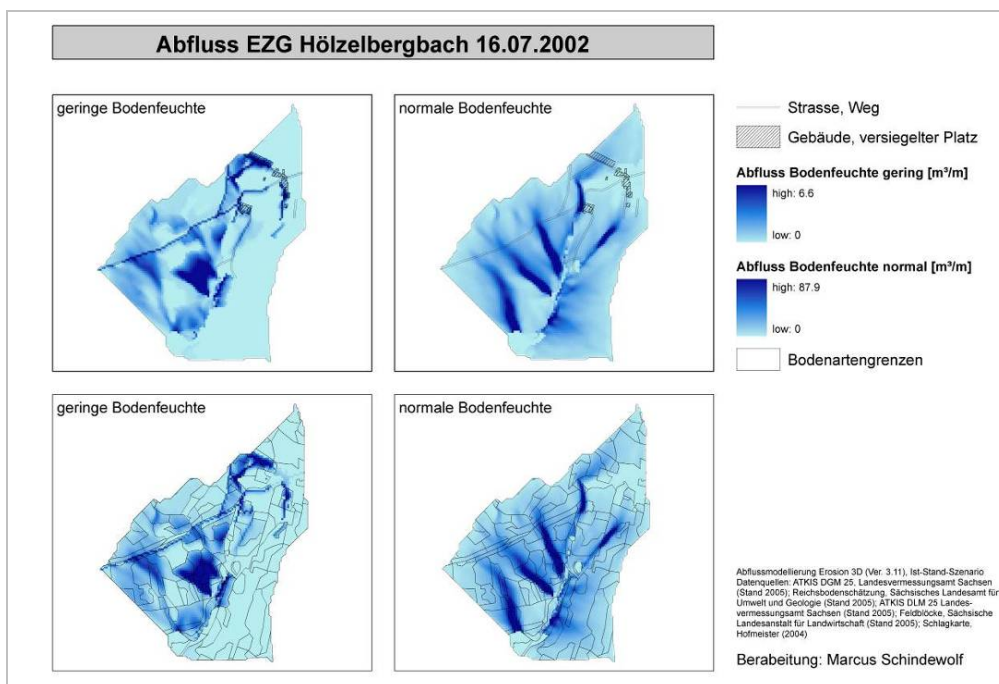
**Abbildung A 23: Einfluss der Klassifizierungsmethode zur Körngrößenverteilung auf die Modellsensitivität (EROSION 3D - Ver. 3.14)**

**Tabelle A 4: Bearbeitungsgänge und Parametrisierung der Plotversuche**

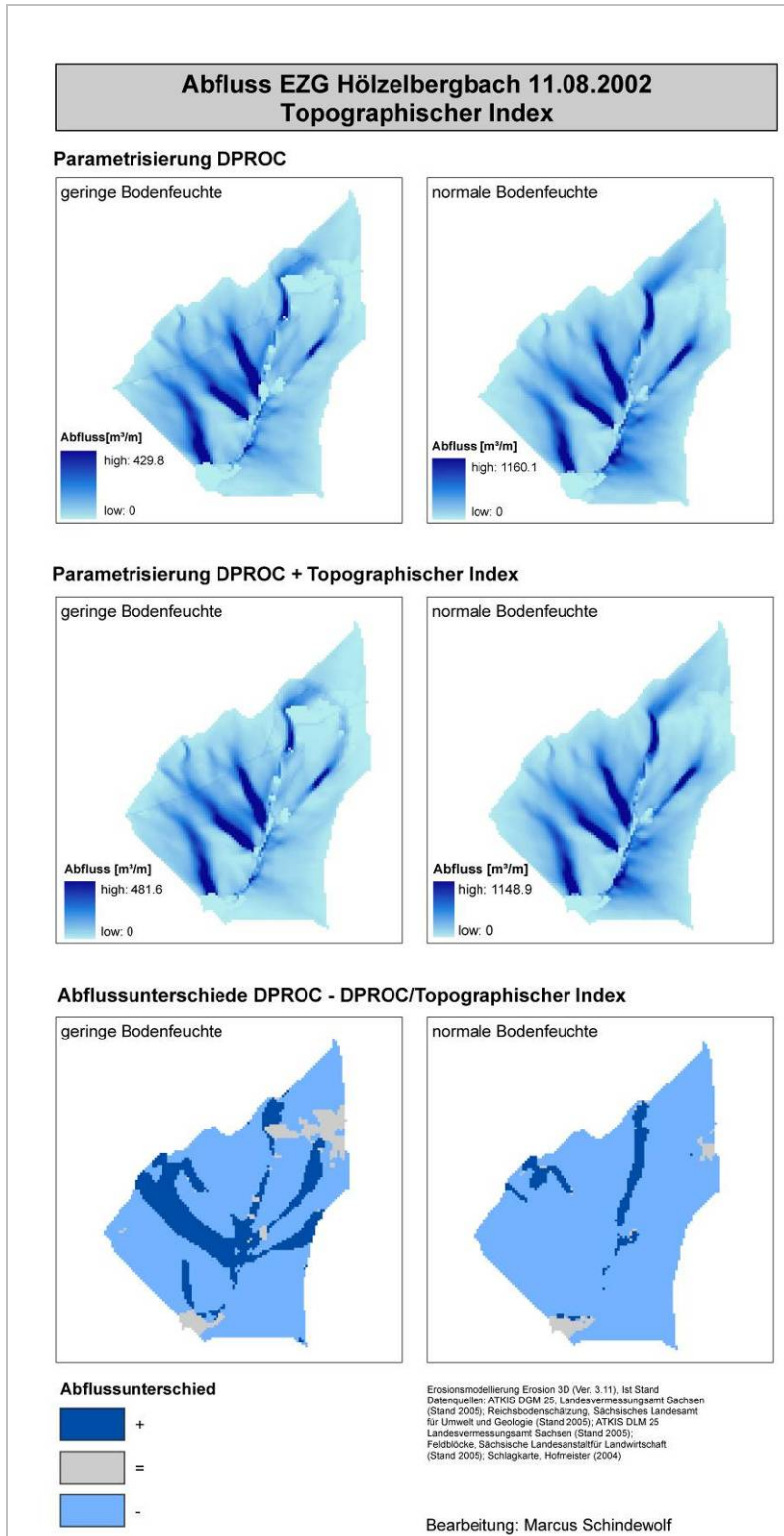
Ver-such	Arbeitsgänge			Tiefe [m]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ] / Skin-faktor [-]	
65		Scheibenegge	Dutzi	Nachdrilleinrichtung	0,04 0,21	1,48 / 7,2 1,52 / 29
66		Scheibenegge	Dutzi	Nachdrilleinrichtung	0,04 0,21	1,35 / 3,5 1,38 / 30
67	Pflug	Scheibenegge	Dutzi	Drillsaat	0,01 0,04 0,20	1,38 / 0,18 1,38 / 1 1,38 / 1
68	Pflug	Scheibenegge	Dutzi	Drillsaat	0,01 0,04 0,20	1,45 / 0,6 1,45 / 1 1,50 / 1
69			Dutzi	Nachdrilleinrichtung	0,01 0,24	1,22 / 0,1 1,22 / 1
70		Scheibenegge	Dutzi	Nachdrilleinrichtung	0,10 0,24	1,44 / 0,25 1,46 / 1
71		Scheibenegge	Grubber	Drillsaat	0,03 0,07 0,15	1,46 / 2 1,48 / 1,9 1,48 / 1,5
72		Scheibenegge	Grubber	Drillsaat	0,03 0,07 0,15	1,30 / 1,8 1,32 / 2,7 1,34 / 1
73	Pflug			Drillsaat	0,01 0,04 0,10 0,10	1,20 / 0,07 1,22 / 1 1,22 / 1 1,40 / 1
74	Pflug			Drillsaat	0,01 0,04 0,10 0,10	1,37 / 0,2 1,37 / 1 1,40 / 1 1,45 / 1
75	Pflug			Drillsaat	0,15 0,15	1,46 / 2,2 1,47 / 2,3
76	Pflug			Drillsaat	0,15 0,15	1,38 / 0,16 1,40 / 1



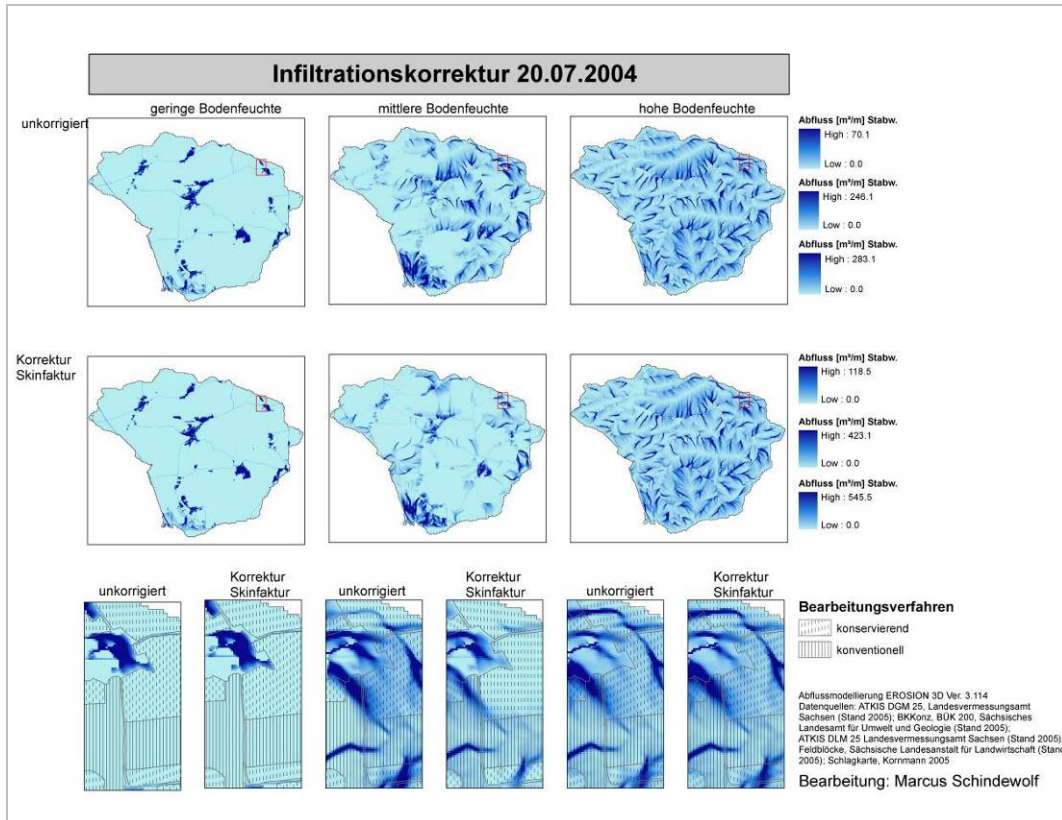
**Abbildung A 24: Räumliche Verteilung des Oberflächenabflusses in Abhängigkeit von Bodenart und Landnutzung im Hölzelbergbach-EZG (11.08.2002)**



**Abbildung A 25: Räumliche Verteilung des Oberflächenabflusses in Abhängigkeit von Bodenart und Landnutzung im Hölzelbergbach-EZG (16.07.2002)**



**Abbildung A 26: Änderung der räumlichen Verteilung des Oberflächenabflusses bei Bodenfeuchtegenerierung über den Topographischen Index**



**Abbildung A 27: Räumliche Verteilung des Oberflächenabflusses bei Korrektur der Bodendichten und Skinfaktoren (20.07.2004)**

## **Impressum**

- Herausgeber:** Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Internet: <http://www.smul.sachsen.de/lfulg>
- Autoren:** Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie  
Abteilung Pflanzliche Erzeugung  
Marcus Schindewolf, Dr. Walter Schmidt  
Gustav-Kühn-Str. 8  
04159 Leipzig  
Telefon: 0341 9174-116  
Telefax: 0341 9174-111  
E-Mail: [walter.schmidt@smul.sachsen.de](mailto:walter.schmidt@smul.sachsen.de)
- Redaktion:** siehe Autoren
- Endredaktion:** Öffentlichkeitsarbeit  
Präsidialabteilung
- ISSN:** 1867-2868
- Redaktionsschluss:** März 2009

Für alle angegebenen E-Mail-Adressen gilt:

Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente

### **Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.