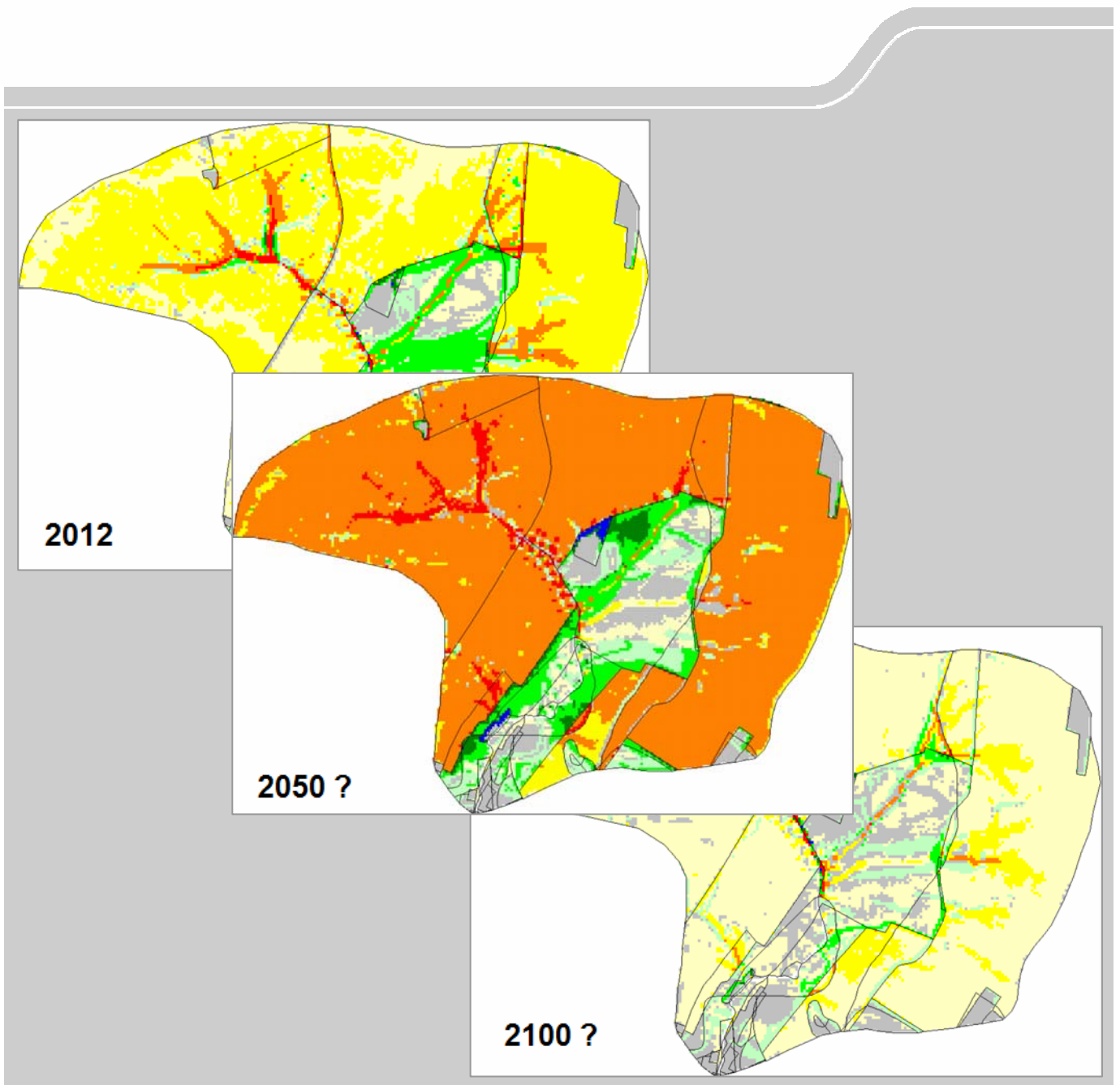


# Auswirkungen des Klima- wandels auf die Bodenerosion

Schriftenreihe, Heft 29/2012



# Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser

Dr. Anne Routschek

<b>1</b>	<b>Ziel und Motivation .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>12</b>
2.1	Klimamodellierung .....	12
2.1.1	Globale Klimamodellierung und Klimaszenarien .....	12
2.1.2	Regionale Klimamodelle .....	15
2.1.2.1	Dynamische regionale Klimamodelle .....	17
2.1.2.2	Statistische regionale Klimamodelle .....	18
2.1.2.3	Vergleich und Evaluierung von regionalen Klimaprojektionen für Sachsen .....	20
2.1.3	Referenzzeitraum und Klimastationen .....	22
2.1.4	Simulationszeitraum – Generierung hoch aufgelöster Klimadaten mit WETTREG .....	24
2.2	Erosionsmodellierung .....	26
2.2.1	Anforderungen an das Erosionsmodell .....	26
2.2.2	Übersicht über empirische und physikalische Erosionsmodelle .....	27
2.2.3	Das Erosionsmodell EROSION 3D .....	29
2.2.3.1	Sensitivitätsanalyse .....	31
2.3	Einfluss des Klimawandels auf Bodeneigenschaften, die die Bodenerosion durch Wasser beeinflussen .....	32
2.3.1	Veränderung der Bodenfeuchte .....	32
2.3.1.1	Das Bodenwasserhaushaltsmodell METVER (DWD) .....	34
2.3.2	Veränderung des Gehaltes an organischem Kohlenstoff .....	35
2.3.3	Veränderung des Bedeckungsgrades .....	36
2.3.3.1	Veränderte Phänologie .....	37
2.3.3.2	Veränderte Fruchtfolgen und Landnutzung .....	40
2.3.3.3	Änderung des Bedeckungsgrades durch Ertragsänderungen aufgrund von Trockenstress, CO <sub>2</sub> -Düngeeffekten und Veränderungen im Schädlingspektrum .....	41
2.3.4	Veränderte Bodenbearbeitung .....	44
2.4	Referenz-Einzugsgebiete .....	45
2.4.1	Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach .....	46
2.4.2	Einzugsgebiet Rasslitzbach .....	49
2.4.3	Einzugsgebiet Viebigbach .....	52
2.5	Eingabeparameter Erosionsmodellierung .....	55
2.5.1	Niederschlagsparameter .....	55
2.5.2	Reliefparameter .....	55
2.5.3	Boden- und Landnutzungsparameter .....	55
2.5.3.1	Fruchtfolgen .....	55
2.5.3.2	Landnutzungsmodell .....	55
2.6	Szenarien Erosionssimulation/Datengrundlagen .....	58
<b>3</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>59</b>
3.1	Auswirkungen des Klimawandels auf das Starkniederschlagsgeschehen .....	59
3.1.1	Vergleich der Anzahl der Starkniederschläge im Referenzzeitraum (1998-2007) und in den Zukunftszeiträumen (2041-2050 und 2091-2100) .....	59
3.1.1.1	Klimastation Chemnitz .....	59
3.1.1.2	Klimastation Oschatz .....	61
3.1.1.3	Klimastation Görlitz .....	62
3.1.2	Vergleich der durchschnittlichen Niederschlagssummen der Starkniederschläge im Referenzzeitraum (1998-2007) und den Zukunftszeiträumen (2041-2050 und 2091-2100) .....	64
3.1.2.1	Klimastation Chemnitz .....	64
3.1.2.2	Klimastation Oschatz .....	65
3.1.2.3	Klimastation Görlitz .....	66

3.1.3	Vergleich der Niederschlagsintensitäten der Starkniederschläge im Referenzzeitraum (1998-2007) und in den Zukunftszeiträumen (2041-2050 und 2091-2100).....	67
3.1.3.1	Klimastation Chemnitz .....	68
3.1.3.2	Klimastation Oschatz .....	70
3.1.3.3	Klimastation Görlitz .....	72
3.1.4	Vergleich der Entwicklung des Starkniederschlagsgeschehens für die Klimastationen Chemnitz, Oschatz und Görlitz .....	74
3.2	Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenfeuchte .....	76
3.2.1	Klimastation Chemnitz .....	77
3.2.2	Klimastation Oschatz .....	78
3.2.3	Klimastation Görlitz .....	79
3.3	Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser.....	81
3.3.1	Gebietsausträge im Referenzzeitraum „Konventionelle Bodenbearbeitung“ 1998-2007.....	81
3.3.1.1	Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches (Klimastation Chemnitz) .....	81
3.3.1.2	Einzugsgebiet des Rasslitzbaches (Klimastation Oschatz).....	82
3.3.1.3	Einzugsgebiet des Viebigbaches (Klimastation Görlitz).....	83
3.3.2	Gebietsausträge Zukunftsszenario „Konventionelle Bodenbearbeitung“ 2041-2050 und 2091-2100, Läufe MIN und MAX.....	84
3.3.2.1	Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches (Klimastation Chemnitz) .....	84
3.3.2.2	Einzugsgebiet des Rasslitzbaches (Klimastation Oschatz).....	87
3.3.2.3	Einzugsgebiet des Viebigbaches (Klimastation Görlitz).....	90
3.3.3	Gebietsausträge Zukunftsszenario „Konservierende Bodenbearbeitung“ 2041-2050 und 2091-2100, Läufe MIN und MAX, Grubberbearbeitung und Direktsaat.....	92
3.3.3.1	Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches (Klimastation Chemnitz) .....	92
3.3.3.2	Einzugsgebiet des Rasslitzbaches (Klimastation Oschatz).....	95
3.3.3.3	Einzugsgebiet des Viebigbaches (Klimastation Görlitz).....	99
3.3.4	Gebietsausträge Zukunftsszenario „Veränderter Gehalt an organischem Kohlenstoff“ 2041-2050 und 2091-2100, Läufe MIN und MAX.....	102
3.3.4.1	Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches (Klimastation Chemnitz) .....	102
3.3.4.2	Einzugsgebiet des Rasslitzbaches (Klimastation Oschatz).....	105
3.3.4.3	Einzugsgebiet des Viebigbaches (Klimastation Görlitz).....	107
3.3.5	Gebietsausträge Zukunftsszenario „Veränderte Phänologie“ .....	109
3.3.6	Gebietsausträge Zukunftsszenarios „Monokultur Winterweizen“ und „Monokultur Mais“ 2041-2050, Lauf MAX.....	115
3.3.7	Gebietsausträge Zukunftsszenario „Veränderte Landnutzung“ .....	120
3.3.8	Gebietsausträge Zukunftsszenario „Luftpolstereffekt“ .....	122
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>124</b>
4.1	Starkniederschlagsgeschehen .....	125
4.2	Einfluss des Klimas auf Bodeneigenschaften, die die Bodenerosion durch Wasser beeinflussen.....	126
4.2.1	Bodenfeuchte.....	126
4.2.2	Gehalt an organischem Kohlenstoff.....	126
4.2.3	Bedeckungsgrad .....	126
4.3	Bodenerosion durch Wasser.....	127
4.4	Diskussion .....	129
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>131</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersicht über die aus Klimamodellen abgeleitete mittlere globale Erwärmung (im Vergleich zu 1980-1999) für verschiedene Treibhausgas-Emissionsszenarios (Quelle: IPCC 2007).....	15
Abbildung 2:	Temperaturen der 20C-Läufe im Vergleich zu den Beobachtungsdaten 1961-1990 für Sachsen (KÜCHLER 2009 aus REGKLIM; KREIENKAMP et al. 2008) .....	21
Abbildung 3:	Niederschläge der 20C-Läufe im Vergleich zu den Beobachtungsdaten 1961-1990 für Sachsen (KÜCHLER 2009 aus REGKLIM; KREIENKAMP et al. 2008) .....	22
Abbildung 4:	Lage der Klimastationen: Chemnitz (WST) 42155 (1), Oschatz 41333 (2) und Görlitz (WST) 11405 (3) Hintergrund: Erosion und Deposition für das Worst-Case-Szenario Sachsen (SCHINDEWOLF 2009).....	23
Abbildung 5:	Sensitivität des Modells EROSION 3D gegenüber ausgewählten Eingabeparametern (MICHAEL, A. 2000, ergänzt) .....	31
Abbildung 6:	Eingabeparameter (Boden) für EROSION 3D hinsichtlich ihrer Veränderlichkeiten durch Klima und Bodenbearbeitung .....	32
Abbildung 7:	Phänologische Daten 1981-2009 für Winterweizen am Standort Nossen (Quelle: LORENZ 2009) .....	38
Abbildung 8:	Lage der Referenzeinzugsgebiete Dittersdorfer Bach, Rasslitzbach und Viebigbach .....	45
Abbildung 9:	Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches (Orthofoto) .....	46
Abbildung 10:	Höhenlagen Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach (DGM25) und digitales Geländemodell 10x10 m.....	47
Abbildung 11:	Landnutzungsverteilung Dittersdorfer Bach (ATKIS DLM).....	47
Abbildung 12:	Prozentuale Landnutzungsverteilung Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach (ATKIS-LM) .....	48
Abbildung 13:	Bodenartenverteilung im Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach (BÜK 200).....	48
Abbildung 14:	Einzugsgebiet des Rasslitzbaches (Orthofoto).....	49
Abbildung 15:	Höhenlagen Einzugsgebiet Rasslitzbach und digitales Geländemodell 10x10 m (DGM25) .....	50
Abbildung 16:	Landnutzungsverteilung Rasslitzbach (ATKIS DLM) .....	50
Abbildung 17:	Prozentuale Landnutzungsverteilung Einzugsgebiet Rasslitzbach (ATKIS-DLM) .....	51
Abbildung 18:	Bodenartenverteilung im Einzugsgebiet Rasslitzbach (BÜK 200) .....	51
Abbildung 19:	Einzugsgebiet des Viebigbaches (Orthofoto).....	52
Abbildung 20:	Höhenlagen Einzugsgebiet Viebigbach und digitales Geländemodell 10x10 m (DGM25).....	53
Abbildung 21:	Landnutzungsverteilung Viebigbach (ATKIS DLM).....	53
Abbildung 22:	Prozentuale Landnutzungsverteilung Einzugsgebiet Viebigbach (ATKIS-DLM) .....	54
Abbildung 23:	Bodenartenverteilung im Einzugsgebiet Viebigbach (BÜK 200) .....	54
Abbildung 24:	Anzahl der Starkniederschläge $\geq 0.1$ mm/min, Klimastation Chemnitz.....	60
Abbildung 25:	Prozentuale Abweichung der Anzahl zukünftiger Starkniederschläge [%] vom Referenzzeitraum – Klimastation Chemnitz .....	60
Abbildung 26:	Anzahl der Starkniederschläge $\geq 0.1$ mm/min, Klimastation Oschatz.....	61
Abbildung 27:	Prozentuale Abweichung der Anzahl zukünftiger Starkniederschläge [%] vom Referenzzeitraum – Klimastation Oschatz.....	62
Abbildung 28:	Anzahl der Starkniederschläge $\geq 0.1$ mm/min, Klimastation Görlitz .....	63
Abbildung 29:	Prozentuale Abweichung der Anzahl zukünftiger Starkniederschläge [%] vom Referenzzeitraum – Klimastation Görlitz.....	63
Abbildung 30:	$\emptyset$ Niederschlagssummen der Starkniederschläge $\geq 0.1$ mm/min, Klimastation Chemnitz.....	64
Abbildung 31:	$\emptyset$ Niederschlagssummen der Starkniederschläge $\geq 0.1$ mm/min, Klimastation Oschatz.....	65
Abbildung 32:	$\emptyset$ Niederschlagssummen der Starkniederschläge $\geq 0.1$ mm/min, Klimastation Görlitz .....	66
Abb. 33:	Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [1] Abb. 34: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [2].....	69
Abb. 35:	Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [3] Abb. 36: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [4].....	69
Abb. 37:	Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [5] .....	69
Abb. 38:	Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [1] Abb. 39: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [2].....	71
Abb. 40:	Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [3] Abb. 41: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [4].....	71
Abb. 42:	Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [5] .....	71
Abb. 43:	Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [1] Abb. 44: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [2].....	73
Abb. 45:	Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [3] Abb. 46: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [4].....	73

Abb. 47:	Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [5] .....	73
Abbildung 48:	Anzahl der Starkniederschläge nach Klimastationen.....	74
Abb. 49:	Anzahl der Starkniederschläge	Abb. 50: Anzahl der Starkniederschläge .....
Abb. 51:	Anzahl der Starkniederschläge	Abb. 52: Anzahl der Starkniederschläge .....
Abb. 53:	Anzahl der Starkniederschläge.....	75
Abbildung 54:	Niederschlagssummen der Klimastationen Chemnitz, Oschatz und Görlitz im Referenzzeitraum und in den Simulationszeiträumen (PILZ 2011).....	76
Abbildung 55:	Sonnenscheindauer der Klimastationen Chemnitz, Oschatz und Görlitz im Referenzzeitraum und in den Simulationszeiträumen (PILZ 2011).....	76
Abbildung 56:	Anzahl der Tage, an denen Feldkapazität erreicht wird - Klimastationen Chemnitz, Oschatz und Görlitz im Referenzzeitraum und in den Simulationszeiträumen (PILZ 2011) .....	77
Abbildung 57:	Verlauf der Bodenfeuchte im Referenzzeitraum und im MIN-Lauf (Schaltjahre), Bodenart Slu, Winterweizen, Klimastation Chemnitz (PILZ 2011) .....	78
Abbildung 58:	Verlauf der Bodenfeuchte im Referenzzeitraum und im MAX-Lauf (Schaltjahre), Bodenart Slu, Winterweizen, Klimastation Chemnitz (PILZ 2011) .....	78
Abbildung 59:	Verlauf der Bodenfeuchte im Referenzzeitraum und im MIN-Lauf (Schaltjahre), Bodenart Ut3, Winterweizen, Klimastation Oschatz (PILZ 2011) .....	79
Abbildung 60:	Verlauf der Bodenfeuchte im Referenzzeitraum und im MAX-Lauf (Schaltjahre), Bodenart Ut3, Winterweizen, Klimastation Oschatz (PILZ 2011) .....	79
Abbildung 61:	Verlauf der Bodenfeuchte im Referenzzeitraum und im MIN-Lauf (Schaltjahre), Bodenart Ut3, Winterweizen, Klimastation Görlitz (PILZ 2011) .....	80
Abbildung 62:	Verlauf der Bodenfeuchte im Referenzzeitraum und im MAX-Lauf (Schaltjahre), Bodenart Ut3, Winterweizen, Klimastation Görlitz (PILZ 2011) .....	80
Abbildung 63:	Erosion und Deposition im Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach (Klimastation Chemnitz) - September 2005 (zurückzuführen auf ein Starkregenereignis am 11.09.2005) .....	82
Abbildung 64:	Erosion und Deposition im Einzugsgebiet des Rasslitzbaches (Klimastation Oschatz) - August 2002 (zurückzuführen auf ein Starkregenereignis am 07.08.2002) .....	83
Abbildung 65:	Erosion und Deposition im Einzugsgebiet des Viebigbaches (Klimastation Görlitz) - August 2000 (zurückzuführen auf ein Starkregenereignis am 21.08.2000) .....	84
Abbildung 66:	Gebietsausträge Dittersdorfer Bach für die Dekaden 2041-2050 und 2091-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum .....	87
Abbildung 67:	Gebietsausträge Rasslitzbach für die Dekaden 2041-2050 und 2091-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum .....	89
Abbildung 68:	Gebietsausträge Viebigbach für die Dekaden 2041-2050 und 2091-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum .....	92
Abbildung 69:	Verteilung von Erosion und Deposition August 2043 (MAX-Lauf); Konventionelle Bodenbearbeitung im Vergleich zur Grubberbearbeitung und Direktsaat.....	94
Abbildung 70:	Gebietsausträge für konservierende Bodenbearbeitung im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung für die Dekaden 2041-2050 und 2091-2100 - Dittersdorfer Bach .....	95
Abbildung 71:	Verteilung von Erosion und Deposition: März 2091 (MIN-Lauf), Konventionelle Bodenbearbeitung im Vergleich zur Grubberbearbeitung und Direktsaat.....	97
Abbildung 72:	Erosion und Deposition im Südwesten des Einzugsgebietes, Ausschnitt aus Abbildung 68, Direktsaat .....	98
Abbildung 73:	Gebietsausträge für konservierende Bodenbearbeitung im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung für die Dekaden 2041-2050 und 2091-2100 - Rasslitzbach.....	99
Abbildung 74:	Erosion und Deposition am 27. Oktober 2041 (MIN-Lauf) und 31. August 2044 (MIN-Lauf).....	100
Abbildung 75:	Verteilung von Erosion und Deposition: März 2098 (MAX-Lauf), Konventionelle Bodenbearbeitung im Vergleich zur Grubberbearbeitung und Direktsaat.....	102
Abbildung 76:	Gebietsausträge für konservierende Bodenbearbeitung im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung für die Dekaden 2041-2050 und 2091-2100 - Viebigbach .....	102
Abbildung 77:	Auswirkungen veränderter Gehalte an organischem Kohlenstoff auf den Gebietsaustrag – Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches .....	104

Abbildung 78:	Auswirkungen veränderter Gehalte an organischem Kohlenstoff auf den Gebietsaustrag – Einzugsgebiet des Rasslitzbaches.....	107
Abbildung 79:	Auswirkungen veränderter Gehalte an organischem Kohlenstoff auf den Gebietsaustrag – Einzugsgebiet des Viebigbaches .....	109
Abbildung 80:	Erosion und Deposition vom 01.-03. August 2043 (MAX-Lauf), Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach: .....	112
Abbildung 81:	Erosion und Deposition vom 01.-03. August 2043 (MAX-Lauf), Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach: .....	113
Abbildung 82:	Erosion und Deposition vom 06.-18. September 2043 (MIN-Lauf), Einzugsgebiet Rasslitzbach:.....	114
Abbildung 83:	Erosion und Deposition vom 06.-18. September 2043 (MIN-Lauf), Einzugsgebiet Rasslitzbach:.....	114
Abb. 84:	Maisstoppeln - verschlämmt	
	Abb. 85: Maisstoppeln mit hoher Mulchbedeckung .....	117
Abb. 86:	Erosion und Deposition im Dezember 2049	
	Abb. 87: Erosion und Deposition im Dezember 2049 .....	118
Abbildung 88:	Grabenerosion bei Schwarzbrache Ende Februar nach der Schneeschmelze Foto: Prasuhn (2006).....	119
Abbildung 89:	Erosionsrinnen März 2046 (MAX) bei verschlämmtter und nivellierter Schwarzbrache.....	119
Abbildung 90:	Gebietsausträge [t/ha] für die Dekade 2041-2050 (MAX) nach Monaten, vergleichend für die Szenarien „Fruchtfolge“, „Monokultur Mais – Schwarzbrache“ und „Monokultur Mais - Stoppeln“ .....	120
Abbildung 91:	Erosionsprognosekarten Oktober 2041 (MIN-Lauf): Erosion und Deposition bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung (Grubber und Direktsaat) und nach Landnutzungsänderung (Umwandlung in Grünland und Wald) – Einzugsgebiet Viebigbach.....	121
Abbildung 92:	Abflüsse [m <sup>3</sup> ] für den 20. Juli 2042 (MIN) bei unterschiedlich ausgeprägtem Luftpolstereffekt.....	122
Abbildung 93:	Gebietsausträge [t/ha] für den 20. Juli 2042 (MIN) bei unterschiedlich ausgeprägtem Luftpolstereffekt .....	123
Abbildung 94:	Erosionsprognosekarten bei Luftpolstereffekt (Ftrap=0.5) – 20. Juli 2042 (MIN), Viebigbach .....	123

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anzahl der Einzelereignisse mit Schwellenwertüberschreitung nach Klimastation und Jahr im Referenzzeitraum.....	24
Tabelle 2:	Anzahl der Einzelereignisse mit Schwellenwertüberschreitung für die Klimastation Chemnitz für Zukunftsszenarien (2041-2500 und 2091-2100), Markierung der Läufe MIN mit der geringsten (grün) und MAX mit der höchsten mittleren Starkregenintensität (orange).....	25
Tabelle 3:	Anzahl der Einzelereignisse mit Schwellenwertüberschreitung für die Klimastation Oschatz für Zukunftsszenarien (2041-2500 und 2091-2100), Markierung der Läufe MIN mit der geringsten (grün) und MAX mit der höchsten mittleren Starkregenintensität (orange).....	26
Tabelle 4:	Anzahl der Einzelereignisse mit Schwellenwertüberschreitung für die Klimastation Görlitz für Zukunftsszenarien (2041-2500 und 2091-2100), Markierung der Läufe MIN mit der geringsten (grün) und MAX mit der höchsten mittleren Starkregenintensität (orange).....	26
Tabelle 5:	Übersicht über vorhandene Erosionsmodelle (nach Von Werner 1995; Schmidt, J. 1996; Gerlinger 1997; Deinlein & Schoger 1997, ergänzt und verändert in Michael, A. 2000).....	28
Tabelle 6:	Übersicht zur Eignung vorhandener Erosionsmodelle zur Anwendung in diesem Projekt (Deinlein 1997, ergänzt und verändert in Michael, A. 2000).....	29
Tabelle 7:	Ausgabeparameter EROSION 2D/3D.....	30
Tabelle 8:	Prozentuale Änderung der mittleren Bodenfeuchte (ganzjährig) Station Chemnitz, Bezugsjahr 2000 (100 %) (nach Fritz 2009, verändert).....	33
Tabelle 9:	Prozentuale Änderung der mittleren Bodenfeuchte (Mai-September) Station Chemnitz, Bezugsjahr 2000 (100 %) (nach Fritz 2009, verändert).....	33
Tabelle 10:	Änderung der Corg-Gehalte zwischen 2000 und 2050 unter Berücksichtigung des Klimawandels und unterschiedlicher Bewirtschaftung an drei verschiedenen Standorten (Kolbe 2009, verändert).....	35
Tabelle 11:	Ct-Masse in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Tiefenstufe (Nitzsche 2009, verändert).....	36
Tabelle 12:	Beginn der phänologischen Phasen von Feldfrüchten in Sachsen (Pöhler et al. 2007).....	37
Tabelle 13:	Phänologie von Winterroggen, Mais und Zuckerrübe: Durchschnittswerte für Deutschland nach Chmielewski et al. (2004).....	39
Tabelle 14:	Phänologie und Trend ausgewählter Feldfrüchte in Deutschland nach Estrella (2007).....	39
Tabelle 15:	Rangfolge der Feldfrüchte (Mirschel et al. 2009a).....	40
Tabelle 16:	CO <sub>2</sub> -Düngeeffekt (Weigel et al. 2005).....	42
Tabelle 17:	Blattflächenindex mit und ohne CO <sub>2</sub> -Erhöhung (Burkart et al. 2004).....	42
Tabelle 18:	Relative Ertragsänderungen in den Jahren 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2005 für Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Winterraps und Silomais für drei Simulationsvarianten (Variante 1: ohne CO <sub>2</sub> , ohne Trend, Variante 2: mit CO <sub>2</sub> , ohne Trend, Variante 3: mit CO <sub>2</sub> , mit Trend), für die WEREX-Realisierungen WEREX-A1B-FEU und WEREX-A1B-TRO sowie getrennt nach einzelnen Boden-Klima-Regionen (Mirschel et al. 2009b).....	43
Tabelle 19:	Hauptfruchtarten für die Referenz-Einzugsgebiete (Quelle: pers. Mitteilung Zimmermann, LfULG, 2010).....	55
Tabelle 20:	Verteilung der Feldfrüchte nach Flächen-ID/Bodenarten und Jahr im Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach (Klimastation Chemnitz).....	56
Tabelle 21:	Verteilung der Feldfrüchte nach Flächen-ID/Bodenarten und Jahr im Einzugsgebiet Rasslitzbach (Klimastation Oschatz).....	57
Tabelle 22:	Verteilung der Feldfrüchte nach Flächen-ID/Bodenarten und Jahr im Einzugsgebiet Viebigbach (Klimastation Görlitz).....	58
Tabelle 23:	Vergleich der Anzahl von Starkniederschlägen ( $\geq 0.1$ mm/min) Station Chemnitz Referenzzeitraum 1998-2007 (gemessene Daten), Simulationszeiträume 2041-2050 und 2091-2100, Läufe mit der geringsten mittleren Intensität (MIN) und der höchsten mittleren Intensität (MAX).....	59
Tabelle 24:	Vergleich der Anzahl von Starkniederschlägen ( $\geq 0.1$ mm/min) Station Oschatz Referenzzeitraum 1998-2007 (gemessene Daten), Simulationszeiträume 2041-2050 und 2091-2100, Läufe mit der geringsten mittleren Intensität (MIN) und der höchsten mittleren Intensität (MAX).....	61



Tabelle 25:	Vergleich der Anzahl von Starkniederschlägen ( $\geq 0.1$ mm/min) Station Görlitz Referenzzeitraum 1998-2007 (gemessene Daten), Simulationszeiträume 2041-2050 und 2091-2100, Läufe mit der geringsten mittleren Intensität (MIN) und der höchsten mittleren Intensität (MAX).....	62
Tabelle 26:	Vergleich der $\emptyset$ Niederschlagssummen (NS-Summe) von Starkniederschlägen ( $\geq 0.1$ mm/min) Station Chemnitz Referenzzeitraum 1998-2007 (gemessene Daten), Simulationszeiträume 2041-2050 und 2091-2100, Läufe mit der geringsten mittleren Intensität (MIN) und der höchsten mittleren Intensität (MAX) .....	64
Tabelle 27:	Vergleich der $\emptyset$ Niederschlagssummen (NS-Summe) von Starkniederschlägen ( $\geq 0.1$ mm/min) Station Oschatz, Referenzzeitraum 1998-2007 (gemessene Daten), Simulationszeiträume 2041-2050 und 2091-2100, Läufe mit der geringsten mittleren Intensität (MIN) und der höchsten mittleren Intensität (MAX) .....	65
Tabelle 28:	Vergleich der $\emptyset$ Niederschlagssummen (NS-Summe) von Starkniederschlägen ( $\geq 0.1$ mm/min) Station Görlitz Referenzzeitraum 1998-2007 (gemessene Daten), Simulationszeiträume 2041-2050 und 2091-2100 Läufe mit der geringsten mittleren Intensität (MIN) und der höchsten mittleren Intensität (MAX) .....	66
Tabelle 29:	Vergleich der maximalen Intensitäten der Starkniederschläge nach Schwellenwertüberschreitung Anzahl der Starkniederschläge nach Grenzwertüberschreitung – Klimastation Chemnitz .....	68
Tabelle 30:	Vergleich der maximalen Intensitäten der Starkniederschläge nach Schwellenwertüberschreitung Anzahl der Starkniederschläge nach Grenzwertüberschreitung – Klimastation Oschatz .....	70
Tabelle 31:	Vergleich der maximalen Intensitäten der Starkniederschläge nach Schwellenwertüberschreitung Anzahl der Starkniederschläge nach Grenzwertüberschreitung – Klimastation Görlitz.....	72
Tabelle 32:	Anzahl der Starkniederschläge nach Klimastationen: absolute Anzahl, Niederschlagssummen, Anzahl nach Intensitäten nach Grenzwerten [1] bis [5].....	74
Tabelle 33:	Gebietsausträge [t/ha] 1998-2007, Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach (Chemnitz); Abbildung 63 bezieht sich auf die Markierung September 2005.....	81
Tabelle 34:	Gebietsausträge [t/ha] 1998-2007, Einzugsgebiet Rasslitzbach (Oschatz); Abbildung 64 bezieht sich auf die Markierung August 2002 .....	82
Tabelle 35:	Gebietsausträge [t/ha] 1998-2007, Einzugsgebiet Viebigbach (Görlitz); Abbildung 65 bezieht sich auf die Markierung August 2000 .....	83
Tabelle 36:	Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2041-2050, MIN-Lauf .....	85
Tabelle 37:	Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2041-2050, MAX-Lauf .....	85
Tabelle 38:	Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2091-2100, MIN-Lauf .....	86
Tabelle 39:	Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2091-2100, MAX-Lauf .....	86
Tabelle 40:	Gebietsausträge Rasslitzbach 2041-2050, MIN-Lauf .....	87
Tabelle 41:	Gebietsausträge Rasslitzbach 2041-2050, MAX-Lauf.....	88
Tabelle 42:	Gebietsausträge Rasslitzbach 2091-2100, MIN-Lauf.....	88
Tabelle 43:	Gebietsausträge Rasslitzbach 2091-2100, MAX-Lauf.....	89
Tabelle 44:	Gebietsausträge Viebigbach 2041-2050, MIN-Lauf .....	90
Tabelle 45:	Gebietsausträge Viebigbach 2041-2050, MAX-Lauf .....	90
Tabelle 46:	Gebietsausträge Viebigbach 2091-2100, MIN-Lauf .....	91
Tabelle 47:	Gebietsausträge Viebigbach 2091-2100, MAX-Lauf .....	91
Tabelle 48:	Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2041-2050, konservierende Bodenbearbeitung, MIN-Lauf.....	93
Tabelle 49:	Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2041-2050, konservierende Bodenbearbeitung, MAX-Lauf, Abbildung 69 bezieht sich auf die Markierung August 2043 .....	93
Tabelle 50:	Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2091-2100, konservierende Bodenbearbeitung, MIN-Lauf.....	94
Tabelle 51:	Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2091-2100, konservierende Bodenbearbeitung, MAX-Lauf .....	94
Tabelle 52:	Gebietsausträge Rasslitzbach 2041-2050, konservierende Bodenbearbeitung, MIN-Lauf .....	96
Tabelle 53:	Gebietsausträge Rasslitzbach 2041-2050, konservierende Bodenbearbeitung, MAX-Lauf .....	96
Tabelle 54:	Gebietsausträge Rasslitzbach 2091-2100, konservierende Bodenbearbeitung, MIN-Lauf; Abbildung 71 bezieht sich auf die Markierung März 2091 .....	97
Tabelle 55:	Gebietsausträge Rasslitzbach 2091-2100, konservierende Bodenbearbeitung, MAX-Lauf .....	98
Tabelle 56:	Gebietsausträge Viebigbach 2041-2050, konservierende Bodenbearbeitung, MIN-Lauf.....	99
Tabelle 57:	Gebietsausträge Viebigbach 2041-2050, konservierende Bodenbearbeitung, MAX-Lauf.....	100
Tabelle 58:	Gebietsausträge Viebigbach 2091-2100, konservierende Bodenbearbeitung, MIN-Lauf.....	101

Tabelle 59:	Gebietsausträge Viebigbach 2091-2100, konservierende Bodenbearbeitung, MAX-Lauf; Abbildung 75 bezieht sich auf die Markierung März 2098.....	101
Tabelle 60:	Gebietsausträge Dittersdorfer Bach, veränderter Corg-Gehalt -0.1 %, 2041-2050, MIN-Lauf .....	102
Tabelle 61:	Gebietsausträge Dittersdorfer Bach, veränderter Corg-Gehalt -0.1 %, 2041-2050, MAX-Lauf .....	103
Tabelle 62:	Gebietsausträge Dittersdorfer Bach, veränderter Corg-Gehalt -0.2 %, 2091-2100, MIN-Lauf .....	103
Tabelle 63:	Gebietsausträge Dittersdorfer Bach, veränderter Corg-Gehalt -0.2 %, 2091-2100, MAX-Lauf .....	104
Tabelle 64:	Gebietsausträge Rasslitzbach, veränderter Corg-Gehalt -0.1 %, 2041-2050, MIN-Lauf.....	105
Tabelle 65:	Gebietsausträge Rasslitzbach, veränderter Corg-Gehalt -0.1 %, 2041-2050, MAX-Lauf.....	105
Tabelle 66:	Gebietsausträge Rasslitzbach, veränderter Corg-Gehalt -0.2 %, 2091-2100, MIN-Lauf.....	106
Tabelle 67:	Gebietsausträge Rasslitzbach, veränderter Corg-Gehalt -0.2 %, 2091-2100, MAX-Lauf.....	106
Tabelle 68:	Gebietsausträge Viebigbach, veränderter Corg-Gehalt -0.1 %, 2041-2050, MIN-Lauf .....	107
Tabelle 69:	Gebietsausträge Viebigbach, veränderter Corg-Gehalt -0.1%, 2041-2050, MAX-Lauf .....	107
Tabelle 70:	Gebietsausträge Viebigbach, veränderter Corg.-Gehalt -0.2 %, 2091-2100, MIN-Lauf .....	108
Tabelle 71:	Gebietsausträge Viebigbach, veränderter Corg.-Gehalt -0.2 %, 2091-2100, MAX-Lauf .....	108
Tabelle 72:	Veränderte Erntetermine für die Hauptfruchtarten in den 3 Referenzeinzugsgebieten nach PÖHLER et al. (2007) und ESTRELLA et al. (2007) .....	111
Tabelle 73:	Auswirkung zukünftig veränderter Erntetermine auf den Gebietsaustrag .....	114
Tabelle 74:	Gebietsaustrag Dittersdorfer Bach „Monokultur Winterweizen“ 2041-2050, MAX-Lauf .....	115
Tabelle 75:	Gebietsaustrag Rasslitzbach „Monokultur Winterweizen“ 2041-2050, MAX-Lauf .....	116
Tabelle 76:	Gebietsaustrag Dittersdorfer Bach „Monokultur Mais“ 2041-2050, MAX-Lauf - Stoppel .....	116
Tabelle 77:	Gebietsaustrag Rasslitzbach „Monokultur Mais“ 2041-2050, MAX-Lauf - Stoppel.....	117
Tabelle 78:	Gebietsaustrag Rasslitzbach „Monokultur Mais“ 2041-2050, MAX-Lauf – Schwarzbrache; Abbildung 89 bezieht sich auf die Markierung März 2046.....	118

# 1 Ziel und Motivation

Der 4. Sachstandsbericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, AR4 2007) geht von einer zu erwartenden Erderwärmung zwischen 1.1 (Szenario B1) und 6.4 Grad Celsius (Szenario A1) in den nächsten 100 Jahren aus. Diese rasche Änderung des Klimasystems bewirkt Instabilität: Häufigkeit, Intensität und das zeitliche Auftreten extremer Witterungsverhältnisse (Starkregen, Stürme, Dürreperioden, ...) werden weltweit, so auch in Deutschland und Sachsen, beeinflusst (z. B. ENKE 2003e, KÜCHLER & SOMMER 2005, KÜCHLER 2007, HÄNSEL et al. 2004). Die einzelnen klimatologischen Extreme und besonders deren kurzfristiger Wechsel (z. B. Starkregen und Hochwasser 2002, Dürre 2003) prägen aufgrund der großen Schadwirkungen die Wahrnehmung der Folgen der globalen Erwärmung.

Die Temperaturerhöhung beeinflusst u. a. die regionalen Zirkulationsmuster in der Atmosphäre. Diese veränderten Zirkulationsmuster werden im Freistaat Sachsen zu einem veränderten Starkniederschlagsgeschehen führen (KÜCHLER 2007, MICHAEL et al. 2005). Weil das Ausmaß des Bodenabtrages durch Wasser u. a. von der Intensität, der Häufigkeit und dem Zeitpunkt der einzelnen Starkniederschläge abhängig ist, muss von Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser ausgegangen werden.

Die meisten Starkniederschläge haben eine Dauer von wenigen Stunden und weisen abflussrelevante Spitzenintensitäten im Minutenbereich auf. Die modellhafte Beschreibung der Bodenerosion durch Wasser sollte deshalb stets auf Basis individueller Niederschlagsereignisse erfolgen, denn die Abschätzung von Risiken und die Bemessung von Schutzmaßnahmen sind vor allem für diese verhältnismäßig selten auftretenden Extremsituationen von Interesse. Um die Auswirkung von Starkniederschlägen auf das reale und ebenso zukünftige Erosionsgeschehen zu untersuchen, bedarf es demnach hoch aufgelöster Niederschlagsdaten. Erst seit wenigen Jahren sind regionale Klimamodelle überhaupt in der Lage, solch hoch aufgelösten Daten auf der Grundlage von Emissionsszenarien zu erzeugen. Alle bekannten bisherigen Untersuchungen der Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser basieren auf Tages-, oft sogar Monatssummen zukünftiger Niederschlagsprognosen (z. B. ZHANG et al. 2009; O'NEAL 2005, WURBS & STEINIGER 2011) und können damit ein verändertes Starkniederschlagsgeschehen nicht berücksichtigen. In dieser Studie soll der zukünftige Bodenabtrag durch Wasser in Referenzeinzugsgebieten in Sachsen auf Basis individueller Starkniederschläge prognostiziert werden.

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser zu untersuchen, ist neben der Analyse des zukünftigen Starkniederschlagsgeschehens ein zweiter Aspekt zu berücksichtigen: Durch die Temperaturerhöhung und die Veränderung der Extreme erzwingt der Klimawandel schon jetzt und auch künftig eine Anpassung der Landnutzung, der Fruchtfolgen und der Bodenbewirtschaftung. Damit verbunden werden physikalische und chemische Eigenschaften des Bodens beeinflusst und verändert (z. B. Bodenfeuchteregime, Gehalt an org. Kohlenstoff, Bedeckungsgrad).

Beide Aspekte des Klimawandels, die erwarteten klimatischen Veränderungen in Bezug auf Häufigkeit, Intensität und Zeitpunkt von Starkregen und die Veränderungen der Landnutzung, der Bodenbewirtschaftung, der Maßnahmen zum Erosionsschutz mit den in Wechselwirkung stehenden veränderten Bodeneigenschaften werden Auswirkungen auf die Abflussbildung und damit auf das zukünftige Erosionsgeschehen haben.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, das zukünftige Erosionsrisiko unter Berücksichtigung dieser beiden Aspekte räumlich und zeitlich differenziert in Sachsen darzustellen und auf Einzugsgebietsebene zu quantifizieren. Die zukünftigen Verhältnisse sollen in Form von plausiblen Modellszenarien in Referenzeinzugsgebieten mit Hilfe des physikalisch basierten Bodenerosionsmodells EROSION 3D abgebildet werden. Eingangsparameter sind aus neuesten Methoden der regionalen Klimaprojektion gewonnene, hoch aufgelöste Niederschlagsdaten und aus aktuellen Forschungsbeiträgen zur Klimafolgenforschung abgeleitete Boden- und Landnutzungsparameter.

# 2 Material und Methoden

## 2.1 Klimamodellierung

Ein Starkniederschlag/Starkregen wird in diesem Vorhaben als 5-Minuten-Niederschlag mit einer Intensität von  $\geq 0.1$  mm/min definiert. Soll ein Starkniederschlag in einem Modell adäquat wiedergegeben werden, so müssen die Niederschlagssummen in möglichst kurzen Minuten-Zeiträumen (1 bis maximal 15 Minuten), d. h. in einer möglichst hohen Auflösung vorliegen. Für den Erosionsprozess und die Abflussbildung ist es von erheblicher Bedeutung, ob z. B. 20 mm Niederschlag in 15 Minuten, einer Stunde oder in 24 Stunden fallen. Auch der Zeitpunkt eines Starkregens spielt eine entscheidende Rolle: So kann z. B. ein Starkregen im Frühjahr direkt nach der Saatbettbereitung sehr hohe Schäden verursachen, während durch einen Starkregen mit gleicher Niederschlagssumme und Intensität zu einem Zeitpunkt mit hoher Bodenbedeckung im Sommer kaum Boden erodiert wird.

Um das zukünftige Erosionsrisiko zu beurteilen, wird folglich eine Modellierung lokaler zukünftiger Starkniederschläge in einer möglichst hohen Auflösung benötigt.

Solch hoch aufgelöste Daten können erst seit wenigen Jahren mit Hilfe regionaler Klimamodelle gewonnen werden. Im Folgenden soll untersucht werden, welches regionale Klimamodell für die Generierung hoch aufgelöster lokaler Niederschlagsdaten für die Simulation der zukünftigen Erosion in Sachsen am besten geeignet ist.

Der Antrieb der derzeit verfügbaren regionalen Klimamodelle erfolgt durch globale Klimamodelle auf der Grundlage von Emissionsszenarien (IPCC bzw. SRES-Szenarien: IPCC - Intergovernmental Panel of Climate Change, SRES - Special Report on Emission Scenarios). Deshalb wird auf den Zusammenhang zwischen globaler und regionaler Klimamodellierung im Folgenden kurz eingegangen.

### 2.1.1 Globale Klimamodellierung und Klimaszenarien

Wegen der Komplexität des Klimasystems kann seine Dynamik quantitativ nur mit Hilfe aufwändiger numerischer Modelle erfasst werden. Zunächst werden einzelne Komponenten des Gesamtsystems (Atmosphäre, Ozean, Meereis, Landoberflächen, anthropogene Einflüsse, Schwankungen der solaren und vulkanischen Aktivität, Rückkopplungen usw.) modellhaft abgebildet. Die Beschreibung der einzelnen komplexen Prozesse im Klimasystem erfolgt dabei, wie in jedem Modell, in vereinfachter 'parametrischer' Form. Die einzelnen Subsysteme des Klimasystems oder auch einzelner Komponenten der Subsysteme (z. B. Ozean, Biosphäre, Kryosphäre, Stoffkreisläufe) werden meist in getrennten Modellen dargestellt, die bei Bedarf nach erfolgreicher Validierung miteinander gekoppelt werden. Atmosphäre und Ozean sind die wichtigsten Subsysteme des Klimasystems, in denen und zwischen denen dynamische Zirkulationsprozesse ablaufen. Man unterscheidet deshalb zwischen globalen bzw. allgemeinen Zirkulationsmodellen (engl. General Circulation Modells: GCM), globalen Atmosphärenmodellen (horizontale Auflösung 500-250 km [T21-T42], vertikale Auflösung 1 km), globalen Ozeanmodellen (horizontale Auflösung 125-250 km, vertikale Auflösung 200-400 m) und gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modellen. Neuere Klimamodelle erweitern die Simulation der Atmosphäre und des Ozeans um den Aspekt der Stoffkreisläufe und der interaktiven Vegetation und werden zu Erdmodellensystemen.

Im Zuge des 4. Sachstandsberichts des IPCC (2007) kam eine Vielzahl globaler Klimamodelle für die Abschätzung künftiger Entwicklungen zur Anwendung. Datensätze dieser Modelle sind in der CERA-Datenbank des World Data Center for Climate Hamburg abrufbar (FESKE 2009). Die Ergebnisse von Simulationsläufen für Mitteleuropa mit 12 verschiedenen globalen Klimamodellen wurden in der Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 25/2009 „Globale Klimamodellsimulationen“, zusammengestellt (FESKE 2009).

Das globale Klimamodell ECHAM5-MPI/OM bildet die Grundlage für die in Deutschland verwendeten regionalen Klimamodelle.

Das Atmosphärenmodell ECHAM wurde am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg und von der Universität Hamburg auf der Grundlage des europäischen Wettervorhersage Modells des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather

Forecasts, deutsch: Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage) entwickelt. Verschiedene Modellversionen werden derzeit operationell verwendet: ECHAM4 seit 1996 und ECHAM5 seit Anfang 2004.

ECHAM berechnet die Entwicklung globaler Eigenschaften der atmosphärischen Elemente (Temperaturen, Winde, Wolken) in Zeitschritten von etwa 20 bis 40 min in einer Auflösung von ca. 300 bis 500 km (je nach Modellversion). Neben der solaren Einstrahlung werden klimarelevante Gase und Meeresoberflächen-Temperaturen vorgegeben. Das Modell gibt die typischen Charakteristika der atmosphärischen Zirkulation wieder, wie z. B. die mittleren Lagen der Islandtiefs, des Azorenhochs und der Tiefdruckbahnen, ohne dabei bestimmte Wetterlagen zu simulieren (DLR: <http://www.pa.op.dlr.de/echam/>).

Auf der Grundlage von ECHAM wurden komplexere gekoppelte Modellsysteme entwickelt, die auch andere Komponenten des Klimasystems erfassen: Ozean-Atmosphärenmodelle (ECHAM4-OPYC3, seit September 2005 das Nachfolgemodell ECHAM5-MPI/OM T36L31 mit höherer horizontaler Auflösung und entscheidend verbesserter Modellphysik, insbesondere des Wasserkreislaufes [KÜCHLER 2009; ROECKNER et al. 2003; JUNGCLAUS et al. 2006]). In neueren Versionen (z. B. MPI-ESM-LR als Nachfolger des ECHAM5-MPI/OM) wird versucht, die Dynamik der Vegetation und die Atmosphärenchemie inklusive deren Rückkopplungen abzubilden (KÜCHLER 2009, persönliche Mitteilung KREIENKAMP 2012).

Die Simulationsläufe der globalen Klimamodelle werden auf der Grundlage von IPCC-Emissionsszenarien (SRES-Szenarien: Special Report on Emission Scenarios and Post-SRES-Szenarien) durchgeführt.

Insgesamt existieren derzeit 40 SRES-Szenarien, die vier Szenarienfamilien zugeordnet werden: A1 – A2 – B1 – B2. Diesen Szenarienfamilien liegt eine Koppelung unterschiedlicher sozioökonomischer Ausgangsannahmen zugrunde, weil man davon ausgeht, dass diese für die zukünftige Emissionsentwicklung verantwortlich sind. Wichtige Einflüsse auf die sozioökonomischen Strukturen haben etwa die Anzahl der auf der Erde lebenden Menschen, der Umgang mit Energie und Ressourcen sowie die technologische Entwicklung. In den Szenarienfamilien werden diese Einflussgrößen miteinander kombiniert (Szenarienbeschreibung nach Bundesministerium für Naturschutz, Umwelt und Reaktorsicherheit 2008; IPCC 2007; LATIF 2003).

*Die A1-Szenarien-Familie* beschreibt eine zukünftige Welt mit anhaltend hohem Wirtschaftswachstum, einem schnellen technologischen Fortschritt und einer bis etwa 2050 wachsenden Weltbevölkerung. Die Szenarien gehen davon aus, dass Regionen zusammenwachsen werden. Die A1-Szenarien-Familie teilt sich in drei Gruppen auf, die sich in ihrer technologischen Ausrichtung unterscheiden:

- fossil-intensiv (A1FI)
- Übergang zur Nutzung nichtfossiler Energiequellen (A1T) mit schneller Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes
- ausgewogene Nutzung aller Quellen (A1B)

Mittels der *A2-Szenarien-Familie* wird eine sehr heterogene Welt mit einer wachsenden Bevölkerung charakterisiert. Die Grundthemen sind Autarkie und Bewahrung lokaler Identitäten. Die wirtschaftliche Entwicklung ist vorwiegend regional orientiert, das Pro-Kopf-Wirtschaftswachstum und technologische Veränderungen verlaufen langsamer als in anderen Szenarien.

*Die B1-Szenarien-Familie* beschreibt eine sich näher kommende Welt und legt die Bevölkerungstrends der A1-Szenarienfamilie zugrunde. Diese Szenarien sehen eine rasche Strukturänderung in der Wirtschaft in Richtung Dienstleistungs- und Informationswirtschaft bei gleichzeitigem Rückgang des Materialverbrauchs und der Einführung von sauberen und ressourcen-effizienten Technologien. Das Schwergewicht liegt auf globalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit einschließlich erhöhter sozialer Gerechtigkeit, aber – wie bei allen SRES-Szenarien – ohne zusätzliche Klima-Initiativen. Bei diesem Szenario wird der zukünftige CO<sub>2</sub>-Ausstoß am stärksten reduziert.

*Die B2-Szenarien-Familie* kennzeichnet eine Welt mit dem Schwerpunkt auf lokalen Lösungen für eine wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit. Es ist eine Welt mit einer stetig, jedoch langsamer als in A2 ansteigenden Weltbevölkerung, einer wirtschaftlichen Entwicklung auf mittlerem Niveau und weniger raschem, dafür vielfältigerem technologischem Fortschritt als in den B1- und A1-Modellen. Obwohl das Szenario auch auf Umweltschutz und soziale Gerechtigkeit ausgerichtet ist, liegt der Schwerpunkt auf der lokalen und regionalen Ebene.

Alle Klimamodellsimulationen - unabhängig von den vorgegebenen Emissionsszenarien – zeigen einen Temperaturanstieg in den kommenden Jahrzehnten. Die Höhe dieses Anstiegs hängt vom Emissionsszenario ab: Im B1 Szenario liegt die Bandbreite bei 1.1 bis 2.9 Grad Celsius, im A1FI-Szenario bei 2.4 bis 6.4 Grad Celsius. Für die Simulationsrechnungen mit regionalen Klimamodellen wird im Allgemeinen aus jeder Familie ein so genanntes „Marker“-Szenario ausgewählt, das die typische Charakteristik der jeweiligen Familie wiedergibt (TREBER 2008).

Die genannten SRES-Szenarien beschreiben die zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen unter der Annahme, dass keine politischen Maßnahmen in dem Bereich des Klimaschutzes unternommen werden. Daher werden sie auch als passive Referenzszenarien bezeichnet.

*Post-SRES-Szenarien* stellen dagegen zusätzlich die Auswirkungen alternativer Klimapolitiken dar. Es wird modelliert, wie sich ein Szenario verändern könnte, wenn zum Beispiel die CO<sub>2</sub>-Emissionen stabilisiert würden. Post-SRES-Szenarien werden deshalb auch Stabilisierungsszenarien genannt (nach Bundesministerium für Naturschutz, Umwelt und Reaktorsicherheit 2008, IPCC 2007; LATIF 2003). Die Stabilisierungsszenarien basieren auf den Referenzszenarien A1FI, A1B, A1T, B1 und B2. Für die Post-SRES-Szenarien wurden bisher keine „Marker“-Szenarien mit regionalen Klimamodellen für Sachsen berechnet.

Bis zum 5. Sachstandsbericht des IPCC (voraussichtlich 2013/2014) werden neue Emissionsszenarien entwickelt, die auf einem anderen Prinzip der Kategorisierung basieren (nach TREBER 2008). Dabei gibt es einen Paradigmenwechsel in der Art und Weise, wie die Szenarien quantifiziert werden. Bisher wurden die Szenarien durch ihre Stabilisierungskonzentration charakterisiert. Es wurde also angegeben, in welchen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (bzw. CO<sub>2</sub>-Äquivalenzkonzentrationen) - angegeben in ppm - die Szenarien am Ende der Betrachtungsperiode münden.

Im Zentrum der neuen Szenarien steht der Strahlungsantrieb (gemessen in Watt pro Quadratmeter [W/m<sup>2</sup>]). Die Bezeichnung soll sich in "*Representative Concentration Pathways*" (RCP, "Repräsentative Konzentrations-Pfade") ändern. 'Pathways' (also 'Pfade' oder 'Verläufe') soll betonen, dass es der primäre Zweck ist, zeitabhängige Projektionen atmosphärischer Treibhausgaskonzentrationen zu liefern. Es ist nicht allein das Stabilisierungsniveau, das von Interesse ist, sondern auch der Weg, der dazu führt (TREBER 2008). Die neuen Szenarien werden eine kurzfristige ('near term' - bis 2035) und eine langfristige ('long term' - bis 2100) Zeitskala aufweisen, für einige Anwendungen reicht der Horizont bis zum Jahr 2300.

Unterschieden wird zwischen vier verschiedenen Pfaden (RCPs), und zwar

- einem hohen anthropogenen Strahlungsantrieb, der im Jahr 2100 8.5 W/m<sup>2</sup> übersteigt und auch danach noch zunimmt,
- zwei mittleren Szenarien, deren Strahlungsantriebe im Jahr 2100 bei 6 W/m<sup>2</sup> bzw. 4.5W/m<sup>2</sup> liegen und
- einem niedrigen Strahlungsantrieb (3 W/m<sup>2</sup>), der deutlich vor dem Jahr 2100 erreicht wird und dann zurückgeht.

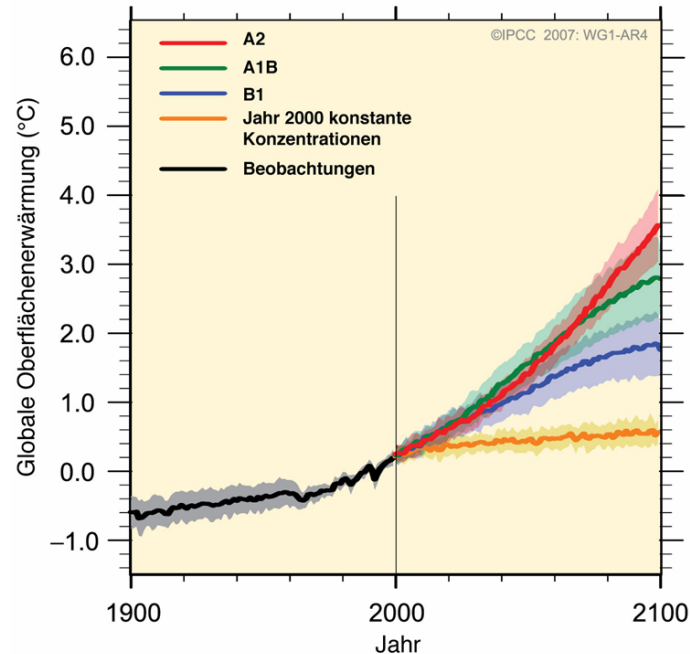
Für das 'kurzfristige Szenario' bis 2035 wird ausschließlich der "Representative Concentration Pathway" betrachtet, der sich beim Strahlungsantrieb von 4.5 W/m<sup>2</sup> stabilisiert. Vorschläge für integrierte Szenarien, die insbesondere eine gekoppelte Analyse von Vermeidung, Anpassung und verbleibenden Klimaschäden beinhalten, sollen bis Frühjahr 2012 erarbeitet werden (TREBER 2008). Eine Übersicht befindet sich in MOSS et al. (2010).

Die simulierten Trends der Lufttemperatur zeigen, dass bis Mitte des Jahrhunderts keine markanten Unterschiede zwischen den bislang vorgegebenen Emissionsszenarios auftreten.

Das ändert sich in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts. Bis 2100 ist eine erhebliche Spreizung der Temperaturentwicklung je nach Emissionsszenario festzustellen, was bedeutet, dass sich die heutige Klimaschutzpolitik im Laufe der nächsten Jahrzehnte immer drastischer hinsichtlich des konkreten Ausmaßes des Klimawandels widerspiegeln wird (siehe Abbildung 1). Viele natürliche Rückkopplungsmechanismen können in den globalen Modellen bislang nur unzureichend simuliert werden. So bestehen z. B. größere Unsicherheiten im Hinblick auf die Geschwindigkeit des Abschmelzens des arktischen und grönländischen Eises, die erwärmungsbedingte Freisetzung von Treibhausgasen aus terrestrischen und marinen Quellen (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) und den Einfluss der Klimaerwärmung auf die CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch marine Kleinstlebewesen. Biologische Faktoren werden derzeit noch nicht ausreichend berücksichtigt. Weil viele der heute bekannten Mechanismen letztendlich positive Rückkopplungen darstellen, ist eher mit einer deutlichen Beschleunigung der Erderwärmung gegenüber den Modellaussagen zu rechnen als mit einer Ab-

schwächung dieses bereits in Gang gekommenen Prozesses. Es gibt derzeit keinerlei wissenschaftlich begründbare Anzeichen für einen Selbststabilisierungsmechanismus, der dieser Entwicklung entgegenwirken könnte (KÜCHLER 2009).

Ein optimistisches (z. B. B1) Szenario erscheint anhand der Projektionen und der aktuellen Entwicklung wenig realistisch. Die momentane globale Emissionsentwicklung der Treibhausgase lässt zudem deutlich erkennen, dass die jährlichen Emissionen über denen des vom IPCC festgelegten „pessimistischsten“ Szenarios A1FI (Erwärmung bis 6.4 Grad Celsius) liegen. Eine Berechnung des A1FI-Szenarios durch ein regionales Klimamodell liegt bisher nicht vor.



**Abbildung 1: Übersicht über die aus Klimamodellen abgeleitete mittlere globale Erwärmung (im Vergleich zu 1980-1999) für verschiedene Treibhausgas-Emissionsszenarios (Quelle: IPCC 2007)**

Das Mischszenario A1B wird derzeit international am häufigsten verwendet. Deshalb wurde dieses Szenario als Grundlage der Klimasimulationen in dieser Studie gewählt. Das A1B-Szenario kombiniert eine ökonomisch orientierte Welt mit rapider Entwicklung und Verteilung technologischer Neuerungen und fortschreitender Angleichung der Lebensbedingungen. So wird angenommen, dass sich das Bevölkerungswachstum auf dem Niveau von 2050 stabilisiert, begleitet von einem mittleren CO<sub>2</sub> Anstieg.

Weil sich die Unterschiede zwischen den Szenarien ab Mitte des Jahrhunderts deutlich ausprägen, wird sowohl eine **Simulation für den Zeitraum 2041-2050** als auch eine **Simulation für den Zeitraum 2091-2100** im Vergleich zu einem **Referenzzeitraum (1998-2007)** durchgeführt. Aufgrund des Arbeitsaufwandes ist eine Begrenzung auf nur ein Emissionsszenario und 10-Jahres-Abschnitte notwendig.

### 2.1.2 Regionale Klimamodelle

Die globalen Zirkulationsmodelle sind aufgrund der komplexen Prozesse und der zur Verfügung stehenden Computerkapazitäten in ihrer räumlichen Modellauflösung limitiert. Bei einer Auflösung des horizontalen Gitterabstandes von 1.875° wird ein Gebiet wie Europa nur sehr grob repräsentiert.

Mit zunehmender Rechnerleistung kann in Zukunft die räumliche Auflösung globaler Klimamodelle weiter erhöht werden. Eine weitere Alternative sind globale Zirkulationsmodelle mit regional variabler horizontaler Auflösung (IPCC 2007). Trotz dieser Bemühungen ist die Erstellung regionaler Klimaszenarien mit einer horizontalen Auflösung unterhalb von 100 km auf regionale Klimamodelle angewiesen, die die Ergebnisse der globalen Modelle für eine ausgewählte Region verfeinern (WALKENHORST & STOCK 2009).

Modelltechnisch wird dieses Problem mit Hilfe der sogenannten Downscaling-Methode, also dem Herunterskalieren der Antriebsdaten eines globalen Zirkulationsmodells auf eine feinere regionale Auflösung, gelöst. Dabei muss zwischen dem *dynamischen* und dem *statistischen Downscaling* unterschieden werden.

*Dynamische regionale Klimamodelle* basieren auf den gleichen Prinzipien wie globale Klimamodelle, sie betrachten lediglich einen Ausschnitt auf der Erde. Ihre horizontale Auflösung liegt bei unter 50 km bis hinunter zu wenigen Kilometern. Beim dynamischen Downscaling wird ein höher auflösendes Modell, das die Daten des globalen Modells als Randbedingungen und Antrieb verwendet, für einzelne Regionen in das gröbere globale Modell eingebettet (sogenanntes „nesting“). Wird solch eine eingebettete („genestete“) Modellkette mehrmals verwendet (also von einem globalen Klimamodell zu einem regionalen Modell mit grober Auflösung, dann zu einem regionalen Klimamodell mit feiner Auflösung), so kann die räumliche Auflösung der betrachteten Region schrittweise erhöht werden (KLIWA-Berichte Heft 9 [2006]).

Die *statistischen Methoden* gehen davon aus, dass zwischen der großräumigen Druck- und Temperaturverteilung und den Witterungsgrößen an ausgewählten Standorten (z. B. gemessenen Temperatur- und Niederschlagsreihen an der Bodenstation) statistische skalenübergreifende Beziehungen bestehen. Diese Beziehungen werden aus den langjährigen Messdatenreihen abgeleitet und sind in der Regel für jede Region unterschiedlich (WALKENHORST & STOCK 2009). Beim statistischen Downscaling werden a) charakteristische Wetterlagen, deren typisches Wetter mit einem Regionalmodell berechnet wird (Modell WETTREG) definiert oder b) generelle Aussagen zu großskaligen Klimavariationen (abgeleitet aus dem globalen Modell) zur Simulation kleinskaligen Klimaverhaltens auf der Basis von Beobachtungsdaten unter Verwendung statistischer Verfahren verwendet (Modell STAR) (nach von STORCH et al. 1999, KLIWA-Berichte Heft 4 [2004]; GESTENGARBE et al. 2003). Man setzt dabei voraus, dass die lokalen Änderungen ausschließlich durch Änderungen der großräumigen Zirkulationsmuster ausgelöst werden (KÜCHLER 2009).

Nach WALKENHORST & STOCK 2009 haben dynamische Modelle im Vergleich zu statistischen folgende Vorteile (vgl. IPCC 2007):

- Weil sie direkt die atmosphärischen Prozesse abbilden, können sie Szenarien berechnen, die weit von den heutigen klimatischen Verhältnissen entfernt sind. Sie sind also prinzipiell auch für die Modellierung fernerer Varianten der Zukunft geeignet, weil sie nicht wesentlich auf die Stationarität von verwendeten statistischen Beziehungen angewiesen sind. In Form der Parametrisierungen subskaliger Prozesse verwenden allerdings auch die dynamischen Modelle statistische Beziehungen (von denen dann ebenfalls angenommen werden muss, dass sie in einem veränderten Klima weiter gültig sind).
- Die Kohärenz zwischen verschiedenen Klimavariablen ist automatisch gewährleistet, d. h. alle Klimavariablen passen zueinander, weil die modellierten Prozesse durch physikalische Gleichungen beschrieben werden. Diese Kohärenz ist bei statistischen Verfahren nicht notwendigerweise gegeben.

Andererseits haben statistische Modelle im Vergleich zu dynamischen folgende Vorteile (nach WALKENHORST & STOCK 2009):

- Sie liefern für ähnliche klimatische Verhältnisse wie diejenigen, aus denen die statistischen Beziehungen abgeleitet sind, in der Regel zuverlässigere Ergebnisse als dynamische Modelle und eignen sich daher besonders für kurz- bis mittelfristige Klimaprojektionen. Allerdings müssen dafür langjährige Messdatenreihen zur Verfügung stehen, die in Europa jedoch meist verfügbar sind.
- Der Arbeitsaufwand zur Erstellung statistischer Modelle ist üblicherweise geringer. Zudem erfordern sie in der Regel nur relativ geringen Rechenaufwand und sind folglich auch nicht – wie die derzeitigen dynamischen Modelle – auf leistungsfähige Großrechner angewiesen.
- Mit statistischen Modellen ist theoretisch eine beliebig hohe räumliche und zeitliche Auflösung erreichbar, die die Verfügbarkeit entsprechend hoch aufgelöster langjähriger Messdatenreihen voraussetzt.

Großräumige Modellfehler im zugrunde gelegten globalen Klimamodell haben Einschränkungen für die dynamische regionale Klimamodellierung zur Folge, denn Änderungen oder Fehler pflanzen sich fort und wirken sich direkt auf die Modellgüte des dynamischen regionalen Klimamodells aus. Die Realitätsnähe der dynamischen Modelle ist damit entscheidend von der Güte des verwendeten globalen Klimamodells abhängig.

Auch die statistischen regionalen Klimamodelle übernehmen die Ergebnisse der globalen Klimamodelle, sodass statistisch basierte Regionalisierungsverfahren ebenso ungenaue Ergebnisse liefern, wenn die globalen Klimasimulationen nicht präzise



sind. Aufgrund der Auswertung statistischer Zusammenhänge aus beobachteten meteorologischen Größen wird die Information aus dem globalen Modell jedoch im Vergleich zu den dynamischen regionalen Modellen mit einer geringeren Intensität genutzt. Damit wird der eventuelle Fehlereinfluss des globalen Klimamodells auf die regionalen Klimaszenarien geringer.

In Deutschland werden derzeit vier regionale Klimamodelle angewendet: die beiden dynamischen Klimamodelle REMO und CLM (jetzt COSMO-CLM) und die beiden statistischen Modelle WETTREG (unter dem Namen WEREX in Sachsen) und STAR. Für alle vier Modelle liegen ausgewertete Projektionsergebnisse für das Gebiet des Freistaates Sachsen vor (Forschungsvorhaben REGKLIM; KREIENKAMP et al. 2008). Die vier verschiedenen Modelle werden in anderen Forschungsvorhaben (KLIWA-Berichte Heft 9 [2006]; FESKE 2009; SPEKAT et al. 2007; JACOB et al. 2008) ausführlich beschrieben. Hier erfolgt deshalb nur eine Kurzvorstellung der einzelnen Modelle. In den nachfolgenden Abschnitten werden die vier regionalen Modelle u. a. unter Einbeziehung der Ergebnisse aus dem Projekt REGKLIM (KREIENKAMP et al. 2008) hinsichtlich ihrer Eignung für die Simulation des zukünftigen regionalen Klimas in Sachsen diskutiert. Von Interesse ist zudem die maximal mögliche zeitliche Auflösung der projizierten Niederschlagsdaten.

### 2.1.2.1 Dynamische regionale Klimamodelle

#### REMO

Das dreidimensionale hydrostatische regionale Klimamodell REMO (**R**egional **M**odell) wurde vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg (MPI-M) entwickelt. REMO ist aus dem Europa-Modell des Deutschen Wetterdienstes (DWD) hervorgegangen (MAJEWSKI 1991; MAJEWSKI et al. 1995 in JACOB et al. 2008; UBA-Bericht 11/2008: UBA-FB 000969). Es ist ein atmosphärisches Zirkulationsmodell, das die relevanten physikalischen Prozesse dynamisch berechnet. Hierdurch werden insbesondere nicht-lineare Zusammenhänge berücksichtigt. Subskalige, das heißt nicht vom Modell auflösbare physikalische Prozesse wie z. B. die Konvektionsbildung, werden durch eine physikalische Parametrisierungen berechnet (JACOB 1997; JACOB 2001; JACOB et al. 2001; JACOB et al. 2007 in JACOB et al. 2008 in UBA-Bericht 11/2008: UBA-FB 000969).

Der Erdboden bzw. die Meeresoberfläche stellen dabei den unteren Rand des Modells dar. REMO kann sowohl mit Re-Analysedaten als auch mit Informationen aus globalen Klimamodellen betrieben werden, d. h. REMO wird einmal im Simulationsgebiet mit globalen Daten initialisiert und dann während der Modellrechnung an den seitlichen Rändern mit sich kontinuierlich ändernden globalen Daten angetrieben. Am Rand werden nur Temperatur, Druck, Wind und Luftfeuchtigkeit vorgegeben, alle anderen Größen werden von REMO direkt berechnet. Die im Stundenintervall prognostizierten Variablen des Modells sind die horizontalen Windkomponenten, der Druck an der Bodenoberfläche, die Temperatur, die spezifische Feuchte und der Flüssigwassergehalt in der Atmosphäre.

Die Landflächen werden durch ihre Höhe über NN, ihre Oberflächenbeschaffenheit, Rauigkeit und ihre Bodencharakteristik beschrieben, wobei zu jedem Modellzeitschritt in REMO Bodentemperaturen für fünf Erdbodenschichten bis zu einer Tiefe von 10 m berechnet werden, ebenso wie eine repräsentative Bodenfeuchte. Die Bodenfeuchte wird dabei als absoluter Speicher definiert. Die absolute Speicherkapazität ist mit Werten der Feldkapazität belegt, wird im Modell aber als absolutes Maximum der Bodenfeuchte verwendet. Verschiedene physikalisch beschriebene Prozesse können diesen Speicher ändern. Dazu zählen Verdunstung über nacktem Boden, Transpiration der Pflanzen sowie Infiltration nach Regen oder Schneeschmelzeereignissen. Die Werte repräsentieren keine realen bzw. die zu erwartenden Bodenfeuchten (persönliche Mitteilung HAGEMANN, MPI Hamburg, 2009).

Zusätzlich zu den angegebenen Variablen liegen die folgenden Größen im 6-Stunden-Intervall für jede Atmosphärenschicht vor: U, V und W Komponente des Windes, Temperatur, Wasserdampfgehalt und Flüssigwasser, Geopotential der vertikalen Schichten, Wolkenbedeckung und turbulente kinetische Energie.

Die durch das Umweltbundesamt für Gesamt-Deutschland in Auftrag gegebene Modellrechnung auf Basis des dynamischen Modells REMO verfügt über eine räumliche Auflösung von 10x10 km. Die Modellregion umfasst die Gesamtflächen der Bundesrepublik Deutschland, Österreichs und der Schweiz (FESKE 2009, vgl. JACOB et al. 2008).

Die Modellergebnisse liegen in einer Auflösung von einer Stunde vor. Theoretisch ist eine höhere Auflösung möglich. In einem Hamburger Projekt will der Modellentwickler zunächst 5-min-Summen erzeugen und mit beobachteten Niederschlägen verglei-

chen. Erst nach Abschluss dieses und weiterer Tests soll über das Vorgehen in dieser Richtung entschieden werden (persönliche Mitteilung JACOB, MPI, 2009).

### **CLM, COSMO-CLM (CCLM)**

Das dynamische, nicht-hydrostatische Climate Local Model (CLM) ist eine Weiterentwicklung des seit 1999 für die Wettervorhersage verwendeten dynamischen Lokalmodells des Deutschen Wetterdienstes (LM). Ziel ist, die Entwicklung atmosphärischer Strömungen auf einer räumlichen Skala, auf der nicht-hydrostatische Effekte eine große Rolle spielen, genauer vorherzusagen. Ursprünglich wurde es für Modellauflösungen von 50 km bis 50 m entworfen. Es werden ungefilterte dynamische Gleichungen (Euler'sche Gleichungen) benutzt, um Einschränkungen bezüglich der räumlichen Auflösung als auch des Modellgebietes zu vermeiden.

Im Sommer des Jahres 2002 wurde die erste Klimaversion des LM, das CLM, am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) fertig gestellt. 2004 wurde das CLM erstmals am Forschungszentrum Geesthacht (GKSS) für die Simulation eines Klimaszenarios im von der EU geförderten Projekt PRUDENCE (CHRISTENSEN 2005) eingesetzt.

Sukzessive erfolgte der Aufbau einer wissenschaftlichen Gemeinschaft zur koordinierten Nutzung und Weiterentwicklung des CLM, der so genannten "CLM-Community", zu der mittlerweile mehr als 70 wissenschaftliche Mitglieder aus 21 Institutionen zählen. Die CLM-Community wird durch den Lehrstuhl für Umweltmeteorologie an der Brandenburgischen Technischen Universität in Cottbus koordiniert (Dr. Andreas Will). Die technische Durchführung von Modellsimulationen erfolgt durch die Gruppe Modelle & Daten auf Hochleistungsrechnern des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) in Hamburg. Die Rechnungen werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und DKRZ-Gesellschaftern gefördert.

Eine der wesentlichen Ideen in der CLM-Entwicklung war, dass ein Modell sowohl für die Wettervorhersage als auch für Klimasimulationen gleichermaßen anwendbar sein sollte. Daher hielten die Wissenschaftler aus der CLM-Community immer engen Kontakt mit den Entwicklern des LM am DWD. Ende 2007 resultierte daraus eine Zusammenführung des CLM mit dem LM zum einheitlichen regionalen Atmosphärenmodell für Wettervorhersage und Klima mit einer Standardauflösung zwischen 7 und 50 km. Der Name CLM änderte sich in COSMO-CLM oder kurz CCLM. Zwei große Gruppen (das Consortium for Small-scale Modelling, COSMO, in dem mehrere europäische Wetterdienste zusammenarbeiten, und die Climate Limited-area Modelling Community, CLM-Community) arbeiten an der Weiterentwicklung des gemeinsamen Modells (ROCKEL 2008, MEIßNER 2008).

Die einzelnen nationalen Wetterdienste betreiben jeweils eigene operationelle Anwendungen dieses Modells (z. B. COSMO-EU und COSMO-DE beim Deutschen Wetterdienst [DWD], COSMO-7 und COSMO-2 bei MeteoSchweiz). Die Anwendung COSMO-DE wird seit 2007 zur Kurzfristvorhersage mit einer horizontalen Gitterweite von 2.8 km beim DWD eingesetzt (KERN 2009). Durch diese hohe räumliche Auflösung wird die Parametrisierung der Konvektion und der damit verbundenen Rückkopplungen auf großräumigere Skalen – wie in gröber aufgelösten Modellen üblich – überflüssig, was die damit verbundenen Einschränkungen aufhebt. Des Weiteren werden in hoch aufgelösten Modellen topographische Effekte, die zur Konvektionsauflösung führen, realistischer dargestellt. Hierzu gehören zum Beispiel lokale, thermisch induzierte Windsysteme (KERN 2009). Die Daten werden über die CERA-Datenbank des World Data Center for Climate (WDCC) archiviert und kostenlos bereitgestellt. Ein- und Ausgabeparameter werden auf der Homepage der Gruppe Modelle & Daten von der Servicegruppe Anpassung (SGA) zusammengestellt (Parameterliste CLM: <http://sga.wdc-climate.de>).

Die Daten liegen in einer Auflösung von einer Stunde vor. Arbeiten, um eine höhere Auflösung der Klimadaten aus den Projektionen zu erzielen, sind prinzipiell möglich (persönliche Mitteilung MEINKE, GKSS, 2009), aber nicht vorgesehen. Die Forschungsgruppe betont, dass keine belastbaren Daten in solch hoher Auflösung generiert werden können (persönliche Mitteilung BÖHM im Auftrag von GERSTENGARBE, PIK Potsdam, 2009).

#### **2.1.2.2 Statistische regionale Klimamodelle**

##### **WETTREG – wetterlagenbasierte Regionalisierungsmethode**

Die Entwicklung des Modells WETTREG wurzelt in Studien und Projekten, die seit dem Jahr 1994 im Rahmen des BMBF-Schwerpunktes Klimavariabilität und Signalanalyse durchgeführt und vorgestellt wurden. Es folgten Studien, die auf regionale Besonderheiten einzelner Bundesländer eingingen, Statistiken auf Tageswertbasis erzeugten und mit denen auch zunehmend

komplexere Aussagen z. B. zu Extremen oder Projektionen mit längeren Zeithorizonten möglich wurden (in SPEKAT et al. 2007; ENKE 2001, ENKE 2002, ENKE 2003a-d). Das Modell wurde von der Firma METEO-RESEARCH/CEC - Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH entwickelt.

WETTREG ist ein statistisches Verfahren, das die Vorteile der dynamischen Modelle mit den Möglichkeiten eines statistischen Wettergenerators zur Erzeugung von Stationszeitreihen verbindet. Zu dessen Anwendung sind drei Datenkomponenten notwendig: Re-Analysedaten für die Beschreibung des Klimas der Jetztzeit, Ergebnisse von Szenariorechnungen mit einem globalen Klimamodell und Messdaten von Klimastationen zur Herleitung der statistischen Beziehungen (KREIENKAMP et al. 2010).

Grundgedanke des Re-Analyse-Ansatzes ist es, eine Klimatologie der Atmosphäre in drei Dimensionen auf der Basis von Daten hoher Homogenität in Zeit und Raum zu erzeugen. Atmosphärische Messdaten wurden und werden in einer Vielzahl von Verfahren, die sich über die Zeit verändert haben, analysiert, so dass es nicht bruchlos möglich ist, Analysen aus unterschiedlichen Quellen und für unterschiedliche Perioden zu betrachten. Erst durch ihr Re-Analysieren ist ein auf homogenen Daten beruhendes dreidimensionales Bild des Klimas der Jetztzeit möglich. Eine ausführliche Darstellung der Re-Analyse-Philosophie sowie der Entwicklungs-Phasen, insbesondere beim European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF), findet sich in WOODS (2006) (KREIENKAMP et al. 2010).

Es gibt zwei Re-Analyse-Datensätze, die im Laufe der Zeit auch für WETTREG Verwendung fanden: die NCEP/NCAR Re-Analysen (KALNAY et al. 1996) und die ERA40-Re-Analysen (UPPALA et al. 2005 in KREIENKAMP et al. 2010). Erstere werden stetig aktualisiert, während die Zweitgenannten nur bis 2002 reichen, aber dafür eine höhere räumliche Auflösung bieten. Sowohl NCEP- als auch ERA40-Daten sind in Bereichen mit guter Datenbelegung nur geringfügig unterschiedlich (GREATBATCH & RONG 2006 und WANG et al. 2006 in KREIENKAMP et al. 2010). Aus den Datensätzen werden Zirkulationsmuster bestimmt, deren Kopplung mit dem lokalen Klima ein zentraler Aspekt von WETTREG ist (KREIENKAMP et al. 2010).

Die Strategie von WETTREG beruht auf folgenden Annahmen (SPEKAT et al. 2007):

- Globale Klimamodelle sind in der Lage, das Klima großräumig in hinreichender Qualität zu beschreiben.
- Es gibt semi-stabile Muster in den atmosphärischen Feldgrößen, die wiederkehrend eine bestimmte Klasse von lokalen Konsequenzen (hohe/niedrige Temperatur, starker/geringer Niederschlag etc.) hervorrufen.
- Unter dem Antrieb von Emissions-Szenarios verändert sich die Häufigkeitsverteilung der vom globalen Klimamodell berechneten atmosphärischen Muster.
- Die Beziehungen der Klassen lokaler Konsequenzen der atmosphärischen Muster sind auch in der Zukunft den derzeit bestehenden Beziehungen sehr ähnlich. Die Repräsentation des sich ändernden Klimas in den von WETTREG erzeugten lokalen Simulationszeitreihen ist statistisch zutreffend, so dass Aussagen über Mittelwerte, Varianz und Extreme von Wetterelementen an den Orten der Klimamessreihen möglich sind.

Das bisherige WETTREG-Konzept wurde in einer Länder-Studie (KREIENKAMP et al. 2010) zum Transwetterlagenkonzept erweitert, in dem nicht mehr nur Muster des gegenwärtigen Klimas, sondern auch solche, die erst in Zukunft auftreten, entwickelt und in das Verfahren implementiert werden. Seit 2010 ist das Transwetterlagenkonzept Bestandteil von WETTREG.

Die zeitliche Auflösung der simulierten Zeitreihen ist dabei so groß wie die zeitliche Auflösung der zur Verfügung stehenden Messreihen der Klima- bzw. Niederschlagsstationen (KREIENKAMP et al. 2010). Liegen die Input-Niederschlagsdaten in 5-Minuten-Summen aus gemessenen Zeitreihen vor, so ist es mit WETTREG möglich, Niederschlagszeitreihen für zukünftige Klimaszenarien in einer ebenso hohen Auflösung zu erzeugen.

### STAR – Statistisches Regionalmodell

Das statistische Modell STAR (Statistisches Regionalmodell) wurde am Potsdam-Institut für Klimaforschung (PIK) von GERSTENGARBE & WERNER (1997) entwickelt. Basierend auf einem großräumig vorgegebenen Temperaturtrend von +1.4 °C für 2001-2055, wurde ein regionales Klimaszenario bis 2055 im Rahmen des GLOWA-Elbe-Projektes für Deutschland erstellt. Der Output besteht aus Tageswerten für elf Klimavariablen (Mittel-, Maximum- und Minimum-Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Wasserdampfdruck, Sonnenscheindauer, Bedeckungsgrad, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit) für mehr

als 2.000 Wetterstationen in Deutschland. Die Klimaszenarien sind am PIK in Daten- und Kartenform verfügbar (WALKENHORST & STOCK 2009).

#### **Verfahrensweise:**

Langjährige Messreihen (Tagesmittelwerte) werden mit einem statistischen Verfahren so aufbereitet, dass sie in Form von Szenarienzeitreihen aus globalen Klimamodellen entnommene regionale klimatische Änderungen (z. B. einen Temperaturtrend) wiedergeben. Die aus einem globalen Klimamodell abgeleiteten zukünftigen Änderungen eines meteorologischen Parameters werden mit langjährigen Beobachtungsreihen eines Untersuchungsgebietes so verknüpft, dass mit Hilfe des statistischen Ansatzes die Änderung dieses Parameters für das Gebiet abgeschätzt werden kann. Als Grundannahme wird die großräumige (im globalen Klimamodell simulierte) Änderung meteorologischer Größen (speziell der langjährigen Mittelwerte der Temperatur) regional als richtig angesehen.

Aus der Beobachtungsreihe der ausgewählten Bezugsgröße wird zunächst eine Zufallszahlenreihe simuliert, auf die der globale Trend aufgeprägt wird. Anschließend wird eine Klassifizierung der Bezugsgrößen der über sie bestimmenden Parameterkombinationen (z. B. Erhaltungsneigung, Tagesmaximum, Tagesminimum) für die Beobachtungsreihe nach einem speziell entwickelten Cluster-Analyseverfahren vorgenommen. Jetzt kann für jede Parameterkombination eines jeden Zeitschritts der zuvor simulierten Reihe die Zuordnung in ein Cluster der Beobachtungsreihe erfolgen (GERSTENGARBE & WERNER 1997).

Für die gemessenen Tageswerte (z. B. Tagesmitteltemperatur) eines jeden Jahres werden die Abweichungen vom Jahresmittelwert bestimmt und - unter Beachtung der Rangfolge zufällig ausgewählter Jahre - der simulierten Zeitreihe der Jahresmittel zugeordnet. Die Tageswerte dieser simulierten Zeitreihe ergeben sich also als Summe von Jahresmittel, Änderungswert (Jahrestrend) und Tageswerteabweichung. Die simulierte Zeitreihe wird korrigiert, um den Erhalt statistischer Charakteristika zu gewährleisten. Zwischenergebnis ist eine simulierte Zeitreihe von Tageswerten der Temperatur (<http://www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/STAR/star.html>).

Zur statistischen Absicherung der durchgeführten Berechnungen werden unter Verwendung einer Monte-Carlo-Simulation weitere zufällig erzeugte Realisierungen nach genanntem Prinzip erzeugt.

Aufgrund des statistischen Ansatzes ist es prinzipiell möglich, die Ergebnisse der Klimaprojektion mit STAR in einer höheren Auflösung abzubilden. Als Input sind (wie bei WETTREG auch) hoch aufgelöste und langjährig gemessene Niederschlagsdaten erforderlich. Es sind allerdings keine Arbeiten mit STAR auf diesem Gebiet bekannt. Verfahrensbedingt können die Temperatur- und Niederschlagsmaxima in der Zukunft nur die höchsten Werte der Gegenwart erreichen (KÜCHLER 2009). Es liegen keine Simulationen über das Jahr 2055 hinaus vor.

#### **2.1.2.3 Vergleich und Evaluierung von regionalen Klimaprojektionen für Sachsen**

Im Forschungsvorhaben REGKLIM (KREIENKAMP et al. 2008) wurden die Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen unter Nutzung der Modelle REMO, CLM, WETTREG (hier unter Verwendung der aktuellen sächsischen Variante WEREX IV) und STAR ausgewertet und gegenübergestellt. Für die Modelle liegt eine Vielzahl unterschiedlicher Simulationsläufe vor. Diese umfassen z. B. für WETTREG auch unterschiedliche Modell-Läufe (Lauf 1, Lauf 2, Lauf 3) und Emissionsszenarios (A1B, A2, B1, B2). Der Referenzzeitraum umfasst die Periode von 1961 bis 1990, projiziert wurden die Zeiträume 2031-2050 und 2071-2100 (mit Ausnahme von STAR). Die folgenden Angaben wurden der Evaluierung des Forschungsvorhabens REGKLIM entnommen (KÜCHLER 2009).

*Lufttemperatur-Projektionen:* Der zeitliche Verlauf des relativen saisonalen Temperaturänderungssignals im 21. Jahrhundert lässt sowohl für den Winter als auch für den Sommer einen kontinuierlichen Temperaturanstieg erkennen. Für den Winter ist dabei eine größere dekadische Schwankungsbreite als für den Sommer kennzeichnend. Diese Besonderheit der großen Schwankungsbreite der Wintermitteltemperaturen, die bereits für Mitteleuropa im globalen Vergleich hervortrat, betrifft nach den Modellvorhersagen der regionalen Klimamodelle bis 2100 auch Sachsen (KÜCHLER 2009).

*Niederschlags-Projektionen:* Der zeitliche Verlauf des relativen saisonalen Niederschlagsänderungssignals in Bezug auf den Referenzzeitraum lässt sowohl für den Winter als auch für den Sommer erkennen, dass sehr markante Klimasignale in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zu erwarten sind. Besonders augenfällig kann dies für den Sommer konstatiert werden, wobei

zwischen 2050 und 2070 mit einem gravierenden Änderungssignal zu rechnen ist (starker Rückgang um etwa 20 %; Verharren auf niedrigem Niveau). Für den Winter sind Änderungssignale insofern auffällig, als dass diese vor allem die Amplitude der zu beobachtenden langperiodischen Schwankungen betreffen (starke Zunahme der Maxima von 10-20 auf etwa 40 %). Zwischen diesen liegen mehrere Jahrzehnte umfassende Phasen mit mehr oder weniger dann überdurchschnittlichen Niederschlägen, die als „Erholungsphasen“ mit etwa „jetzt-normalen“ Niederschlägen charakterisiert werden können (nach KÜCHLER 2009).

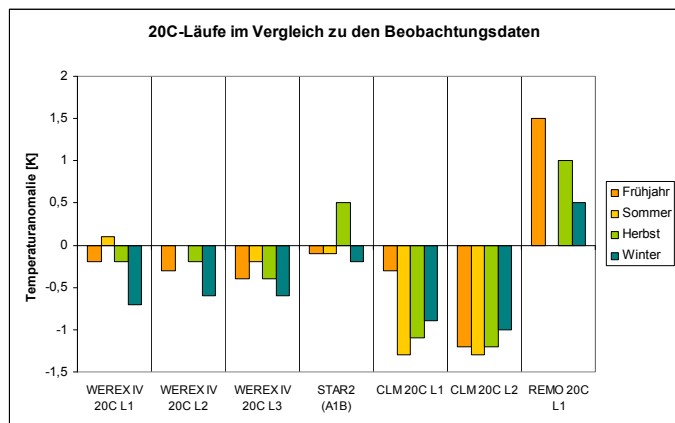
*Klimasignal „Sommertrockenheit“:* Auffällig ist, dass das Klimasignal „Sommertrockenheit“ in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts bei den Projektionen mit den Modellen CLM, REMO und WETTREG (WEREX IV) übereinstimmt. Bei den statistischen Modellen WETTREG (WEREX IV) und STAR tritt dieses bedeutende Klimasignal bereits bei den Projektionen für 2031-2050 hervor. Bei den CLM-Läufen erkennt man ansatzweise ein entsprechendes Signal für 2031-2050. Wie bereits diskutiert, ist nach den REMO-Projektionen allerdings erst zwischen 2050 und 2070 mit einem gravierenden Änderungssignal hinsichtlich „Sommertrockenheit“ zu rechnen (KÜCHLER 2009).

*Klimasignal „Winternässe“:* Das Klimasignal „Winternässe“ kommt in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts vor allem beim Modell STAR und in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts sehr deutlich bei den Projektionen mit den Modellen CLM und REMO zum Ausdruck. Das statistische Modell WETTREG (WEREX IV) lässt hingegen bedeutend schwächere Zunahmen erkennen, die aus Niederschlagsabschwächungen infolge orographisch bedingter Föhnneffekte resultieren dürften. Diese regionale Besonderheit Sachsens ist diagnostisch im deutschlandweiten Vergleich bereits zu beobachten. Das Transwetterlagenkonzept des WETTREG-Modells (WEREX IV) bietet beste Voraussetzungen, die Auswirkungen der erwähnten und insbesondere für Sachsen bedeutsamen strömungsbedingten meteorologischen Prozesse infolge erwarteter Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation zu berücksichtigen. Insofern erscheinen aus heutiger Sicht die Niederschlagsprojektionen des WETTREG-Modells (WEREX IV) als am wahrscheinlichsten. Das Modell STAR berücksichtigt verfahrensbedingt gerade Zirkulationseffekte nicht, sodass vorliegende Aussagen wenig aussagekräftig sein dürften (KÜCHLER 2009).

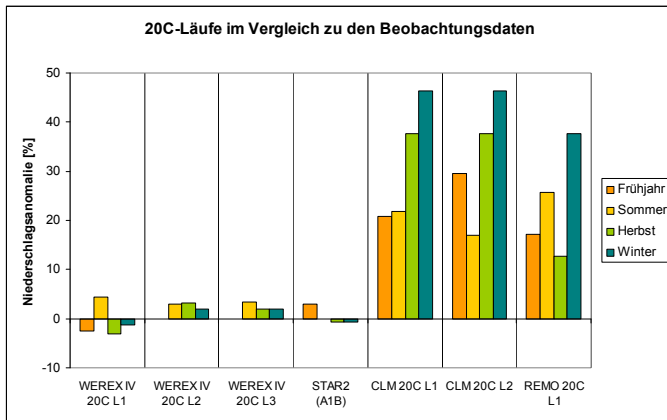
Die *Evaluierung* erfolgte an so genannten Kontroll-Klima-Läufen (20C-Läufe: 20th Century, 1961-1990). Der Kontroll-Klima-Lauf eines Modells entspricht einem Vergleich der simulierten klimatischen Verhältnisse mit den tatsächlich beobachteten Werten.

*Kontroll-Klima (20C-Läufe: Referenzzeitraum 1961-1990): Temperaturen und Niederschläge:* Die statistischen Modelle WEREX IV und STAR zeigen sowohl bei den Temperaturen als auch bei den Niederschlägen eine höhere Übereinstimmung mit den Beobachtungsdaten als die dynamischen Modelle. REMO stellt sich mit Ausnahme des Sommers wärmer, CLM in allen Jahreszeiten kühler dar als die Beobachtungsdaten (Abbildung 2).

Die durch die dynamischen Modelle simulierten Niederschläge fallen deutlich höher aus als die beobachteten Werte, wobei die größten Abweichungen im Winter zu verzeichnen sind (CLM +45 %, REMO +38 %). Die Sommerniederschläge werden von den beiden dynamischen Modellen mit etwa +20 bis +27 % überschätzt. Bei WEREX IV und STAR liegen die Abweichungen zwischen -4 und +5 % (Abbildung 3).



**Abbildung 2: Temperaturen der 20C-Läufe im Vergleich zu den Beobachtungsdaten 1961-1990 für Sachsen (KÜCHLER 2009 aus REGKLIM; KREIENKAMP et al. 2008)**



**Abbildung 3: Niederschläge der 20C-Läufe im Vergleich zu den Beobachtungsdaten 1961-1990 für Sachsen (KÜCHLER 2009 aus REGKLIM; KREIENKAMP et al. 2008)**

*Klima-Projektionen 2031-2050 und 2071-2100:* Aufgrund der verfahrenstechnischen Unterschiede weisen die Projektionen der vier untersuchten regionalen Klimamodelle eine zum Teil große Bandbreite auf. KÜCHLER (2009) gelangt zu folgender Einschätzung der einzelnen regionalen Modelle:

**WETTREG/WEREX IV:** Derzeit erscheinen die Ergebnisse der Klimaszenariorechnungen bei Betrachtung des Zeithorizonts 2050 nach dem WETTREG-Verfahren am wahrscheinlichsten. Es treten nur geringe Differenzen zwischen simuliertem Ist-Zustand und den Messdaten der mittleren Lufttemperatur und der Niederschlagshöhe auf. Mit der Neuberechnung des A1B-Laufes 2010 liegt der erwartete Temperaturanstieg der Sommertemperaturen bis 2100 im plausiblen Rahmen. Das Modell spiegelt regionale Besonderheiten der räumlichen Niederschlagsverteilung sehr gut wider (z. B. Luv- und Lee-Effekte).

**STAR:** Beim Modell STAR fallen die Änderungen im Zukunftsszenario bis auf den a priori willkürlich aufgeprägten Temperaturtrend zu gering aus. Die Temperatur- und Niederschlagsmaxima in der Zukunft können verfahrensbedingt nur die höchsten Werte der Gegenwart erreichen. Die räumliche Niederschlagsverteilung wird plausibel widerspiegelt. Es liegen keine Modellprojektionen für den Zeitraum 2050-2100 vor.

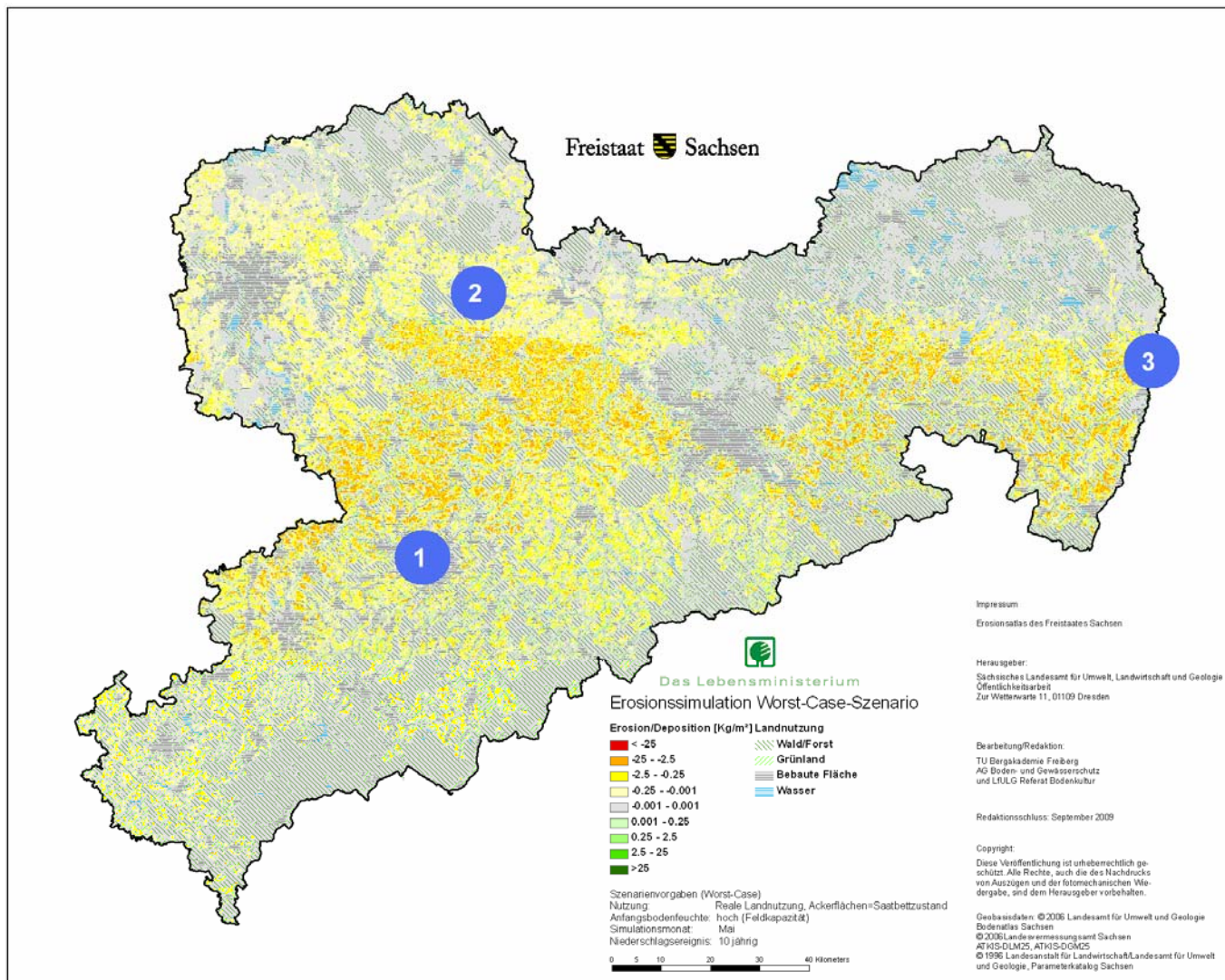
**REMO und CLM:** Grundsätzlich wird deutlich, dass die dynamischen Modelle CLM und REMO sowohl bei der Lufttemperatur als auch beim Niederschlag geringere Übereinstimmungen mit den Beobachtungsdaten aufweisen als die statistischen Modelle. Das Kontroll-Klima von CLM stellt sich dabei gegenüber den Beobachtungsdaten als zu kalt, das von REMO mit Ausnahme des Sommers als zu warm dar. Die simulierten Niederschläge liegen deutlich über den Beobachtungsdaten. Vermutlich werden diese Differenzen vor allem durch vorgegebene Feuchteflüsse des globalen Modells – dem Randantrieb des Regionalmodells – verursacht. Die dynamischen Modelle sind auch (noch) nicht in der Lage, die räumliche Niederschlagsverteilung angemessen wiederzugeben. Auf dieser Ebene weisen die dynamischen Modelle erhebliche Schwächen auf (z. B. fehlerhafte Zuordnung der Lage der durch topographische Besonderheiten bedingten mittleren Niederschlagshöhen).

Als zusammenfassende Bewertung aus klimatologischer Sicht zeigt sich, dass keines der betrachteten Modelle ein „ideales“ Verfahren darstellt. Gegenwärtig sind die Ergebnisse des **WETTREG-Modells** am plausibelsten und am besten geeignet, um regionale Aussagen zur Entwicklung der meteorologischen Elemente, insbesondere der Niederschlagsänderungen, zu treffen (KÜCHLER 2009). Liegen die als Referenzdaten gemessenen Niederschlagszeitreihen in einer hohen Auflösung vor, so ist es mit dem WETTREG Modell möglich, ebenso hoch aufgelöste zukünftige Niederschläge zu simulieren.

### 2.1.3 Referenzzeitraum und Klimastationen

Voraussetzung für die Anwendung des WETTREG-Modells zur Erzeugung zukünftiger hoch aufgelöster Niederschlagsdaten sind demnach hoch aufgelöste, langjährig und ganzjährig ohne Ausfälle gemessene Niederschlagszeitreihen. Solch vollständige Messreihen sind nur für die Klimastationen Chemnitz, Görlitz, Leipzig-Schkeuditz, Oschatz und Zinnwald-Georgenfeld im Zeitraum von 1993-2007 beim DWD verfügbar (persönliche Mitteilung MALITZ, DWD, 2009).

Von diesen Klimastationen befinden sich die **Stationen Chemnitz (WST) 42155, Oschatz 41333 und Görlitz (WST) 11405** in von Bodenerosion durch Wasser betroffenen Naturräumen Sachsens (Abbildung 4). Diese Stationen wurden deshalb als Referenzstationen ausgewählt. Die Station Chemnitz repräsentiert den flächenmäßig großen Naturraum der „Unteren und mittleren Lagen des Erzgebirges“. Die Station Oschatz liefert Daten für die nördlichen Teile des „Sächsischen Lösshügellandes“, welche aufgrund der lössbürtigen Böden, der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung und des Reliefs zu den Regionen in Sachsen gehören, die am stärksten erosionsgefährdet sind. Gegenwärtige und zukünftige Erosionsprognosen in Einzugsgebieten des „Oberlausitzer Lösshügellandes“, ebenfalls durch eine sehr hohe Erosionsgefährdung gekennzeichnet, sind mit Hilfe der Niederschlagsdaten der Klimastation Görlitz möglich (siehe Abbildung 4). Diese drei Stationen sind zudem geeignet, um eine Differenzierung des zukünftigen Starkniederschlagsgeschehens in Sachsen zu untersuchen.



**Abbildung 4: Lage der Klimastationen: Chemnitz (WST) 42155 (1), Oschatz 41333 (2) und Görlitz (WST) 11405 (3) Hintergrund: Erosion und Deposition für das Worst-Case-Szenario Sachsen (SCHINDEWOLF 2009)**

Die Niederschlagsdaten wurden mit automatisch arbeitenden Ombrometern gemessen. Seit ca. 2004 sind diese Stationen mit einem „Pluvio-Ott“ ausgestattet (Arbeitsblatt DWA-A 530) (persönliche Mitteilung MALITZ, DWD, 2009). Die gemessenen Niederschlagsdaten liegen somit durchgehend in 5-min-Summen in den drei ausgewählten Klimastationen im Zeitraum von 1993-2007 vor.

**Um möglichst aktuelle Daten zu Grunde zu legen, wurde der Referenzzeitraum auf den 10-Jahres-Abschnitt von 1998-2007 festgelegt.**

Von den Firmen CEC Potsdam (KREIENKAMP et al. 2010) und Geognostics wurden alle Starkniederschläge aus den Messreihen der drei Klimastationen ab einer Intensität  $\geq 0.1$  mm/min (+/- 60 Minuten) herausgefiltert. Ein Starkniederschlag ist folglich beendet, wenn sich nach dem Auftreten eines 5-Minuten-Niederschlags mit einer Niederschlagssumme von mindestens 0.5 mm innerhalb von elf nachfolgenden 5-Minuten-Zeitabschnitten kein weiteres Ereignis größer oder gleich dieser Stärke findet.

Tabelle 1 listet die Anzahl der gemessenen Einzelereignisse mit Schwellenwertüberschreitung nach Klimastation und Jahr auf.

**Tabelle 1: Anzahl der Einzelereignisse mit Schwellenwertüberschreitung nach Klimastation und Jahr im Referenzzeitraum**

Jahr	Chemnitz	Oschatz	Görlitz
1998	86	52	53
1999	66	55	36
2000	80	47	57
2001	69	52	69
2002	78	62	68
2003	71	35	34
2004	73	57	60
2005	88	54	60
2006	76	63	53
2007	110	89	62
mittlere Anzahl/Jahr	78	57	55
Summe	797	566	552

Die im Referenzzeitraum gemessenen Tageswerte Sonnenscheindauer, Tagesmitteltemperatur und Tagessumme des Niederschlags wurden als Eingabeparameter zur Simulation der Bodenfeuchten mit dem Modell METVER (MÜLLER 1987, siehe Abschnitt 2.3.1.1) verwendet.

#### 2.1.4 Simulationszeitraum – Generierung hoch aufgelöster Klimadaten mit WETTREG

Für das vorliegende Projekt wurde das Büro Climate & Environment Consulting (CEC) Potsdam beauftragt, mit dem Modell WETTREG2010 hoch aufgelöste Niederschlagszeitreihen mit der Signatur der Klimaänderung aus dem SRES-Szenario A1B, Lauf 1, für die zwei ausgewählten Zeithorizonte (2041-2050 und 2091-2100) zu erzeugen. Die WETTREG-Simulationen umfassen auch die für die Berechnung zukünftiger Bodenfeuchten mit dem Modell METVER benötigten und auf Tagesskala erzeugten Parameter Sonnenscheindauer, Tagesmitteltemperatur und Tagessumme des Niederschlags.

Dazu geht WETTREG in drei Stufen vor (KREIENKAMP et al. 2010):

- Definition von Zirkulationsmustern anhand des Klimas der Gegenwart (Re-Analysen) und Wiedererkennung dieser Muster in den täglichen Realisierungen eines Globalen Zirkulationsmodells (GCM). Es werden die 20C-Daten (Kontrollklima – siehe Abschnitt 2.1.2.3) für die Re-Simulation des gegenwärtigen Klimas und Szenariodaten für die Simulation eines zukünftigen Klimas analysiert.
- Synthetisierung von lokalen Zeitreihen mit einem stochastischen Wettergenerator - es werden Episoden aus Zeitreihen des gegenwärtigen Klimas (Auflösung: Ein Wert pro Tag) ausgewählt und neu zusammengesetzt. Die Häufigkeit der Zirkulationsmuster wird als Randbedingung für die Verwendung bzw. Nichtverwendung von Episoden benutzt.
- Die Häufigkeitsänderungen der Zirkulationsmuster beschreiben nur einen Teil der Signatur einer zukünftigen Klimaänderung. In den Szenariorechnungen des Klimamodells werden zusätzlich mit Hilfe von Regressionen Korrekturfaktoren errechnet und den synthetisierten Zeitreihen als weitere Signatur aufgeprägt.

Ergebnis sind räumlich hoch aufgelöste Szenarien an den Positionen der drei ausgewählten Klimastationen. WETTREG erzeugt für jede Station zehn transiente Zeitreihen täglicher Daten über den Zeitbereich 1961-2100 mit alternativen, gleich wahrscheinlichen Klimaentwicklungen. Zur Generierung der zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagszeitreihen (5-Minuten-Summen) erfolgt die Entwicklung der Zirkulationsmuster für die oben genannte Stufe 1 anhand des Zeitraums von 1993-2007 für die drei ausgewählten Klimastationen. Der Wettergenerator (Stufe 2) synthetisiert die Zeitreihen, indem er Episoden aus diesem Zeitraum verwendet. Der Niederschlag an einem Tag  $d$  ist dabei die Niederschlagssumme der 24 Stunden von 07:00 Uhr (Tag  $d$ ) bis



07:00 Uhr des Folgetages (Tag d+1). Nun kommen die zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagsreihen der drei verwendeten Stationen zum Tragen. Entsprechend der „Bauvorschrift“ werden die Tage zu einer Zeitreihe mit 5-Minuten-Auflösung zusammengesetzt.

Die so entstandenen 5-Minuten-Niederschlagszeitreihen sind aber in dieser Phase noch nicht verwendbar, denn es ist noch ein zusätzlicher Anpassungsschritt durchzuführen: Es erfolgt für jeden Tag im Zuge der Stufe 3 eine zusätzliche Modifikation der Wetterelemente in den synthetisierten Zeitreihen. Dabei werden auch Tagesniederschlagssummen nach oben oder unten verändert. Zusätzlich erfolgt die Berechnung der Niederschlagssumme aus den 144 Werten für jeden Tag, der in den 5-Minuten-Reihen verwendet wurde. Genau handelt es sich dabei um den Zeitabschnitt 07:05 am Tag d bis 07:00 am Tag d+1. Angenommen, die Tagessumme am 01.06. eines Jahres wird von WETTREG auf einen Wert von 10 mm verändert und aus den 5-Minutenwerten des eben beschriebenen Zeitraums bestimmt sich ein Wert von 8 mm (Änderungsfaktor 1.25), dann werden die einzelnen 5-Minuten-Werte zwischen 07:05 (Tag d) und 07:00 (Tag d+1) mit Hilfe des Änderungsfaktors korrigiert. Nach diesem Korrekturschritt können die 5-Minuten-Niederschlagswerte zur Identifikation von Starkniederschlags-Episoden eingesetzt werden (KREIENKAMP et al. 2010).

Aus den simulierten 5-Minuten-Niederschlagssummen wurden alle Ereignisse ab einer Niederschlagsintensität von 0.1 mm/min (+/- 60 Minuten) - analog des Verfahrens zur Abgrenzung von Starkregen aus den Referenzzeitraum 1998-2007 - gewonnen.

Aus den zehn gleich wahrscheinlichen WETTREG-Zeitreihen bzw. Realisierungen für die Berechnungen bis zum Jahr 2100 wurde für jede der drei Klimastationen der **Lauf mit der höchsten mittleren Starkregenintensität über alle Ereignisse (MAX)** und der **Lauf mit der geringsten mittleren Starkregenintensität über alle Ereignisse (MIN)** für die Erosionssimulationen ausgewählt. Die Simulationszeiträume 2041-2050 und 2091-2100 stellen jeweils Ausschnitte dar.

Die Tabellen 2 bis 4 geben die Anzahl der Ereignisse, das Mittel der Intensität über alle Ereignisse und das Maximum der mittleren Intensität der einzelnen Ereignisse für die beiden 10-Jahres-Zeiträume (2041-2050 und 2091-2100) wieder (KREIENKAMP et al. 2010).

**Tabelle 2: Anzahl der Einzelereignisse mit Schwellenwertüberschreitung für die Klimastation Chemnitz für Zukunftsszenarien (2041-2500 und 2091-2100), Markierung der Läufe MIN mit der geringsten (grün) und MAX mit der höchsten mittleren Starkregenintensität (orange)**

Chemnitz Simulationslauf	Anzahl der Ereignisse	Mittlere Intensität [mm/min]	Maximum mittlere Intensität [mm/min]
0	1282	0.1658	1.6633
1	1247	0.1764	1.1246
2	1268	0.1703	1.1333
3	1314	0.1697	1.1246
4	1302	0.1724	0.9871
5	1266	0.1717	1.1471
6	1349	0.1720	1.2826
7	1336	0.1733	0.7913
8	1366	0.1770	1.7360
9	1263	0.1703	1.1334
mittlere Anzahl/Jahr	65		

**Tabelle 3: Anzahl der Einzelereignisse mit Schwellenwertüberschreitung für die Klimastation Oschatz für Zukunftsszenarien (2041-2500 und 2091-2100), Markierung der Läufe MIN mit der geringsten (grün) und MAX mit der höchsten mittleren Starkregenintensität (orange)**

Oschatz Simulationslauf	Anzahl der Ereignisse	Mittlere Intensität [mm/min]	Maximum mittlere Intensität [mm/min]
0	1026	0.1530	1.2716
1	1100	0.1492	1.2257
2	1021	0.1524	1.0876
3	1103	0.1572	1.5250
4	1041	0.1547	0.9229
5	996	0.1533	1.1514
6	1057	0.1558	1.0280
7	1091	0.1491	0.8371
8	1061	0.1536	1.4029
9	1007	0.1538	1.2257
mittlere Anzahl/Jahr	52		

**Tabelle 4: Anzahl der Einzelereignisse mit Schwellenwertüberschreitung für die Klimastation Görlitz für Zukunftsszenarien (2041-2500 und 2091-2100), Markierung der Läufe MIN mit der geringsten (grün) und MAX mit der höchsten mittleren Starkregenintensität (orange)**

Görlitz Simulationslauf	Anzahl der Ereignisse	Mittlere Intensität [mm/min]	Maximum mittlere Intensität [mm/min]
0	943	0.1587	0.9850
1	938	0.1610	0.8950
2	937	0.1609	1.1484
3	983	0.1519	1.4258
4	916	0.1538	1.2926
5	959	0.1581	1.5677
6	943	0.1522	0.9000
7	979	0.1583	1.0000
8	976	0.1545	0.9850
9	896	0.1539	0.9000
mittlere Anzahl/Jahr	47		

Eine vergleichende Übersicht über Anzahl der Starkregen, deren Niederschlagssummen und Niederschlagsintensitäten im Referenzzeitraum und in den Zukunftszeitreihen (2041-2050 und 2091-2100) für die drei Klimastationen befindet sich im Abschnitt 3.1.

## 2.2 Erosionsmodellierung

### 2.2.1 Anforderungen an das Erosionsmodell

Ziel ist es, Vorhersagen über den Verlauf und das Ausmaß der Bodenerosion unter zukünftigen Klimabedingungen als Beitrag zu Planungsentscheidungen und als Grundlage für Vorsorge- und Schutzmaßnahmen zu treffen.

Das Modell, welches im Rahmen dieses Forschungsprojektes zum Einsatz kommen soll, muss folgende Forderungen erfüllen:

- Erosionsmodellierung auf Basis von einzelnen Niederschlagsereignissen
- Vorhersagemöglichkeit für längere Zeiträume
- Abbildung der Prozesse Erosion und Deposition („on-site und off-site-Effekte“)
- auf Einzugsgebietsebene anwendbar
- kompatibel zu GIS (ARCVIEW, ARCGIS)
- Bestimmbarkeit der Eingabeparameter mit vertretbarem Aufwand (Nutzbarkeit digitaler Kartenwerke und Datenbanken)

- Abbildung des Bodenzustandes zum Zeitpunkt des Niederschlagsereignisses (Landnutzung, Berücksichtigung des Bodenzustandes nach konventioneller oder konservierender Bearbeitung, Entwicklungsstadium der Feldfrucht, Fruchtfolge)
- Abbildung klimasensitiver Bodenparameter
- hinreichend hohe räumliche und zeitliche Auflösung

Aufgrund der Vielzahl der hierbei zu berücksichtigenden Einflussgrößen können gesicherte Prognosen nur über die Anwendung empirischer oder physikalischer Simulationsmodelle erreicht werden (SCHMIDT 1996). Empirische Modelle hängen von dem Datenkollektiv ab, aus dem sie hergeleitet wurden und sind deshalb nicht übertragbar. Die Anwendung eines empirischen Modells außerhalb jener Region, unter deren Verhältnissen es ursprünglich entwickelt wurde, stellt einen erheblichen Aufwand dar, zumal dafür bereits in Einzelhang-Dimension äußerst umfangreiche (unterschiedliche Bewirtschaftungsvarianten, Parzellenlängen, Hangneigungen, Bodenformen) und langjährige regionale Messdaten erforderlich sind (HEBEL 2003).

Das erste empirische Modell zur Quantifizierung des Bodenabtrags durch Wasser, die USLE (Universal Soil Loss Equation, deutsch: UBAG bzw. ABAG [Universelle bzw. Allgemeine Bodenabtragungsgleichung]), wurde von WISCHMEIER & SMITH (1965) auf der Grundlage von Testflächenmessungen in den USA entwickelt. Die USLE berechnet den mittleren jährlichen Bodenabtrag durch einfache Multiplikation von fünf korrelativ ermittelten Faktoren.

Nach Definition des R-Faktors (maximale Intensität im 30-min-Intervall nach SCHWERTMANN 1987) ist eine Anpassung an zukünftige Klimaszenarien hinsichtlich der Veränderung der Erosivität der Niederschläge durchführbar (WURBS & STEININGER: UBA-Bericht FKZ 3708 71 205 02: Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser, 2011). Der statistische Zusammenhang zwischen Jahresniederschlag und Jahres-Erosivität erweist sich allerdings als zu gering, was die Eignung eines auf Jahresniederschlagsbasis abgeleiteten R-Faktors für eine zuverlässige Beschreibung und Wiedergabe der Niederschlags-Erosivität in Frage stellt (HEBEL 2003). Weil die ABAG/USLE den mittleren jährlichen Bodenabtrag berechnet, ist die Prognose des Bodenabtrages für individuelle extreme Niederschlagsereignisse, wie sie in diesem Projekt durchgeführt werden soll, daher nicht möglich.

Mit den steigenden Anforderungen an den Boden- und Gewässerschutz war es nötig, allgemeingültige Modelle zu entwickeln, die eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung besitzen und über die Quantifizierung des Bodenabtrags im Einzugsgebiet hinaus die Prognostizierung der partikelgebundenen Stoffeinträge in angrenzende Oberflächengewässer ermöglichen. Rein empirische Modelle, die nur für die Regionen anwendbar sind, für die sie erstellt wurden, mussten deshalb durch physikalisch-prozessorientierte und damit übertragbare Modellansätze ersetzt werden. Es entstanden seit den 1980er-Jahren eine ganze Reihe physikalisch begründeter Erosionsmodelle unterschiedlicher Komplexität (z. B. OPUS, KINEROS, WEPP, EROSEM, PEPP, LISEM, MIKE-SHE, EROSION 2D/3D).

### 2.2.2 Übersicht über empirische und physikalische Erosionsmodelle

Übersichten über die verfügbaren Modelle zur Quantifizierung der Bodenerosion durch Wasser liegen in zahlreichen Publikationen vor (SCHRAMM 1994; VON WERNER 1995; SCHMIDT, J. 1996; GERLINGER 1997; DEINLEIN & SCHÖGER 1997). Tabelle 5 und Tabelle 6 fassen die am häufigsten angewendeten Bodenerosionsmodelle, die als PC-Programme vorliegen, hinsichtlich ihrer Eignung für dieses Projekt zusammen.

**Tabelle 5: Übersicht über vorhandene Erosionsmodelle (nach VON WERNER 1995; SCHMIDT, J. 1996; GERLINGER 1997; DEINLEIN & SCHOGER 1997, ergänzt und verändert in MICHAEL, A. 2000)**

Modellname		Referenz	Gebiet	Prozesse
USLE ABAG	Universal Soil Loss Equation Allgemeine Bodenabtragungsgleichung	WISCHMEIER & SMITH 1978 SAUPE 1985, SCHWERTMANN et al. 1987	Hang (ungegliedert)	Erosion
RUSLE	Revised USLE	RENARD et al. 1993	Hang (gegliedert)	Erosion
MUSLE87	Modified USLE 1987	HENSEL & BORK 1988	Einzugsgebiet max. Größe n. b.	Erosion
DUSLE (TIN-EROSION)	Differentiated USLE	FLACKE et al. 1990	Einzugsgebiet max. Größe n. b.	Erosion
AGNPS	Agricultural Non-Point Source Pollution Model	YOUNG et al. 1987	Einzugsgebiet bis 32.000 Raster	Erosion, Abfluss, Nährstoff/Pestizidtransport
CREAMS	Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems	KNISEL 1980	Einzugsgebiet max. Größe n. b.	Erosion, Abfluss, Nährstoff/Pestizidtransport
GLEAMS	Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems	LEONARD, KNISEL, STILL 1987	Einzugsgebiet max. Größe n. b.	Erosion, Abfluss, Nährstoff/Pestizidtransport
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator	WILLIAMS 1985	Hang (ungegliedert)	Erosion, Abfluss, Nährstofftransport, Pflanzenwachstum
ANSWERS	Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response System	BEASLEY & HUGGINS 1982	Einzugsgebiet	Erosion, Abfluss
OPUS	Advanced Simulation Model for Non-Point Source Pollution Transport	FERREIRA & SMITH 1992	Hang (ungegliedert)	Erosion, Abfluss, Nährstofftransport, Pflanzenwachstum
KINEROS	Kinematic Erosion Simulation	WOOLHISER et al. 1990	Einzugsgebiet max. Größe n. b.	Erosion, Abfluss
SPUR (I+II)	Sediment Yield Prediction and Utilization of Range Land	WILLIAMS & BERNDT 1977	Einzugsgebiet max. Größe n. b.	Erosion, Abfluss, Nährstofftransport, Pflanzenwachstum, Bewirtschaftung
SMODERP	Simulation Modell of Surface Runoff and Erosion Process	HOLY, VASKA, VRANEK 1988	Hang (gegliedert)	Erosion, Abfluss
EROSION 2D	EROSION 2D	SCHMIDT, J. 1990	Hang (gegliedert)	Erosion, Abfluss
EROSION 3D	EROSION 3D	V. WERNER 1995	Einzugsgebiet bis zu 10*10 <sup>5</sup> Zellen	Erosion, Abfluss
WEPP	Water Erosion Prediction Project	LANE & NEARING 1989	Hang (gegliedert)	Erosion, Abfluss
PEPP	Prozeßorientiertes Erosions-Prognose-Programm	SCHRAMM 1994	Hang (gegliedert)	Erosion, Abfluss
EUROSEM	European Soil Erosion Model	MORGAN et al. 1993	Einzugsgebiet max. Größe n. b.	Erosion, Abfluss
SHE/ SHESED/ MIKE SHE	Système Hydrologique Européen	ABOTT et al. 1986, BATHURST et al. 1995 RESGAARD & STORM 1995	Einzugsgebiet max. Größe n. b.	Erosion, Abfluss
LISEM	Limburg Soil Erosion Model	DE ROO et al. 1994	Einzugsgebiet max. Größe n. b.	Erosion, Abfluss

**Tabelle 6: Übersicht zur Eignung vorhandener Erosionsmodelle zur Anwendung in diesem Projekt (DEINLEIN 1997, ergänzt und verändert in MICHAEL, A. 2000)**

Kriterium / Modell	Rechnet das Modell auf Basis von Einzelereignissen ?	Berechnet das Modell Infiltration/Erosion Transport/Deposition ?	Einzugsgebietsmodell mit Schnittstelle zu einem GIS ?	Aufwand zur Bestimmung für Klima-, Landnutzung und Bodenparameter ?
USLE	-	-	-	+
RUSLE	✓	-	-	+
MUSLE87	✓	✓	-	++
DUSLE (TIN-EROSION)	✓	✓	✓	++
AGNPS	✓	✓	✓	++
CREAMS	-	✓	-	+++
GLEAMS	-	✓	-	+++
EPIC	-	-	-	+++
SPUR (I+II)	✓	-	-	+++
SMODERP	✓	✓	-	+
ANSWERS	✓	✓	-	++
OPUS	✓	✓	-	+++
KINEROS	✓	✓	-	+++
EROSION 2D	✓	✓	-	+
EROSION 3D	✓	✓	✓	++
WEPP	✓	✓	✓	+++
PEPP	✓	✓	-	+
SHE/SHESED/MIKE SHE	✓	✓	?	+++
EUROSEM	✓	✓	✓	+++
LISEM	✓	✓	✓	+++

+ geringer Aufwand, ++ mittlerer Aufwand, +++ hoher Aufwand, physikalisch basierte Modelle sind grau unterlegt

Tabelle 5 und Tabelle 6 geben wieder, dass das physikalisch basierte Modell EROSION 3D für den Einsatz im Rahmen des Projektes geeignet ist. Mit der Weiterentwicklung des Modells EROSION 3D Version 4.0 (verfügbar seit 2005, Modellentwicklung durch VON WERNER, Firma Geognostics) ist es möglich, Langfristsimulationen durch Verknüpfung von Einzelereignissen zu Sequenzen auf Einzugsgebietsebene durchzuführen.

### 2.2.3 Das Erosionsmodell EROSION 3D

EROSION 3D ist ein physikalisch begründetes, ereignisbezogenes Modell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser und des Oberflächenabflusses einschließlich des Eintrages partikelgebundener Schadstoffe in das Gewässernetz in Einzugsgebieten. Den theoretischen Hintergrund des Modells bildet der von SCHMIDT, J. (1990, 1996) entwickelte „Impulsansatz“. Das Modell wurde seit 1990 ständig weiterentwickelt. Die Modellgrundlagen werden ausführlich in SCHMIDT, J. (1996) dargestellt.

EROSION 2D/3D besteht aus drei Teilmodellen: dem digitalen Geländemodell (3D), dem eigentlichen Erosionsmodell und dem Infiltrationsmodell. In diesem Projekt wird das Modul „Langfristsimulationen“ genutzt: Durch die iterative Kopplung einzelner Niederschlagsereignisse und der entsprechenden Bodendateien, die den aktuellen Bodenzustand zum Zeitpunkt des Niederschlagsereignisses beschreiben, ist es möglich, die Erosion über beliebig lange Zeiträume zu berechnen. Das Modell verfügt über weitere Module (Runoff model, Infiltration model, Sediment model, Check dam model und Snow model), die in diesem Projekt nicht angewendet werden. Geometrische Grundlage ist ein gleichmäßiges quadratisches Raster in Form eines digitalen Geländemodells (DGM).

Für die physikalische Beschreibung des Erosionsprozesses sind drei wesentliche Teilprozesse zu unterscheiden: die Loslösung der Partikel von der Bodenoberfläche, der Transport der Partikel mit dem Oberflächenabfluss und die Sedimentation. Für den Transport der Bodenpartikel im Oberflächenabfluss sind zwei entgegengesetzt gerichtete Prozesse zu untersuchen: Die im Oberflächenabfluss suspendierten Teilchen sinken aufgrund der Schwerkraft mit einer hauptsächlich von ihrem Durchmesser abhängenden Geschwindigkeit zu Boden. Dieser Sinkbewegung wirkt eine aufwärtsgerichtete (turbulente) Strömungs-

komponente entgegen. Von dieser vertikalen Turbulenzbewegung wird angenommen, dass sie ein Teil des gesamten, durch Oberflächenströmung und Tropfenaufschlag verursachten Impulsstromes ist.

Das für EROSION 2D/3D von SCHMIDT, J. (1990) entwickelte Infiltrationsmodell basiert auf dem zur Beschreibung von Infiltrationsprozessen häufig verwendeten Ansatz von GREEN & AMPT (1911). In der Modellvorstellung wird vereinfacht angenommen, dass das Niederschlagswasser kolbenförmig in den Boden eindringt und dabei den verfügbaren Porenraum vollständig auffüllt (HARTGE 1978).

Das Modell bildet die Einflüsse der Bodennutzung und -bearbeitung auf das Ausmaß der Erosion als Funktion folgender, zeitlich veränderlicher Größen ab:

- Lagerungsdichte [kg/m<sup>3</sup>]
- Gehalt an organischem Kohlenstoff [M-%]
- Anfangswassergehalt [Vol.-%]
- Erosionswiderstand [N/m<sup>2</sup>]
- Oberflächenrauigkeit nach MANNING [s/m<sup>1/3</sup>]
- Bedeckungsgrad der Bodenoberfläche [%]

Als feste, von Klima und der Bearbeitung im betrachteten Zeitraum unbeeinflusste Materialeigenschaft der Böden geht außerdem die Korngrößenverteilung in das Modell ein.

**Tabelle 7: Ausgabeparameter EROSION 2D/3D**

Flächenbezogene Größen	Querschnittsbezogene Größen
Erosion/Deposition bezogen auf ein selektiertes Rasterelement [kg/m <sup>2</sup> ]	Abfluss [m <sup>3</sup> /m]
Erosion/Deposition des Einzugsgebietes des selektierten Rasterelementes [kg/m <sup>2</sup> ]	Transportierte Sedimentmenge [kg/m]
	Sedimentkonzentration [kg/m <sup>3</sup> ]
	Korngrößenverteilung im Sediment [%]
	Nettoaustrag [t/ha]

Die in Tabelle 7 aufgelisteten Größen werden für jedes Rasterelement berechnet.

Mit Hilfe des empirisch bestimmbaren Skinfaktors ist es möglich, die für die Bodenerosion durch Wasser durchaus bedeutenden Prozesse Verschlammung und Makroporenfluss zu berücksichtigen.

Luftpolstereffekte können in den ersten Minuten eines Starkregens auftreten, wenn der Oberboden stark ausgetrocknet ist. Treffen die Tropfen auf einer sehr trockenen Bodenoberfläche auf, bildet sich ein Wasserfilm: die Luft in der obersten Bodenschicht ist eingeschlossen und kann nicht entweichen. Durch das Luftpolster wird die Infiltration nahezu verhindert. Das Niederschlagswasser fließt oberflächlich ab, solange der Luftpolstereffekt anhält – so kann es in kurzer Zeit zu großen Erosionsschäden kommen. HÄNSEL et al. (2004) gehen davon aus, dass gerade in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts Trockenperioden im Frühjahr und Sommer signifikant zunehmen werden. Es wird angenommen, dass diese Trockenphasen häufiger durch konvektive Starkregen beendet werden als durch gemäßigten Landregen. Um das Ausmaß der Erosion bei Luftpolstereffekt zumindest abzuschätzen, wird ein Prototyp des 2012 für EROSION 3D entwickelten Moduls „Luftpolstereffekt“ in dieser Studie erstmalig exemplarisch angewendet (siehe Abschnitt 3.3.8).

### 2.2.3.1 Sensitivitätsanalyse

Die relative Bedeutung eines Eingabeparameters auf das Endergebnis der Simulation kann durch den Sensitivitätsparameter S (MCCUEN & SNYDER 1986, NEARING et. al. 1990) abgeschätzt werden:

$$S = \left( \frac{O_2 - O_1}{O_{12}} \right) / \left( \frac{I_2 - I_1}{I_{12}} \right) \quad (2-1)$$

mit

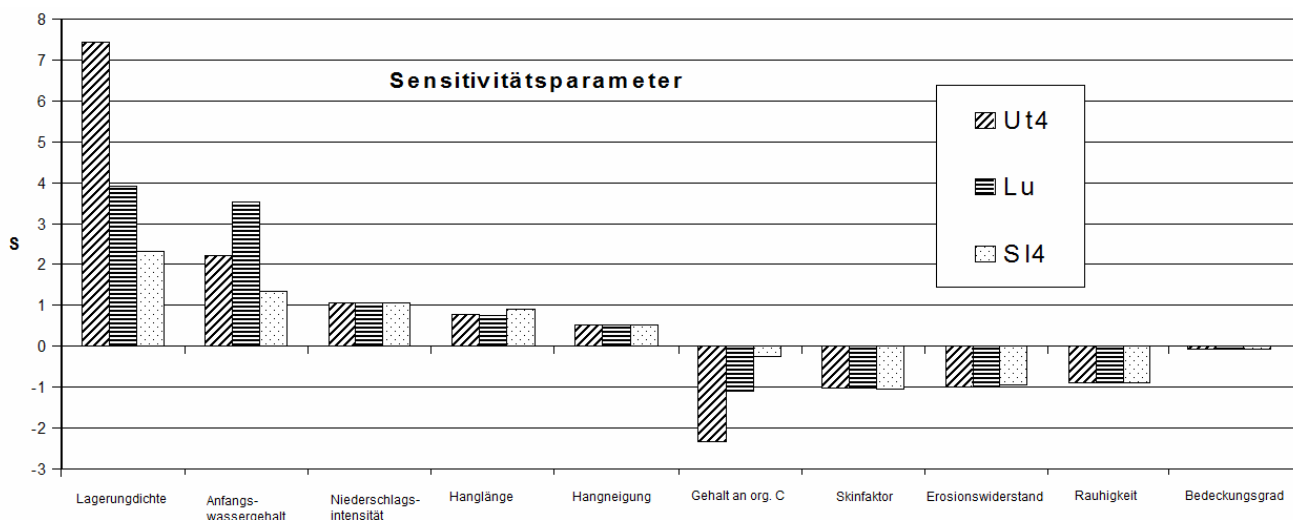
$I_1/I_2$  Minimum/Maximum der Inputgröße und der aus  $I_1$  und  $I_2$  gebildete Mittelwert  $I_{12}$

$O_1/O_2$  für  $I_1$  und  $I_2$  berechnete Outputgröße  $O_1$  und  $O_2$  und der entsprechende Mittelwert  $O_{12}$

S Sensitivitätsparameter

Ein hoher Betrag für S bedeutet, dass der betrachtete Eingabeparameter einen großen Einfluss auf das Simulationsergebnis hat.  $S > 0$  bedeutet, dass eine Änderung der Inputgröße eine gleichgerichtete Änderung der Outputgröße zur Folge hat. Ist  $S < 0$ , bewirkt eine Änderung der Inputgröße eine entgegengesetzt gerichtete Änderung der Outputgröße. In Abbildung 5 sind die Sensitivitätsparameter für alle Eingabeparameter von EROSION 3D beispielhaft für einen stark tonigen Schluff (Ut4), einen schluffigen Lehm (Lu) und einen stark lehmigen Sand (Sl4) dargestellt.

Abbildung 5 zeigt, dass die Sensitivität der Parameter Anfangswassergehalt, Lagerungsdichte und Gehalt an organischem Kohlenstoff stark von der Bodenart abhängig ist. Das Modell reagiert auf eine Änderung der Parameter Erosionswiderstand, Rauigkeit, Skinfaktor, Niederschlagsintensität, Hanglänge und Hangneigung unabhängig von der Bodenart.



**Abbildung 5: Sensitivität des Modells EROSION 3D gegenüber ausgewählten Eingabeparametern (MICHAEL, A. 2000, ergänzt)**

Die in Abbildung 5 angegebenen mittleren Werte für S können nicht den exakten Verlauf der funktionalen Abhängigkeit widerspiegeln, weil sie auf der Annahme einer linearen Beziehung zwischen Eingabe- und Ausgabewert beruhen. Sie vermögen deshalb nur annähernd, den Zusammenhang zwischen dem Input- und dem Outputwert zu beschreiben. Der Sensitivitätsparameter bezieht sich zudem nur auf die Änderung eines Eingabeparameters und setzt eine Unabhängigkeit der Parameter untereinander voraus, die real nicht immer gegeben ist. Beispielsweise resultiert die hohe Sensitivität der Lagerungsdichte aus der Korrelation zum Anfangswassergehalt: dicht gelagerte bzw. verdichtete Böden haben einen geringeren Anfangswassergehalt als die im Beispiel verwendeten mittleren Wassergehalte. Eine Änderung des Bedeckungsgrades geht immer mit einer gleichgerichteten Änderung der Rauigkeit einher. Die mittleren Sensitivitätsparameter beziehen sich deshalb ausschließlich auf die Beispiele und sind nur tendenziell übertragbar.

Obwohl die festgestellten Sensitivitäten des Modells gegenüber den ausgewählten Eingabeparametern für alle drei untersuchten Bodenarten ähnlich sind, ändern sich die absoluten Bodenabträge [t/ha] bei einem Schluffboden wesentlich stärker als bei einem Sand- oder Lehmboden.

Eine ausführlichere Darstellung der Sensitivität des Bodenabtrages als Ergebnis der Simulationsrechnungen mit EROSION 3D gegenüber der Änderung der Eingabeparameter kann der Dissertation von MICHAEL, A. (2000) entnommen werden.

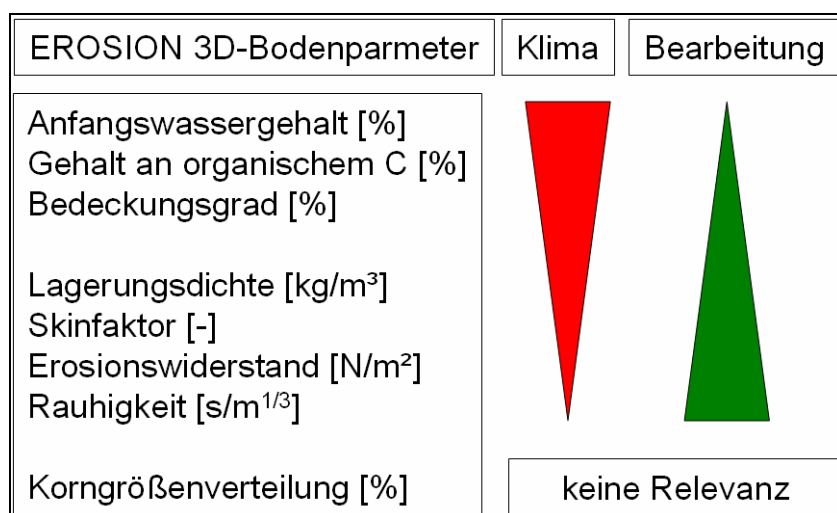
## 2.3 Einfluss des Klimawandels auf Bodeneigenschaften, die die Bodenerosion durch Wasser beeinflussen

Aus der Vielzahl der durch Bund, Länder und Forschungseinrichtungen initiierten aktuellen Forschungsprojekte zu den Folgen des Klimawandels und zu abgeleiteten Anpassungsstrategien wurden diejenigen analysiert, die quantitative Aussagen

- über die Veränderung des Bodenfeuchtereimes,
- die Veränderung des Gehaltes an organischem Kohlenstoff im Boden und
- über die Entwicklung der Pflanzenbedeckung

unter den Bedingungen des Klimawandels enthalten. Diese Faktoren sind allerdings untrennbar mit den erwarteten Veränderungen der Bodenbewirtschaftung (Verschiebung der Phänophasen und damit der Einsaat- und Erntetermine, Umstellung auf konservierend bearbeitende Verfahren, Veränderung der Fruchtfolgen und des Sortenspektrums, ...) verknüpft.

Die Veränderungen müssen durch die Parameter des Bodenerosionsmodells adäquat abgebildet werden. Abbildung 6 fasst die Bodenparameter des Modells EROSION 3D schematisch unter dem Blickwinkel „Klimarelevanz“ und „Bearbeitungs- bzw. Landnutzungsrelevanz“ zusammen. Die Bedeutung des Faktors Klima wird von oben nach unten geringer, der Faktor Landnutzung/Bearbeitung nimmt von oben nach unten zu.



**Abbildung 6: Eingabeparameter (Boden) für EROSION 3D hinsichtlich ihrer Veränderlichkeiten durch Klima und Bodenbearbeitung**

### 2.3.1 Veränderung der Bodenfeuchte

Der Wassergehalt eines Bodens zu Beginn eines Starkregenereignisses ist dafür maßgeblich, wie viel Niederschlagswasser in den Boden infiltrieren kann und wie viel Oberflächenabfluss entsteht - und damit letztendlich dafür, wie viel Boden abgetragen wird. Dieser direkte Zusammenhang wird durch die hohe Sensitivität des Parameters „Anfangswassergehalt“ im Modell EROSION 3D widergespiegelt (siehe Abschnitt 2.2.3.1). Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wassergehalt der Böden sind deshalb von zentralem Interesse.



Im Bericht „Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Bodenwasserhaushalt“ von KLÖCKING et al. (2008) wurden mit dem Modell ArcEGMO-PSCN klimatische Wasserbilanzen für jeweils sechs verschiedene Bodenformen für acht Klimastationen in Sachsen berechnet. Hierbei wurden Änderungen des Zeitraums 2066-2100 im Vergleich zu 1961-1995 auf der Grundlage der WEREX-VI-Projektionen und des A1B-Szenarios dargestellt. Ausgabeparameter waren:

- simulierte Niederschläge [mm], Monatsmittelwerte für je 35-Jahres-Zeiträume
- die klimatische Wasserbilanz [mm], Monatsmittelwerte für je 35-Jahres-Zeiträume
- die Änderung des Transpirationsdefizits  $\Delta AT/PT$  [%], Zeitraum 2066-2100 im Vergleich zu 1966-1995
- die Änderung der Sickerwasserrate  $\Delta SWR$  [%], Zeitraum 2066-2100 im Vergleich zu 1966-1995

Der Praktikumsbericht von FRITZ (2009) basiert auf den Ergebnissen der oben genannten Studie. Für fünf Böden der Station Chemnitz wurde die Entwicklung der Bodenwassergehalte dargestellt. Die untersuchten Böden umfassen eine Parabraunerde (Bodenart im Oberboden: Uls), einen Pseudogley (Ut4), zwei Braunerden (SI3 und Uls) und einen Stagnogley (SI4). Die ermittelten Bodenfeuchten wurden nach KA 5 (S. 115) klassifiziert.

Es ist erkennbar, dass in den Sommermonaten die Anzahl der Tage mit „feuchten“ Werten abnimmt und die Anzahl der Tage mit „trockenen“ Werten zunimmt. Im Einzelnen schwanken die Werte für die einzelnen Böden jedoch sehr. Die Gefahr von Trockenheit ist im Mai und Juni besonders hoch. Während der Wintermonate überwiegen die feuchten Monate deutlich, wobei der Bodenwassergehalt auf allen Böden abnehmen wird. Bei der quantitativen Beurteilung ergibt sich eine Abnahme der mittleren Bodenwassergehalte im Jahresmittel um 4-8 %, in den Monaten Mai bis September sogar um 3-11 % (Bezugsjahr 2000). Tabelle 8 und Tabelle 9 zeigen eine Übersicht der simulierten Änderungen der mittleren Bodenfeuchte bei den untersuchten Bodentypen und Bodenarten (Tabelle 8: ganzjährig, Tabelle 9: Mai-September).

**Tabelle 8: Prozentuale Änderung der mittleren Bodenfeuchte (ganzjährig) Station Chemnitz, Bezugsjahr 2000 (100 %) (nach FRITZ 2009, verändert)**

Bodentyp	Bodenart	Änderung der Bodenfeuchte bis 2050 [%]	Änderung der Bodenfeuchte bis 2100 [%]
Parabraunerde	Uls	- 4	- 7
Pseudogley	Ut4	- 4	- 7
Braunerde 1	SI3	- 5	- 8
Braunerde 2	Uls	- 4	- 8
Stagnogley	SI4	- 2	- 5

**Tabelle 9: Prozentuale Änderung der mittleren Bodenfeuchte (Mai-September) Station Chemnitz, Bezugsjahr 2000 (100 %) (nach FRITZ 2009, verändert)**

Bodentyp	Bodenart	Änderung der Bodenfeuchte bis 2050 [%]	Änderung der Bodenfeuchte bis 2100 [%]
Parabraunerde	Uls	- 6	- 10
Pseudogley	Ut4	- 4	- 9
Braunerde 1	SI3	- 3	- 6
Braunerde 2	Uls	- 5	- 11
Stagnogley	SI4	- 4	- 9

Es handelt sich hierbei um mittlere Werte, die aber den Trend verdeutlichen.

Die Ergebnisse wurden u. a. anhand der Lysimeterbeobachtungen der Station Brandis validiert: Entsprechend der Szenario-prognosen führen die kontinuierliche Erwärmung und damit Zunahme der Evapotranspiration bei gleichzeitiger Abnahme der Sommer-Niederschläge zu deutlichen Rückgängen der Sickerwasserrate aller untersuchten Böden. Trockenstressbedingte Ertragseinbußen bei landwirtschaftlicher Nutzung sind auf Böden mit geringer nutzbarer Feldkapazität zu erwarten. Es kommt zu einer Verschiebung der Aufteilung der Abflusskomponenten zu Ungunsten der Grundwasserneubildung. Damit besteht weiterhin ein hohes Risikopotenzial durch die schnellen Abflusskomponenten nach Starkregenereignissen (KLÖCKING et al. 2009).

Pflanzen reagieren auf höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre mit einer Verringerung der Wasserabgabe über die Spaltöffnungen. Ergebnis ist eine höhere Wassernutzungseffizienz bei geringerer Transpiration. Im Stuttgarter FACE-Experiment (ERBS et al. 2008) wurde der Einfluss einer CO<sub>2</sub>-Erhöhung (auf ca. 550 ppm) auf die Bodenfeuchte unter Weizen und einigen Unkräutern untersucht. In den Jahren 2003 und 2004, die relativ trocken waren, lag die Bodenfeuchte im FACE-Plot im Schnitt etwa 15 % über der in den Vergleich-Plots. Im relativ nassen Jahr 2005 war der Unterschied nur marginal (+1 %). BURKART et al. (2004) haben den Einfluss steigender CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf das Bodenwasser unter Sommerweizen untersucht. Auch in dieser Studie wird belegt, dass durch den CO<sub>2</sub>-Effekt verhältnismäßig weniger Wasser durch die Pflanzen abgegeben wird. WEIGEL (2007) hat auf Grundlage der Daten des FACE-Experimentes ebenfalls festgestellt, dass die Wassernutzungseffizienz unter Weizen (12-22 %), unter Gerste (13-19 %) und unter Zuckerrüben (11-16 %) im Vergleich zur Referenzfläche steigt. Die Untersuchungen zur CO<sub>2</sub>-Wirkung in Bezug auf das Bodenwasser sind allerdings nur stichprobenhaft bei hohen CO<sub>2</sub>-gehalten durchgeführt worden, sodass von ersten Hinweisen auf dieses Phänomen, aber noch nicht von repräsentativen Daten ausgegangen werden muss.

In welchem Verhältnis Wassernutzungseffizienz verschiedener Nutzpflanzen und Bodenfeuchte stehen, kann bei unterschiedlichen Randbedingungen (Landnutzung, Bodenarten, Bodenbearbeitung, Witterung) bestenfalls geschätzt werden.

Agrund der hohen Sensitivität des Erosionsmodells gegenüber dem Anfangswassergehalt zu Beginn eines Niederschlagsereignisses und der starken räumlichen und zeitlichen Heterogenität dieses Parameters wird die Bodenfeuchte mit Hilfe des DWD-Modells METVER taggenau simuliert.

### 2.3.1.1 Das Bodenwasserhaushaltsmodell METVER (DWD)

Das Modell METVER wurde von MÜLLER (1988a, 1988b, 1989) seit 1987 entwickelt und wird vom DWD seither aktualisiert und angewendet. Es handelt sich um ein Zweischichtmodell, bei dem die Bestimmung der realen und potentiellen Evapotranspiration auf dem Verfahren von TURC (1961) und dessen Modifikation nach WENDLING et al. (1991) beruht (in JUNGHÄNEL 2010). Eine detaillierte Beschreibung des Modells befindet sich in MÜLLER (1987).

Im Modell sind die Ausschöpfungsschicht, aus welcher die Pflanze Wasser bezieht, und die Durchwurzelungsschicht variabel. Als Funktionen der Zeit sind sie abhängig von der Entwicklung der jeweiligen Pflanzenkultur. METVER definiert eine Entzugszone, die dem Raum der Hauptdurchwurzelungsschicht entspricht. Dieser Zone werden 60 % der nutzbaren Feldkapazität der Ausschöpfungsschicht zugeordnet. Die restlichen 40 % der nutzbaren Feldkapazität entfallen auf eine darunter liegende Nachlieferungszone.

Das Modell beschreibt ein Tiefenprofil von maximal 2 m. Diese 2 m können in 20 Dezimeter-Schichten aufgeteilt und entsprechend genau parametrisiert werden. Klimaeingangsdaten des Modells sind die Tagesmitteltemperatur in 2 m Höhe, die Tagesniederschlagssumme in 1 m Höhe sowie das Tagesmittel der Globalstrahlung. Intern erfolgt eine Korrektur des Niederschlags nach RICHTER (1995) (in JUNGHÄNEL 2010). Zusätzlich verlangt das Modell Angaben zur geografischen Lage, zur Anzahl der 10 cm-Schichten und zur Landnutzung. Für einen Modelllauf kann immer nur eine Kultur als Nutzungsparameter verwendet werden. Die Landnutzung wird über die Phänologie mit Hilfe der Interzeption, der Durchwurzelungstiefe und einem kulturpflanzenspezifischem Parameter abgebildet (MÜLLER 1987). Die Anpassung an die jeweiligen bodenhydrologischen Bedingungen (mit den Eingangsparametern Bodenart, Feldkapazität und nutzbare Feldkapazität) wird über eine weitere Datei realisiert. Die entsprechenden Bodendateien wurden auf der Grundlage der Kartieranleitung 5 (KA5) für alle Bodenarten in den Referenzzugsgebieten neu erstellt (PILZ 2011).

METVER berechnet Werte für die potenzielle und reale Evapotranspiration, das Sickerwasser aus der tiefsten Bodenschicht zum Grundwasser, den gesamten Bodenwassergehalt, die Mächtigkeit der Ausschöpfungsschicht und die Bodenfeuchte in Prozent der nutzbaren Feldkapazität (%nFK), bezogen auf die Dicke der Ausschöpfungsschicht. Die Ausgabe der Ergebnisse kann tages-, halbdakaden-, dakaden- oder monatsweise erfolgen. Bodenwassergehalte, die die Feldkapazität übersteigen, werden vom Modell nicht berücksichtigt.

Der Einfluss einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration auf die Bodenfeuchte wird mit METVER nicht abgebildet.

### 2.3.2 Veränderung des Gehaltes an organischem Kohlenstoff

Veränderungen im Kohlenstoff-Haushalt laufen sehr langsam ab. Um diese zu untersuchen, sind lange Zeitreihen genauer Messergebnisse erforderlich. Besonders alter Kohlenstoff unterliegt aufgrund hoher Temperatur-Sensibilität einem verstärktem Abbau durch erhöhte mikrobielle Aktivität (VANHALA et al. 2007 in KOLBE 2009). Steigende Temperaturen haben einen umso deutlicheren C<sub>org</sub>-Abbau zur Folge, je niedriger die ursprünglichen Temperaturen waren (KIRSCHBAUM 1995; FISSORE et al. 2008 in KOLBE 2009).

Die Änderung der Gehalte an organischem Kohlenstoff landschaftlicher Böden in Sachsen wurde von KOLBE (2009) im LfULG-Bericht „Klimawandel und C-Sequestrierung“ ausführlich untersucht. Um die Entwicklung der C<sub>org</sub>-Gehalte in Böden zu bestimmen, wurden das Modell CANDY (Modellsystem Carbon and Nitrogen Dynamics) und andere, einfachere statistische Verfahren (REGRESS I und II, LUFA und STAND) angewendet. Aus den Modellergebnissen kann abgeleitet werden, dass sich die durchschnittlichen C<sub>org</sub>-Gehalte von Ackerböden bis zum Jahre 2050 im Vergleich zu denen von 2000 voraussichtlich folgendermaßen entwickeln werden:

- auf sandigen Böden: Abnahme um 0.12 % (von ursprünglich durchschnittlich 1.36 %)
- auf Lössböden: Abnahme um 0.04 % (von ursprünglich durchschnittlich 1.38 %)
- in Vorgebirgslagen: sehr weite Schwankungen, je nach angesetztem Modell, von + 0.02 % bis -0.43 % oder im Extremfall sogar – 0.86 % (von ursprünglich 2.12 %)

KOLBE (2009) berechnete außerdem die Entwicklung der C<sub>org</sub>-Gehalte [%] für 23 verschiedene Fruchtfolgen und Landnutzungen bei unterschiedlichen Düngergaben auf drei unterschiedlichen Böden (D-Standort: anlehmiger Sand, Lö-Standort: sandiger Löss und V-Standort: sandiger Lehm). Eine Zusammenstellung nach KOLBE (2009) zeigt Tabelle 10.

**Tabelle 10: Änderung der C<sub>org</sub>-Gehalte zwischen 2000 und 2050 unter Berücksichtigung des Klimawandels und unterschiedlicher Bewirtschaftung an drei verschiedenen Standorten (KOLBE 2009, verändert)**

Verfahren	C <sub>org</sub> -Entwicklung (% TM)			
	D*	Lö*	V*	Mittelwert
Standort:				
Grundfruchtfolge CANDY	-0.126	+0.059	+0.023	-0.015
REGRESS	-0.167	-0.093	- 0.428	<u>-0.229</u>
				-0.122
Ertragsanstieg bei Grundfruchtfolge	+0.026	+0.099	+0.095	+0.073
Umstellung auf Ökolandbau 2000	+0.021	+0.057	+0.080	+0.053
Ertragsanstieg bei Ökolandbau 2000	+0.021	+0.059	+0.109	+0.063
Ausdehnung von Energiemais auf 50 % der Fläche	-0.088	-0.103	-0.165	-0.119
Abfuhr sämtlicher Koppelprodukte bei Ausdehnung von Energiemais auf 50 %	-0.170	-0.222	-0.264	-0.236
Anbau von 100 % Getreide in der Fruchtfolge	-0.026	-0.038	-0.101	-0.055
Anbau von 30 % Hackfrucht in der Fruchtfolge	-0.079	-0.097	-0.149	-0.108
30 % Hackfrucht und 100 dt/ha Kompost	+0.243	+0.238	+0.139	+0.207
100 % Getreide und 100 dt/ha Kompost	+0.279	+0.288	+0.226	+0.264
100 % Getreide und 170 kg N /ha Hühnertrockenkot	+0.069	+0.095	+0.034	+0.075
Viehtrieb (Rind) + Gülleausbringung	-0.014	-0.037	-0.090	-0.047
Viehtrieb (Rind) + Biogasgülleausbringung	-0.050	-0.078	-0.132	-0.086
Viehtrieb (Rind) + Stallmistausbringung	+0.072	+0.025	-0.005	-0.031
Viehtrieb (Schwein) + Gülleausbringung	+0.083	+0.077	+0.034	+0.065
20 % Ackerfutter in der Fruchtfolge	+0.076	+0.133	+0.092	+0.100
50 % Klee gras in der Fruchtfolge	+0.120	+0.159	+0.121	+0.133
Abfuhr sämtlicher Koppelprodukte aus 50 % Klee gras in der Fruchtfolge	+0.035	+0.053	+0.026	+0.038
Grünland mit Abfuhr	+0.264	+0.275	+0.270	+0.270
Grünland als Dauerstilllegung	+0.337	+0.332	+0.349	+0.339
Mähweide	+0.200	-	+0.637	+0.418
Weide	+0.383	-	+0.818	+0.600
Wiese	+0.126	+0.218	+0.361	+0.235

\*Standorte: D = Diluvial-Boden aus anlehmigem Sand; Lö = Löss aus sandigem Lehm; V = Verwitterungsboden aus sandigem Lehm

Für die Erosionssimulationen („veränderter Gehalt an organischem Kohlenstoff“, Abschnitt 3.3.4) wurde aufgrund der Heterogenität der Ergebnisse von KOLBE (2009) eine mittlere Abnahme des Gehaltes an organischem Kohlenstoff um 0.1 % im Zeitraum von 2041-2050 und um 0.2 % im Zeitraum von 2091-2010 für alle Böden angenommen.

Der Einfluss von Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung wurde an Fruchtfolgen mit Kleeerasanbau untersucht. Hierbei wurden die Verfahren Grubberbearbeitung und Direktsaat mit dem Verfahren Pflug - unter Zugrundelegung der Ertragsniveaus bei Pflug - verglichen. Im Vergleich zum Pflugeinsatz wird durch stetige Anwendung des Grubbers und der Direktsaat eine Umschichtung der Humusgehalte im Tiefenprofil bewirkt. Durch konservierende Bearbeitung mit dem Grubber und durch Direktsaat erfolgt eine z. T. deutliche Anreicherung von Humus in der Schicht 0-10 cm Bodentiefe. Der Anreicherungsfaktor wächst, je weniger intensiv die Bearbeitung erfolgt und je mehr Mulch auf der Oberfläche verbleibt. Durch die Humusanreicherung an der Bodenoberfläche wird die Stabilität der Oberflächenaggregate erhöht: der Boden ist weniger anfällig für Verschlammung und widerstandsfähiger gegenüber Erosion. In den darunter liegenden 20 cm Tiefe wird dagegen in unterschiedlichem Ausmaß eine Abreicherung an Humus bewirkt. Durch das Pflügen unterbleibt eine solche Schichtung, es stellt sich ein mittleres Niveau an Humus im Profil ein. Im Durchschnitt über die gesamte Profiltiefe (0-30 cm) sind zwischen den drei Verfahren kaum Unterschiede zu erkennen. Vergleichbare Auswirkungen der reduzierten Bodenbearbeitung wurden auch von NITZSCHE (2007), HÜLSBERGEN & KÜSTERMANN (2007) und APPEL (2008) (in KOLBE 2009) beschrieben, während aus amerikanischen Versuchen oft von deutlich positiveren Auswirkungen auf die  $C_{org}$ -Gehalte des Bodens berichtet wird (RASMUSSEN & COLLINS 1991; ZIBILSKE et al. 2002) (in KOLBE 2009).

NITZSCHE (2009) stellte die Ergebnisse aus der Beprobung eines langjährigen Feldversuches bei Lüttewitz (veröffentlicht in der Diplomarbeit von KELLER 2006) im Workshop des LfULG „Bodenschutz und Klimawandel II“ am 27.04.2009 vor. Demnach nehmen die Gehalte an organischem Kohlenstoff im Oberboden (0-10 cm) bei langjähriger reduzierter Bodenbearbeitung signifikant zu (Tabelle 11).

**Tabelle 11: Ct-Masse in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Tiefenstufe (NITZSCHE 2009, verändert)**

Tiefenstufe	Ct Masse (t/ha)				Ct Masse-%			
	Pflug	Mulch Locker	Mulch	Direktsaat	Pflug	Mulch Locker	Mulch	Direktsaat
0-2.5 cm	3.1	4.6	5.2	6.2	1.24	1.84	2.08	2.48
2.5-5 cm	3.1	4.4	5	5.1	1.24	1.76	2.00	2.04
5-10 cm	6.3	8.4	8.2	7.7	1.26	1.68	1.64	1.54
10-15 cm	6.9	7.3	7.2	7.4	1.38	1.46	1.44	1.48
15-20 cm	7.3	6.3	6.6	6.2	1.46	1.26	1.32	1.24
<20 cm	12.2	9.2	9.5	8.4	0.61	0.46	0.48	0.42

Bei diesen Werten wurde eine Abnahme des organischen Kohlenstoffgehaltes durch verstärkte Mineralisation im Zuge der vorhergesagten Temperaturerhöhung nicht berücksichtigt. Der Mulchanteil bei Grubberbearbeitung ist variabel. Ob eine Anreicherung von organischem Kohlenstoff im Oberboden auch unter den Bedingungen des Klimawandels erfolgt, hängt von der Menge und der Zusammensetzung der verbleibenden Erntereste ab. Für das Simulationsszenario „konservierende Bodenbearbeitung“ (Abschnitt 3.3.3) – Grubberbearbeitung mit nur 20 % Mulchbedeckung – wurde der Anteil des organischen Kohlenstoffes nicht manuell erhöht. Beim Szenario Direktsaat (mit 70 % Mulchbedeckung) wurde eine mittlere Erhöhung des Gehaltes an organischem Kohlenstoff um 1 % für beide Zukunftszeiträume angenommen.

### 2.3.3 Veränderung des Bedeckungsgrades

Der Bedeckungsgrad wird hauptsächlich beeinflusst durch:

- eine veränderte Phänologie (Abschnitt 2.3.3.1)
- veränderte Fruchtfolgen und Landnutzung (Abschnitt 2.3.3.2)
- Ertragsänderungen (Abschnitt 2.3.3.3) aufgrund von
  - Trockenstress (Reduktion der Sommerniederschläge, Erhöhung der Temperaturen)
  - CO<sub>2</sub>-Düngeeffekten
  - Veränderungen im Schädlingsspektrum

### 2.3.3.1 Veränderte Phänologie

Im KliWEP-Projekt (PÖHLER et al. 2007) wurden Beginn und Ende individueller Vegetationszeiten von Pflanzenarten in Abhängigkeit von Klimaeinflüssen und Standortfaktoren in Sachsen bestimmt. Hierfür wurden die zur Entwicklung und Validierung des Modells WaSIM-ETH relevanten phänologischen Beobachtungsdaten für die wichtigsten obst- und pflanzenbaulichen Landnutzungen in Sachsen ausgewertet. Zusätzlich wurde auch ein Algorithmus zur Berücksichtigung der Auswirkung von Frühjahrs-trockenheit auf die phänologische Entwicklung konzipiert. Bei den Forstbaumarten, den Obstgehölzen und den landwirtschaftlichen Dauerkulturen zeigte sich ein seit etwa Mitte der 1980er-Jahre einsetzender Trend zu einem früheren Vegetationsbeginn. Bei Getreide und Hackfrüchten konnte ein solcher Trend dagegen nicht nachgewiesen werden, was vermutlich auf die auch durch subjektive Erwägungen der Landwirte beeinflussten Aussaattermine zurückzuführen ist.

In Tabelle 12 sind die durchschnittlichen phänologischen Termine von Feldfrüchten für Sachsen nach PÖHLER et al. (2007) zusammengestellt.

**Tabelle 12: Beginn der phänologischen Phasen von Feldfrüchten in Sachsen (PÖHLER et al. 2007)**

Beginn der phänologischen Phasen in Sachsen:							
Feldfrucht:	Aussaat	Aufgang	Schossbeginn	Beginn Ährenschieben	Beginn Blüte	Ende Blüte	Ernte Vollreife
Sommergerste	27.03.	16.04.	-	18.06.	-	-	10.08.
Hafer	01.04.	18.04.	20.05.	16.06.*	-	-	18.08.
Winterweizen	05.10.	20.10.	27.04.	31.05.	-	-	09.08.
Wintergerste	18.09.	30.09.	20.04.	15.05.	-	-	15.07.
Winterroggen	26.09.	08.10.	22.04.	15.05.	29.05.	06.06.	02.08.
	Aussaat	Aufgang	4. Laubblatt	Beginn Längenwachstum	Beginn Blüte	70 % Schoten reif/ physische Reife	Ernte Vollreife
Winterraps	29.08.	10.09.	04.10.	07.04.	03.05.	15.05.	28.07.
Mais	27.04.	11.05.	-	07.06.	21.07.	06.09.	20.09.
Zuckerrüben	10.04.	28.04.	-	-	-	-	10.10.
Spätkartoffeln	06.05.	03.06.	-	-	17.07.	-	26.09.

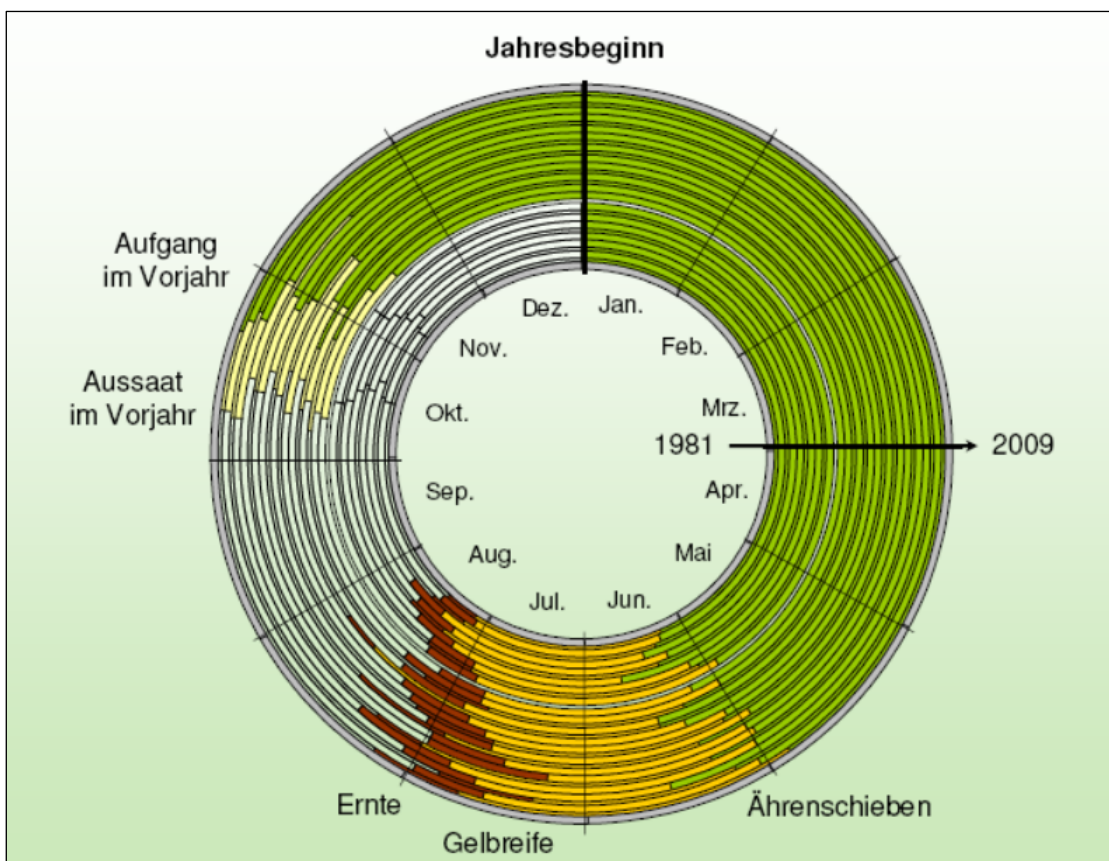
\*) veränderter Wert (in Originalquelle Druckfehler)

Nach KÜCHLER & SOMMER (SMUL 2005) ergibt sich über den Untersuchungszeitraum 1961–2000 ein Trend zur Verlängerung der Vegetationsperiode von 2,2 Tagen pro Jahrzehnt, der hauptsächlich durch die Verfrühung des Vegetationsbeginns bedingt ist. Die bereits beobachtete Verlängerung der thermischen Vegetationszeit wird sich künftig fortsetzen. Die mittlere Dauer wird um mindestens 10 Tage bis maximal 31 Tage zunehmen. Als Ursachen sind sowohl die Verfrühung des Vegetationsbeginns als auch die Verspätung des Vegetationsendes anzusehen. Hierbei kommt es zukünftig vor allem an den Stationen bis etwa 450 mNN zu einer deutlichen Verfrühung des Vegetationsbeginns. Die Länge der thermischen Vegetationsperiode ändert sich demzufolge vor allem in den Tieflandsbereichen und bleibt mit zunehmender Höhe annähernd gleich. Vom Leipziger Land bis zum südlichen Sächsischen Hügelland verlängert sich die Vegetationsperiode bis 2050 auf 280–300 Tage, d. h. um 30–50 Tage. Auch in der Elbtalweitung wird eine Verlängerung von 20–30 Tagen erwartet. In den höchsten Lagen des Sächsischen Mittelgebirges fällt die Verlängerung mit weniger als fünf Tagen nur gering aus.

Seit dem Ende der 1980er-Jahre zeigen sich bei nahezu allen Pflanzen Verfrühungen im Aufgang, in der Gelbreife (bei Getreide) und in der Vollreife, die außerordentlich gut mit den Veränderungen der Lufttemperatur korrespondieren. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die natürliche Vegetation als auch Obstgehölze und landwirtschaftliche Kulturen auf die Klimaveränderungen bereits deutlich reagiert haben. Unterschiede in der Reaktionsstärke bestehen sowohl zwischen den Pflanzenarten als auch in der Jahreszeit. Generell zeigen die Frühjahrsphasen den stärksten Trend zur Verfrühung. Diese starken Verfrühungen sind auf die markanten Veränderungen der Lufttemperaturen in den beiden letzten Wintermonaten zurückzuführen. Innerhalb einer Pflanzenart nimmt dieser Trend im Jahresverlauf ab und kann sich bis zum Herbst teilweise in eine Verspätung des Phaseneintritts umwandeln. Die Pflanzen reagieren im Frühjahr stark auf die Variabilität der Witterung, während die physiologischen Prozesse der Pflanze im Herbst durch höhere Temperaturen länger aufrechterhalten werden können. So ist bei einem Anstieg der Herbsttemperaturen eine verlängerte Pflanzenentwicklung zu erwarten, wenn nicht vorausgehende Trockenheit zu vorzeitiger Blattverfärbung und zum Blattfall führt.

Bei den landwirtschaftlichen Nutzpflanzen sind bisher nur geringe Veränderungen in der Entwicklung erkennbar. Die Phase der Bestellung konnte bei beiden untersuchten Getreidearten (Hafer, Winterroggen) nicht berechnet werden, weil der Termin von vielfältigen Faktoren abhängig ist. Beim Hafer besteht ein sehr enger Zusammenhang zwischen der Bestellung und dem Auflaufen der Saat. Die nachfolgenden Phasen sind relativ unabhängig vom Aussaattermin und werden zunehmend durch den Witterungsverlauf gesteuert. Die sich in den Szenarien ergebenden Veränderungen im Eintrittstermin der Phasen sind jedoch äußerst gering. Beim Winterroggen erfolgen die Bestellung und das Auflaufen der Saat zum Ende der Vegetationsperiode im Herbst. Die nachfolgenden Phasen wie Schossen, Ährenschieben, Vollblüte und Ernte werden erst im darauf folgenden Jahr beobachtet und sind somit unabhängig vom Aussaattermin. Der Schossbeginn und der Beginn des Ährenschiebens werden maßgeblich durch die Temperaturen im zeitigen Frühjahr beeinflusst. Weil in diesem Zeitraum die Temperaturänderungen eher gering sein werden, beträgt die maximale Verfrühung beider Phasen im Durchschnitt nur moderate drei Tage zwischen der Bestellung und dem Auflaufen der Saat. Die Abnahme der jährlichen Anzahl von Frosttagen ist vor allem auf die Reduktion der herbstlichen Frühfröste zurückzuführen. Das zeitliche Auftreten von Spätfrösten hingegen unterliegt kaum Veränderungen (nach KÜCHLER & SOMMER 2005). Die Aussaattermine für Sommerfrüchte werden sich deshalb kaum verändern.

Im REGKLAM-Projekt (Regionales Klimaanpassungsprogramm Modellregion Dresden, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. [IÖR]) werden derzeit die Termine der Phänophasen für Winterweizen, Wintergerste, Körner- und Silomais, Raps und Roggen für verschiedene Orte in Sachsen zusammengetragen. Die Auswertung für Winterweizen für den Standort Nossen zeigt Abbildung 7 (vorgestellt auf dem 2. Projektworkshop Land- und Forstwirtschaft [TP 3.3.1 Anpassungsstrategien für den regionalen Pflanzenbau, 15./16.10.2009 Radebeul] von Dr. Marco Lorenz, LfULG). Aus Abbildung 7 geht hervor, dass sich seit 1981 Aussaat und Aufgang und ebenso Gelbreife und Ernte um etwa 2-3 Wochen verfrüht haben.



**Abbildung 7: Phänologische Daten 1981-2009 für Winterweizen am Standort Nossen (Quelle: LORENZ 2009)**

Nach SCHALLER & WEIGEL (2007) ergeben sich aus der Auswertung verschiedener Literaturquellen

- eine Verfrühung des Vegetationsbeginns um 7.5 d (Datenauswertung von 1971-2000) bzw.
- eine Verfrühung um 2.3 d/Dekade (nach PARMESAN & YOHE 2003 und CHMIELEWSKI et al. 2004 in SCHALLER & WEIGEL 2007) und

- eine Verlängerung der Vegetationsperiode um 10 d (nach MENZEL et al. 2006 in SCHALLER & WEIGEL 2007) bzw. 8 d (nach CHMIELEWSKI & RÖTZER 2002 in SCHALLER & WEIGEL 2007, auf der Grundlage einer Datenauswertung von 1989 bis 1998)

Im Durchschnitt gehen die Autoren SCHALLER & WEIGEL (2007) von einer Verfrühung des Vegetationsbeginns um eine Woche je Grad Temperaturerhöhung aus.

CHMIELEWSKI et al. (2004) und ESTRELLA (2007) haben die Änderung der Phänologie für verschiedene Feldfrüchte in Deutschland untersucht und statistische Änderungen pro Dekade (CHMIELEWSKI) bzw. pro Jahr (ESTRELLA) berechnet (Tabelle 13: CHMIELEWSKI 2004, Tabelle 14: ESTRELLA 2007). Der Untersuchung nach ESTRELLA (2007) liegt eine 53-jährige Datenreihe zu Grunde.

**Tabelle 13: Phänologie von Winterroggen, Mais und Zuckerrübe: Durchschnittswerte für Deutschland nach CHMIELEWSKI et al. (2004)**

Phase	Winterroggen		Mais		Zuckerrübe	
	Datum	Trend (d/10a)	Datum	Trend (d/10a)	Datum	Trend (d/10a)
Aussaat	02.10	-1.4	30.04	-1.7	09.04	-1.6
Keimen	15.10	-1.6	16.05	-3.3	30.04	-1.2
Spross	26.04	-2.9				
Knospenbildung	21.05	-2.0				
Blüte	07.06	-1.4				
Reihenschließung					17.06	-1.7
Ernte	07.08	-1.5	27.09	-1.3	05.10	-0.6

**Tabelle 14: Phänologie und Trend ausgewählter Feldfrüchte in Deutschland nach ESTRELLA (2007)**

Pflanze	Phase:	Datum:	Trend (d/a):
Hafer	Aussaat	26.03	-0.057
	Keimen	13.04	-0.053
	„beginning of shooting“	21.05	-0.209
	„beginning of heading“	20.06	-0.160
	„beginning of hard dough“	05.08	-0.089
	Ernte	17.08	-0.243
Zuckerrübe	Aussaat	10.04	-0.187
	Keimen	01.05	-0.095
	Dichter Stand	20.06	-0.227
	Ernte	05.10	-0.059
Futterrübe	Aussaat	18.04	-0.009
	Keimen	08.05	+0.017
	Dichter Stand	23.06	-0.131
	Ernte	07.10	+0.005
Wintergerste	Aussaat	22.09	-0.051
	Keimen	04.10	-0.085
	„beginning of shooting“	29.04	-0.325
	„beginning of heading“	21.05	-0.170
	„beginning of hard dough“	09.07	-0.278
	Ernte	20.07	-0.120
Winterroggen	Aussaat	01.10	-0.074
	Keimen	15.10	-0.094
	„beginning of shooting“	29.04	-0.255
	„beginning of heading“	22.05	-0.115
	Volle Blüte	07.06	-0.176
	„beginning of hard dough“	27.07	-0.293
	Ernte	09.08	-0.143
Mais	Aussaat	01.05	-0.232
	Keimen	18.05	-0.265
	„beginning of heading“	09.07	+0.287

Pflanze	Phase:	Datum:	Trend (d/a):
	Volle Blüte	21.07	-0.047
	Ernte	27.09	-0.308
Winterweizen	Aussaat	13.10	-0.099
	Keimen	29.10	-0.116
	„beginning of shooting“	08.05	-0.310
	„beginning of heading“	11.06	-0.206
	„beginning of hard dough“	02.08	-0.313
	Ernte	15.08	-0.217
Winterraps	Aussaat	26.08	-0.091
	Keimen	07.09	-0.068
	Öffnen der ersten Blüten	09.05	-0.295
	Ernte	25.07	+0.315

Wie bereits im Abschnitt 2.2.3.1 (Sensitivitätsanalyse) beschrieben, bewirkt die Änderung des Bedeckungsgrades eine gleichgerichtete Änderung der Rauigkeit. Nehmen Bedeckungsgrad und Rauigkeit zu, so nimmt der Bodenaustrag ab. Die Sensitivitätsberechnungen mit EROSION 3D belegen einen linearen Zusammenhang zwischen Bedeckungsgrad und Bodenaustrag. Eine Erhöhung der Rauigkeit bewirkt dagegen eine exponentielle Abnahme des Bodenaustrages (MICHAEL, A. 2000). Die relative Bedeutung der beiden Parameter ist allerdings im Vergleich zu den anderen Input-Parametern gering (Sensitivitätsparameter S: Bedeckungsgrad [%]:  $S = -0.1$ , Rauigkeit [ $s/m^{1/3}$ ]:  $S = -0.9$ ).

Eine frühere Ernte, die mit einer radikalen Änderung der Bodenbedeckung und der Bodenstruktur (ausgedrückt durch die Parameter Erosionswiderstand, Lagerungsdichte, Rauigkeit und Skinfaktor) einhergeht, kann eventuell erhebliche Auswirkungen auf die Bodenerosion haben. Bei der Untersuchung der Auswirkungen einer veränderten Phänologie auf den Bodenabtrag wird aufgrund der Ergebnisse von KÜCHLER (2009) ausschließlich der Erntezeitraum betrachtet (Abschnitt 3.3.5).

### 2.3.3.2 Veränderte Fruchtfolgen und Landnutzung

SCHALLER & WEIGEL (2007) empfehlen mögliche Anpassungsstrategien an den Klimawandel, die von der Landwirtschaft ergriffen werden könnten:

- verstärkter Anbau von spät reifenden Sorten wie z. B. Körnermais zur Ausnutzung der längeren Vegetationsperiode
- Anbau von zwei Hauptkulturen innerhalb einer Vegetationsperiode, sofern Wasser- und Nährstoffbedarf gedeckt werden
- verstärkter Anbau von Winterkulturen, die später ausgesät werden
- verstärkter Anbau von Wintergetreide, weil Wintergetreide weniger dem Sommertrockenstress und extremen Temperaturen ausgesetzt ist
- frühere Aussaat von Sommerkulturen, um Trockenstress im Hochsommer zu vermeiden
- Nutzen der Wettbewerbsvorteile von Roggen (wegen des effizienten Wurzelsystems) und Sommergerste (Ertragsstabilität auch bei extremen Witterungen)
- Ausweitung des Anbaus wärmelimitierter Arten Richtung Norden und in höhere Lagen wie z. B. Mais, Zuckerrüben, Sonnenblumen, Wein je nach Eignung des Bodens
- Anbau neuer Sorten oder sogar Arten wie z. B. Hartweizen, Winterhafer, Sudangras, Hirse

Im Bericht „Klimawandel und Landwirtschaft“ (MIRSCHER et al. 2009a) wird die Kosten-Leistungs-Relation von Feldfrüchten in €/ha, basierend auf den voraussichtlichen Ertragsentwicklungen, berechnet. Daraus ergibt sich eine Rangfolge der Ackerfrüchte nach Eignung für die großen Subregionen Sachsens (Tabelle 15).

**Tabelle 15: Rangfolge der Feldfrüchte (MIRSCHER et al. 2009a)**

Status quo					2050				
Rang	Heidegebiet	Hügelgebiet	Lössgebiet	Gebirge	Rang	Heidegebiet	Hügelgebiet	Lössgebiet	Gebirge
1	Raps	Raps	Raps	Raps	1	Raps	Raps	Raps	Raps
2	WW	WW	WW	WW	2	WW	WW	WW	WW
3	WG	WR	WG	SM	3	WG	WG	WG	WG
4	WR	WG	WR	WG	4	WR	WR	WR	WR
5	SM	SM	SM	WR	5	SM	SM	SM	SM

WW = Winterweizen, WG = Wintergerste, WR = Winterroggen, SM = Silomais



Im gleichen Bericht wird die Entwicklung einzelner Regionen genauer beschrieben:

- **Erzgebirgskamm und -vorland, Vogtland, Elsterbergland (allgemein günstigere Bedingungen)**
  - verstärkter Anbau von Winterkulturen, die später ausgesät werden
  - flächenhafte Ausweitung des Winterweizen-Anbaus
  - Maisanbau auch in höheren Höhenlagen
- **Oberlausitz und Sächsische Schweiz**
  - wasseranspruchsvolle Fruchtarten wie Winterweizen, Kartoffeln und Zuckerrüben nur noch auf den Standorten mit hoher nutzbarer Feldkapazität
  - eventuell Ausweitung des Roggenanbaus
  - Kartoffelanbau nur noch bei Beregnung wirtschaftlich
- **Mittelsächsisches Lösshügelland**
  - alle anspruchsvollen Kulturen bleiben anbauwürdig
  - Anbau von Winterweizen und Winterraps verstärkt und in enger Abfolge
  - stärkerer Anbau von Körnermais (frühere Ernte) in direkter Fruchtfolge mit Wintergetreide
  - verstärkter Anbau von Luzerne als trockenheitsverträgliche Futterpflanze
  - Monoanbau von Winterweizen
- **Sächsisches Heidegebiet, Riesaer-Torgauer Elbtal**
  - verstärkter Anbau von Roggen, auch in längeren Roggenseibstfolgen auf den ärmsten Standorten
  - Rückgang des Rapsanbaus
  - Anbau von Wintergerste stabil
  - Anbau von Sorghumhirse zur Biomasseerzeugung in Ergänzung zum Maisanbau
- **allgemeine Erwartungen**
  - Anbau von Sudangras oder Zuckerhirse als Zwischenfrucht nach Winterfrüchten

Der Energiepflanzenanbau hat in den letzten zehn Jahren deutlich zugenommen. In Deutschland wurden im Jahr 2008 etwa zwei Millionen Hektar (ca. 17 % des Ackerlandes) für den Anbau von Energie- und Industriepflanzen genutzt (RÖHRICHT et al. 2009). Hauptfruchtarten sind Winterraps (Gewinnung von Biodiesel), Getreidekorn (Bioalkohol), Energiemais und Getreideganzpflanzen (Biogasgewinnung). Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Energierohstoffen wird sich der Anbau ausweiten – in Abhängigkeit von den Rohstoffpreisen und den künftigen Förderstrukturen.

Die Auswirkungen veränderter Fruchtfolgen werden exemplarisch für das Erzgebirgsvorland und das Sächsische Lösshügelland (Klimastationen Chemnitz und Oschatz: Monokultur Winterweizen, Monokultur Mais) im Abschnitt 3.3.6 beschrieben.

Aufgrund des wachsenden Konkurrenzdrucks zwischen Nahrungsmittelanbau und Energiepflanzenbau sind Landnutzungsveränderungen mit dem Ziel des Erosionsschutzes – z. B. Umwandlung von Ackerland in Grünland oder Wald – in größerem Umfang kaum realistisch. Landnutzungsveränderungen werden deshalb nur für ein Beispiel diskutiert, bei dem selbst bei der Anwendung von Direktsaatverfahren noch hohe Einträge in die Vorflut berechnet wurden (siehe Abschnitt 3.3.7).

### **2.3.3.3 Änderung des Bedeckungsgrades durch Ertragsänderungen aufgrund von Trockenstress, CO<sub>2</sub>-Düngeeffekten und Veränderungen im Schädlingspektrum**

Es gibt zahlreiche Studien, in denen der Einfluss des Klimawandels auf die Ertragsleistung von Ackerfrüchten untersucht wurde (SCHALLER & WEIGEL 2007; STOCK 2005; GERSTENGARBE et al. 2003; PÖHLER et al. 2007; BURKART et al. 2004; MIRSCHEL 2009a und 2009b u. a.). Zwischen Ertragsänderung und Änderung des Bedeckungsgrades besteht allerdings kein signifikanter statistischer Zusammenhang.

*Trockenstress:* Bei lang anhaltender Trockenheit muss – je nach Ausprägung – von einer Reduzierung der Bodenbedeckung ausgegangen werden. Mit der jährlichen Umverteilung der Niederschläge gehen Trends zu deutlich trockeneren Verhältnissen

im Sommerhalbjahr einher, während im Winterhalbjahr Entwicklungen in Richtung feuchterer Verhältnisse zu beobachten sind. Der Trend zu größerer sommerlicher Trockenheit ist von erheblicher wasserwirtschaftlicher und ökologischer Bedeutung (HÄNSEL et al. 2004). KÜCHLER & SOMMER (2005) sehen in dem Bericht „Klimawandel in Sachsen“ vor allem die Gebiete mit sandigen Böden mit geringer nutzbarer Feldkapazität in den Heide- und Teichlandschaften Sachsens von verringerten Frühlings- und Sommerniederschlägen betroffen. Die Lösslandschaften hingegen werden weniger starken Trockenperioden ausgesetzt sein.

In der Studie KLARA (STOCK 2005) wurden für Baden-Württemberg die Auswirkungen des erwarteten Klimawandels auf den Mais- und Weizenanbau untersucht. Beim Silomais werden keine bedeutenden Ertragsänderungen erwartet, jedoch verschieben sich die Anbauggebiete. Beim Weizen wird mit Ertragseinbußen von etwa 14 % gerechnet, allerdings ist hierbei kein CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt berücksichtigt worden. Die Ertragseinbußen könnten deshalb auch nur etwa halb so stark ausfallen.

**CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt:** Der Einfluss von steigenden CO<sub>2</sub>-gehalten auf unterschiedliche Gräser und Getreidesorten (u. a. Weizen, Gerste, Hafer, Mais) wurde in zahlreichen experimentellen Studien untersucht. Die Ergebnisse dieser Studien (bis 1999) wurden in einer Datenbank zusammengefasst (JONES & CURTIS 2000). Die meisten Experimente zeigen einen Anstieg der Biomasse bei C3-Pflanzen bei steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration. Im Braunschweiger FACE Experiment (WEIGEL et al. 2005; LEHNHART 2008) wurde eine Steigerung der oberirdischen Biomasseproduktion von 6.1 bis 14.4 % für verschiedene Feldfrüchte beobachtet (Tabelle 16).

**Tabelle 16: CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt (WEIGEL et al. 2005)**

N-Behandlung	CO <sub>2</sub> -Konz.	Fruchtfolgeglied			
		Wintergerste	Weidelgras	Zuckerrübe	Winterweizen
		[g/m <sup>2</sup> ]			
reduziert (50%)	380 ppm	1360	484	1919	1163
reduziert (50%)	550 ppm	1546	531	2036	1292
relativer CO <sub>2</sub> -Effekt:		+13.7 %	+9.6 %	+ 6.1 %	+11.1 %
ortsüblich	380 ppm	1679	484	2295	1272
ortsüblich	550 ppm	1815	543	2481	1456
relativer CO <sub>2</sub> -Effekt:		+8.1 %	+ 12.1 %	+8.1 %	+14.4 %

BURKART et al. (2004) haben den Einfluss einer CO<sub>2</sub>-Erhöhung auf Sommerweizen und dabei den mit der Bodenbedeckung in direkter Beziehung stehenden Blattflächenindex untersucht. In Tabelle 17 ist dargestellt, wie der LAI (leaf area index) sich durch die CO<sub>2</sub>-Behandlung verändert.

**Tabelle 17: Blattflächenindex mit und ohne CO<sub>2</sub>-Erhöhung (BURKART et al. 2004)**

Jahr und Behandlung	Grüner Blattflächenindex (gLAI)
1998	
normales CO <sub>2</sub> , gut bewässert	7.10 ± 2.69
erhöhtes CO <sub>2</sub> , gut bewässert	7.49 ± 3.18
normales CO <sub>2</sub> , Trockenstress	3.92 ± 1.84
erhöhtes CO <sub>2</sub> , Trockenstress	4.97 ± 1.65
1999	
normales CO <sub>2</sub> , gut bewässert	5.28 ± 1.15
erhöhtes CO <sub>2</sub> , gut bewässert	6.78 ± 1.35
normales CO <sub>2</sub> , Trockenstress	3.24 ± 0.75
erhöhtes CO <sub>2</sub> , Trockenstress	4.46 ± 1.24

Die umfassendste Zusammenstellung für Sachsen enthält Heft 28/2009 der Schriftenreihe des LfULG „Klimawandel und Ertragsleistung“ von MIRSCHEL et al. (2009b) (Tabelle 18). MIRSCHEL et al. simulierten die Entwicklung der Erträge von Winterweizen, Winterroggen, Wintergerste, Wintererbsen und Silomais in Sachsen mit dem Modell YIELDSTAT. Grundlage bildete das mit dem Klimamodell WEREX IV berechnete A1B-Szenario mit je einem Lauf mit trockener und feuchter Realisierung. Es erfolgte ein Vergleich der Zeiträume 1976–2005 und 2021–2050. In den Modellierungen werden drei Varianten berücksichtigt: zum einen die reine Klimaveränderung, zum anderen eine Klimaveränderung mit CO<sub>2</sub>-Effekt und in der dritten Variante wird zusätzlich ein wissenschaftlich-technischer Fortschritt berücksichtigt.

Es wird deutlich, dass sich CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt und Ertragsreduktion durch Trockenstress außer beim Silomais (C4-Pflanze) in etwa ausgleichen.

**Tabelle 18: Relative Ertragsänderungen in den Jahren 2021-2050 im Vergleich zu 1976-2005 für Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Winterraps und Silomais für drei Simulationsvarianten (Variante 1: ohne CO<sub>2</sub>, ohne Trend, Variante 2: mit CO<sub>2</sub>, ohne Trend, Variante 3: mit CO<sub>2</sub>, mit Trend), für die WEREX-Realisierungen WEREX-A1B-FEU und WEREX-A1B-TRO sowie getrennt nach einzelnen Boden-Klima-Regionen (MIRSCHER et al. 2009b)**

Fruchtart	Ertragsänderung 2021-2050 vs. 1976-2005					
	relative Abweichungen (%)					
	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
	WEREX-A1B-TRO	WEREX-A1B-FEU	WEREX-A1B-TRO	WEREX-A1B-FEU	WEREX-A1B-TRO	WEREX-A1B-FEU
<b>Erzgebirgskamm und -vorland, Vogtland, Elsterbergland</b>						
Winterweizen	-2.8	-2.6	2.0	2.2	19.1	18.8
Winterroggen	-3.2	-2.5	1.5	2.2	9.6	10.3
Wintergerste	-3.2	-2.9	1.5	1.8	15.6	15.5
Winterraps	-9.9	-2.1	-6.2	1.9	14.9	22.3
Silomais	-8.7	-7.3	-7.8	-6.4	-2.3	-1.3
<b>Oberlausitz, Sächsische Schweiz</b>						
Winterweizen	-5.9	-4.8	-1.3	-0.2	15.4	15.8
Winterroggen	-6.9	-5.9	-2.3	-1.3	6.4	7.0
Wintergerste	-6.8	-5.7	-2.2	-1.1	11.6	12.0
Winterraps	-15.2	-6.8	-11.7	-2.9	10.5	18.5
Silomais	-11.7	-9.3	-10.8	-8.4	-5.3	-3.3
<b>Mittelsächsisches Lössgebiet</b>						
Winterweizen	-6.0	-5.4	-1.4	-0.8	16.0	15.9
Winterroggen	-6.8	-6.2	-2.3	-1.6	7.1	7.0
Wintergerste	-6.5	-5.8	-1.9	-1.2	12.2	12.3
Winterraps	-15.5	-6.9	-12.0	-4.1	12.6	18.8
Silomais	-11.4	-9.5	-10.5	-8.6	-4.7	-3.2
<b>Sächsisches Heidegebiet, Riesaer- Torgauer Elbtal (westlicher Teil)</b>						
Winterweizen	-5.5	-4.5	-0.9	0.1	18.3	18.5
Winterroggen	-6.8	-5.3	-2.2	-0.7	7.1	8.8
Wintergerste	-6.5	-5.3	-2.0	-0.7	14.3	17.8
Winterraps	-12.4	-5.4	-8.9	-1.5	13.3	22.8
Silomais	-10.5	-8.0	-9.7	-7.1	-3.4	-1.4
<b>Sächsisches Heidegebiet, Riesaer- Torgauer Elbtal (östlicher Teil)</b>						
Winterweizen	-7.8	-7.1	-3.3	-2.6	18.9	18.2
Winterroggen	-8.5	-7.6	-4.0	-3.1	6.4	6.7
Wintergerste	-9.1	-8.1	-4.6	-3.6	14.1	13.8
Winterraps	-16.5	-9.2	-13.1	-5.4	11.0	17.8
Silomais	-13.6	-11.3	-12.8	-10.4	-6.1	-4.4

**Schädlingsbefall:** In den Veröffentlichungen „Klimawandel in Sachsen“ (KÜCHLER & SOMMER 2005) und „Klimawandel und Landwirtschaft“ (MIRSCHER et al. 2009a) werden die erwarteten Veränderungen des Schädlingspektrums in Sachsen aufgezählt:

Anstieg von:

- Brand- und Rostpilzen wie z. B. Maisbeulenbrand, Alternaria-Dürrfleckenkrankheit bei Kartoffeln, Zikaden als Virusvektoren, Thripse und Maiszünsler, Rostkrankheit bei Wintergetreide, Netzfleckenkrankheit bei Wintergerste, verstärktes Auftreten von Kartoffelkäfern und Getreideblattläusen

Abnahme von:

- Blattfleckenenergern, Krautfäule bei Kartoffeln, Rhynchosporium Blattfleckenkrankheit bei Gerste, Blatt- und Spelzenbräune bei Weizen, Unkräuter: mehr Artenvielfalt und eventuell auch neue, hier unbekannte Arten

Daraus resultiert ein zukünftig verstärkter Einsatz von Insektiziden und weniger Fungiziden. Eine Änderung der Bodenbedeckung ist nur bei extremem Befall zu erwarten und nicht prognostizierbar. Es wird deutlich, dass die Variabilität bzw. die Ertragsinstabilität in Abhängigkeit von den extremen Witterungsereignissen bereits zugenommen hat und weiter zunehmen wird. Aufgrund der nicht gesicherten Datenlage könnten die Auswirkungen solcher Ereignisse auf die Bodenerosion durch Wasser nur exemplarisch im Zuge einer Sensitivitätsanalyse betrachtet werden.

### 2.3.4 Veränderte Bodenbearbeitung

Die wirksamste landwirtschaftliche Schutzmaßnahme gegen Wassererosion ist die Umstellung der Bodenbearbeitung auf dauerhaft konservierende Verfahren.

Bei *konservierender Bodenbearbeitung* wird auf eine Bearbeitung mit dem Pflug verzichtet – der Boden wird nicht gewendet, sondern mit Bodenbearbeitungsgeräten wie Grubber, Scheibeneggen oder zapfwellengetriebenen Geräten oberflächlich aufgelockert. Hierbei muss unterschieden werden, wie intensiv und konsequent die konservierende Bodenbearbeitung durchgeführt wird. Je länger konservierende Bodenbearbeitung praktiziert wird und je minimaler der Eingriff in die natürliche Bodenstruktur erfolgt, desto besser ist der Erosionsschutz. Durch die Umstellung auf eine nichtwendende Bodenbearbeitung beginnt eine multifaktorielle Strukturveränderung im Oberboden, die erst nach Jahrzehnten – je nach Ausgangszustand – abgeschlossen ist. Auf und nahe der Oberfläche verbleiben Ernterückstände, die sowohl den Bedeckungsgrad und die Rauigkeit als auch langfristig den Gehalt an organischer Substanz im Oberboden und damit die Aggregatstabilität erhöhen. Infolge des höheren Nahrungsangebotes siedeln sich Regenwürmer an, die u. a. ein stabiles Makroporengefüge schaffen. Selbst bei Wassersättigung wird aufgrund der höheren Aggregatstabilitäten, der höheren Bodenbedeckung und Rauigkeit weniger Boden abgetragen.

Das konsequenteste konservierende Verfahren ist die *Direktsaat*. Durch den Verzicht auf jegliche Bodenbearbeitung bleibt der Eingriff in die Bodenstruktur durch das Einritzen des Bodens zur Saat- und Düngemittelablage minimal.

Die positiven Auswirkungen konservierender Bodenbearbeitung auf den Erosionsschutz werden vielfach in internationalen und nationalen Publikationen beschrieben.

Der prozentuale Anteil der dauerhaft konservierend bestellten Ackerfläche an der Gesamtackerfläche Sachsens (Erosionsminderungsfläche, erfasst im Förderprogramm "Agrarumweltmaßnahmen und Waldmehrung") beträgt derzeit 32,7 % (persönliche Mitteilung SCHMIDT, W., LfULG, 2011). Ziel ist die Ausweitung dauerhaft konservierender Bearbeitungsverfahren.

Durch Berechnungsversuche (MICHAEL, A. 2000; SCHINDEWOLF 2009) liegen die Bodenparameter für EROSION 3D für konservierend und im Direktsaatverfahren bearbeitete Schläge für die in Sachsen von Erosion betroffenen Bodenarten vor. Im Vergleich zur Parametrisierung konventionell bearbeiteter Böden erhöhen sich Erosionswiderstand, Skinfaktor, Rauigkeit, Bedeckungsgrad, der Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden, aber auch die Lagerungsdichte. Bis auf die Erhöhung der Lagerungsdichte bewirken diese Veränderungen eine Reduzierung des Bodenaustrages (siehe Abschnitt 2.2.3.1 – Sensitivitätsanalyse). Die Untersuchungsergebnisse zum Anfangswassergehalt sind widersprüchlich. Die schützende Mulchschicht verhindert die unproduktive Wasserverdunstung aus dem Oberboden. Somit steigt die Bodenfeuchte im Oberboden gegenüber konventionell bearbeiteten Schlägen (GROSCH 2007). STIEBER (persönliche Mitteilung 2011, HTW Dresden, unveröffentlichte Dissertation) dagegen konnte auf Vergleichsparzellen keine signifikanten Unterschiede feststellen. Eine willkürliche Erhöhung des Anfangswassergehaltes bei konservierender Bodenbearbeitung wurde deshalb nicht vorgenommen.

Für die beiden Simulationsläufe MAX und MIN und beide Simulationszeiträume wird gezeigt, wie sich eine dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung mit dem Grubber und die Direktsaat auf allen Schlägen unter zukünftigen klimatischen Bedingungen auf die Bodenerosion durch Wasser auswirken (Abschnitt 3.3.3).

## 2.4 Referenz-Einzugsgebiete

Folgende Kriterien gelten für die Auswahl der Referenz-Einzugsgebiete:

- Repräsentativität für eine von Erosion betroffene Bodenregion und Klimaregion in Sachsen
- Nähe zu den ausgewählten Niederschlagsstationen Chemnitz, Oschatz und Görlitz
- vorrangig landwirtschaftliche Nutzung der Einzugsgebiete
- Oberlauf-Einzugsgebiete, um den Eintrag in den Vorfluter eindeutig quantifizieren zu können
- in etwa vergleichbare Einzugsgebietsgrößen

Der Datenzuschnitt basiert auf der von SCHINDEWOLF (2009) im Projekt „Flächendeckende Abbildung der Bodenerosion durch Wasser für Sachsen unter Anwendung des Modells EROSION 3D“ entwickelten Methode. Ein zentraler Arbeitsschwerpunkt des Projektes von SCHINDEWOLF umfasste die Erstellung eines Basisdatensatzes auf Grundlage offizieller Geobasisdaten zur Weiterverarbeitung in der Parametrisierungssoftware DPROC. Diese Software wurde von SCHINDEWOLF (2009) dahingehend erweitert, dass nun Einzugsgebiete bzw. Oberflächenwasserkörper (gemäß Wasserrahmenrichtlinie) interaktiv ausgewählt werden können und der Datenzuschnitt für das Modell EROSION 3D im Programmhintergrund erfolgt. Weil ein taggenauer Zugriff auf einzelne Parameter und Flächen mit der Software DPROC nicht möglich ist, wurde die Parameterzuweisung manuell durchgeführt.

Für die vorgesehene schlaggenaue Erosionssimulation ist die Größe der Einzugsgebiete aufgrund des Arbeitsaufwandes limitiert. Abbildung 8 zeigt die ausgewählten Referenzeinzugsgebiete:

- **Dittersdorfer Bach** (Klimastation Chemnitz, repräsentativ für die Unteren und mittleren Lagen des Erzgebirges)
- **Rasslitzbach** (Klimastation Oschatz, repräsentativ für das Mittelsächsische Lösshügelland)
- **Viebigbach** (Klimastation Görlitz, repräsentativ für das Oberlausitzer Lösshügelland)

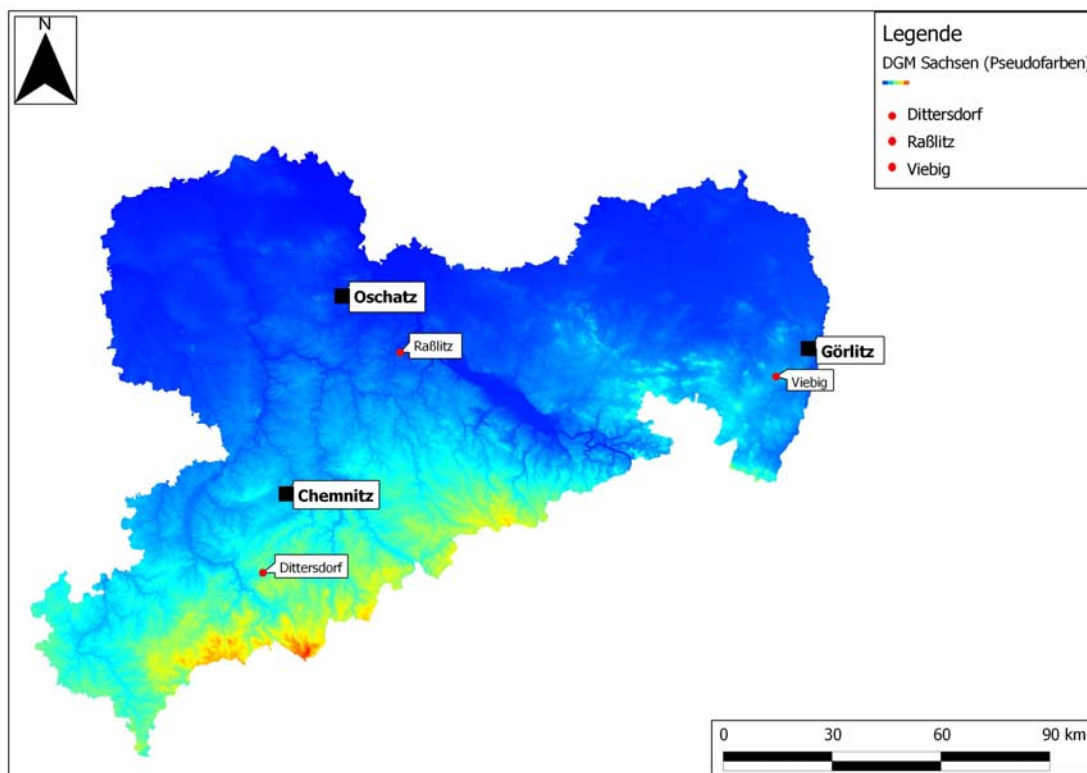


Abbildung 8: Lage der Referenzeinzugsgebiete Dittersdorfer Bach, Rasselitzbach und Viebigbach

Im Folgenden werden die drei Referenzeinzugsgebiete vorgestellt. Die Datengrundlagen wurden nicht manuell an die Orthofoto-Information angepasst, um die Übertragbarkeit des Verfahrens zu gewährleisten. Die einzelnen Polygone stellen die Verschneidung von ATKIS-DLM, INVEKOS-Feldblöcken und der BÜK200 dar. Die Auflösungen der Digitalen Geländemodelle und der Landnutzungsmodelle wurden durch eine Interpolations-Routine auf ein 10x10m-Raster für die Erosionssimulation erhöht.

#### 2.4.1 Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach

Das Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches befindet sich im Naturraum der Unteren und mittleren Lagen des Erzgebirges südwestlich von Chemnitz auf einer Höhe zwischen 465 und 628 m NN (Abbildung 9 und Abbildung 10). Der Dittersdorfer Bach entwässert nach Nord-West. Grundlage des digitalen Geländemodells ist das DGM25 (interpoliert auf 10x10 m, Abbildung 10). Das Einzugsgebiet hat eine Größe von 1.01 km<sup>2</sup>. Abbildung 11 zeigt die Landnutzungsverteilung nach ATKIS DLM25, Abbildung 12 leitet die prozentuale Landnutzungsverteilung ab.

Hauptbodenarten sind Uls und Slu, im äußersten Nordwesten kommt kleinflächig SI3 vor (Abbildung 13).



Abbildung 9: Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches (Orthofoto)

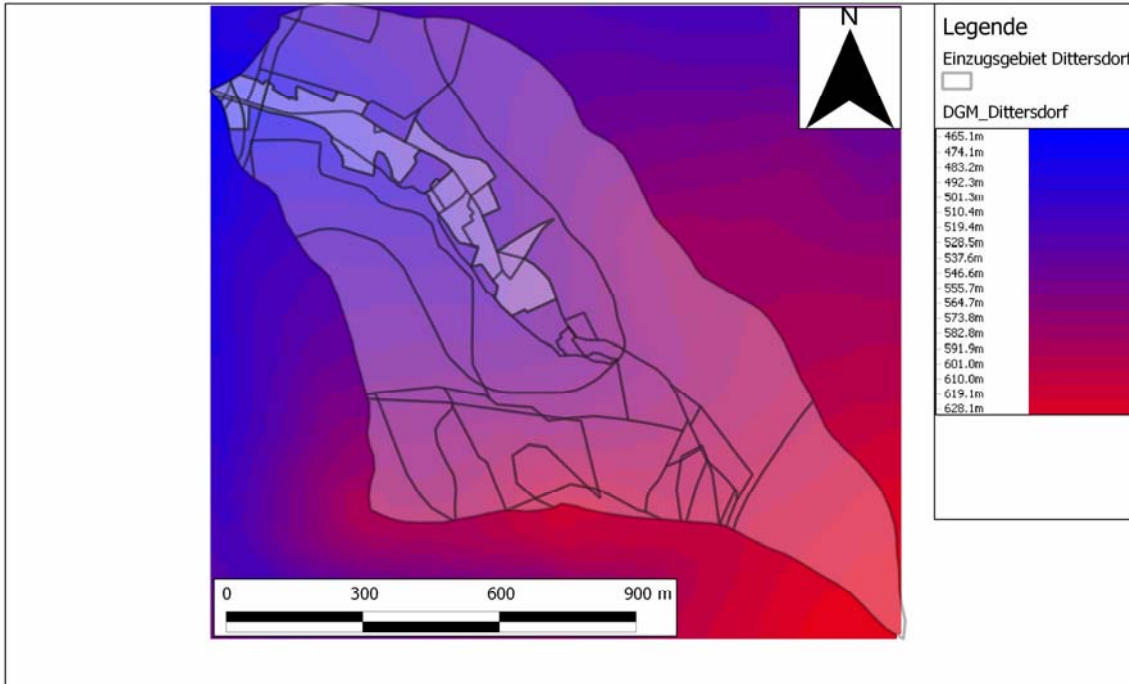


Abbildung 10: Höhenlagen Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach (DGM25) und digitales Geländemodell 10x10 m

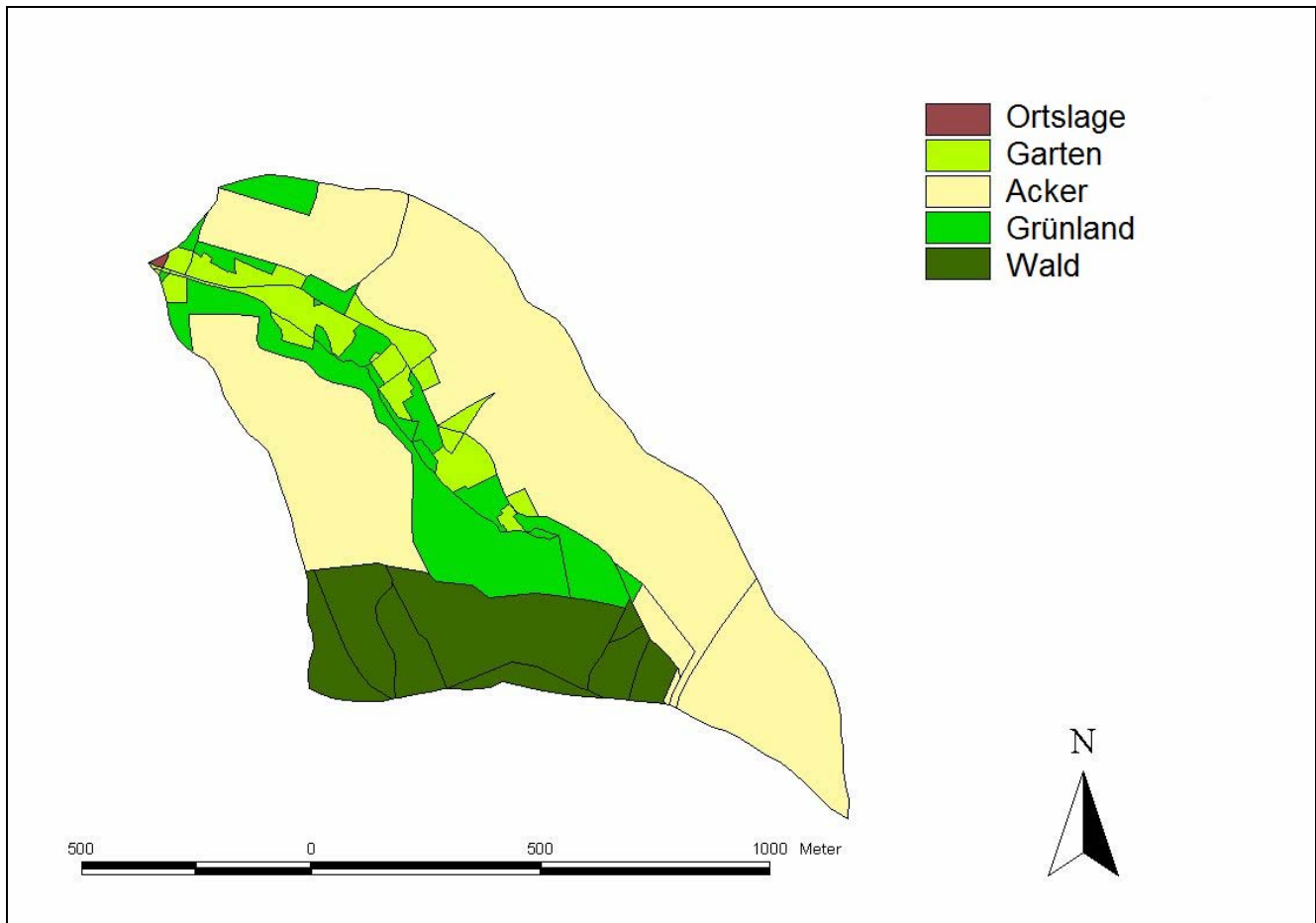


Abbildung 11: Landnutzungsverteilung Dittersdorfer Bach (ATKIS DLM)

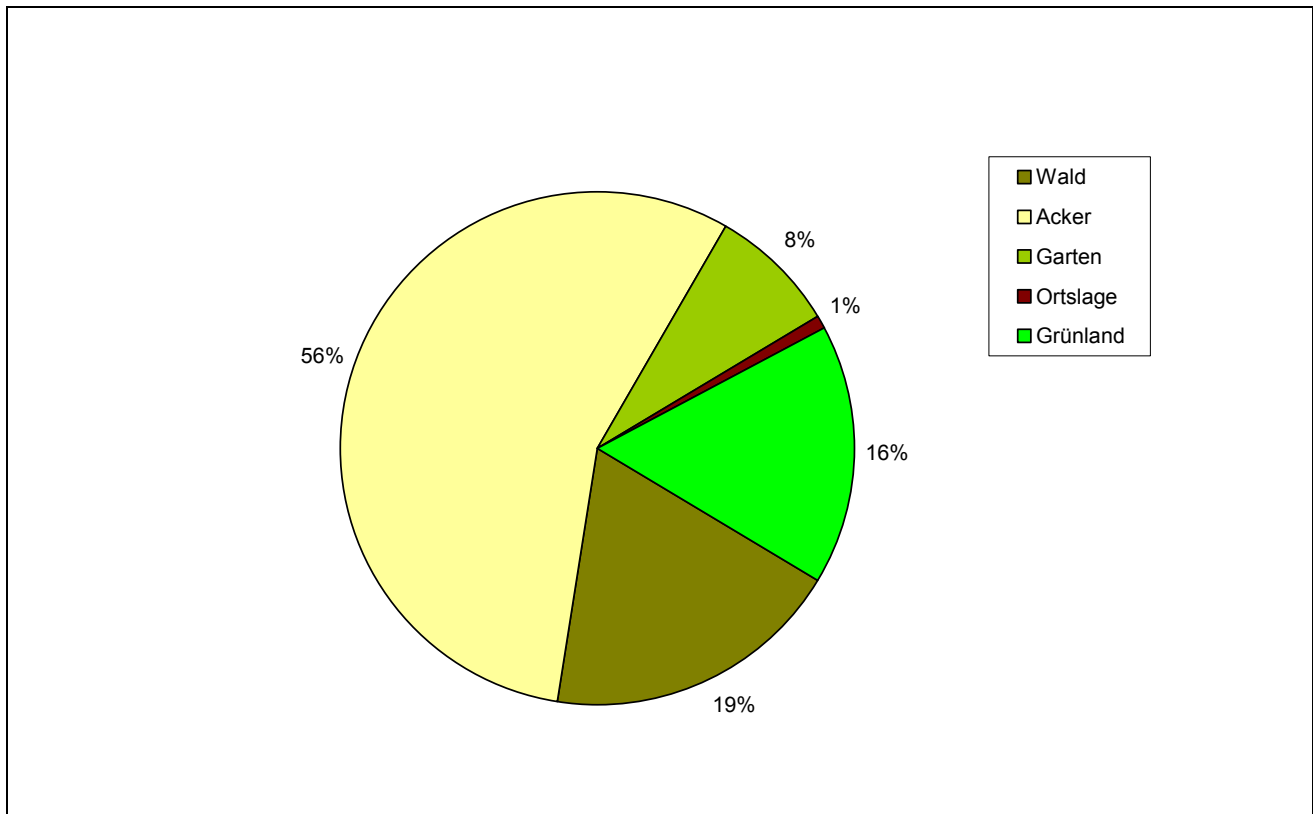


Abbildung 12: Prozentuale Landnutzungsverteilung Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach (ATKIS-LM)

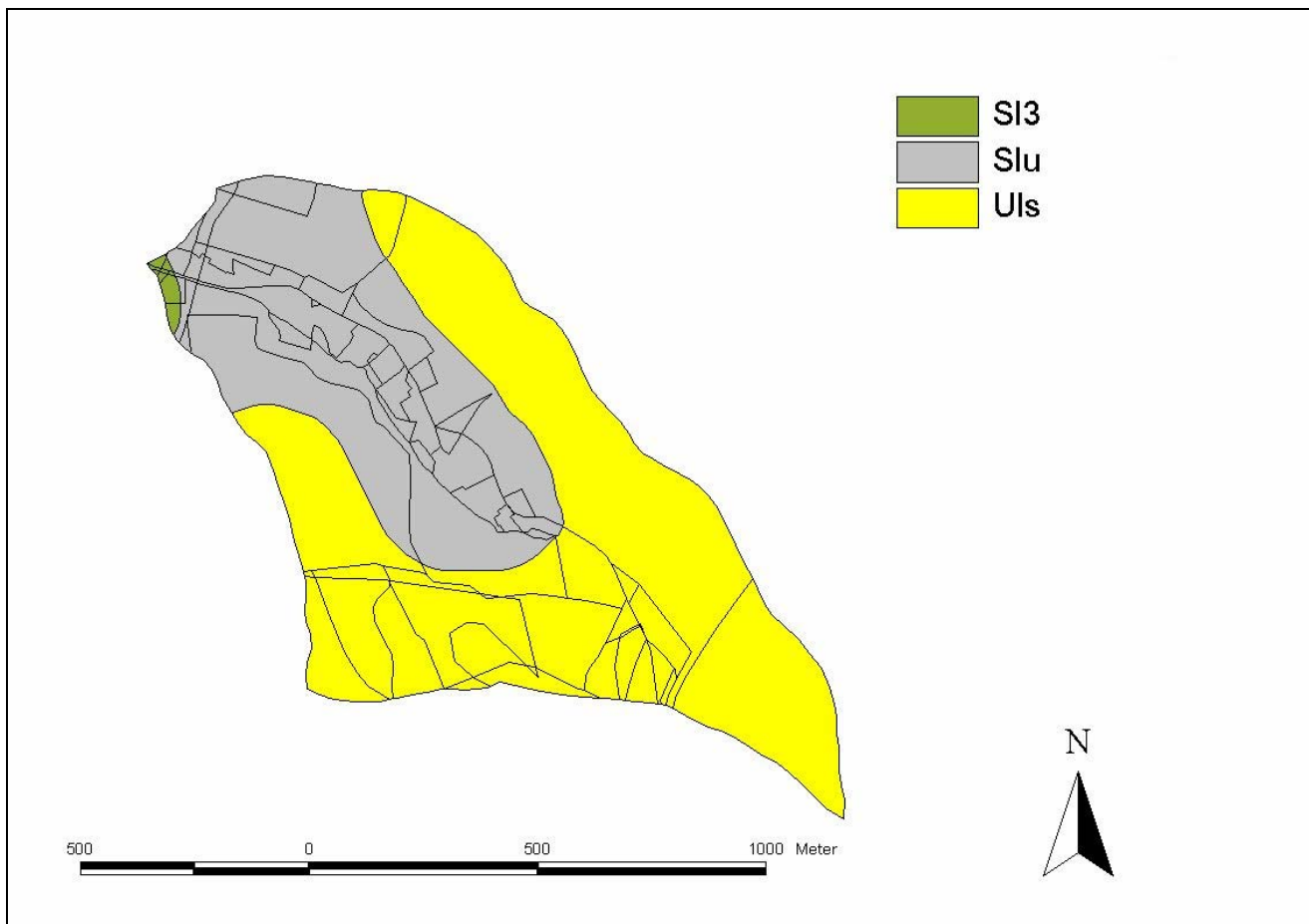


Abbildung 13: Bodenartenverteilung im Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach (BÜK 200)



### 2.4.2 Einzugsgebiet Rasslitzbach

Das Einzugsgebiet des Rasslitzbaches repräsentiert den Naturraum des Mittelsächsischen Lösshügellandes (Abbildung 14). Es befindet sich südöstlich der Klimastation Oschatz auf einer Höhe zwischen 134 und 213 m NN (Abbildung 15). Der Rasslitzbach entwässert in nordöstliche Richtung.

Das Einzugsgebiet hat eine Größe von 2.32 km<sup>2</sup>. Abbildung 16 zeigt die Landnutzungsverteilung nach dem ATKIS DLM25. Abbildung 17 stellt die prozentuale Landnutzungsverteilung dar.

Hauptbodenart ist Ut3, im äußersten Nord-Osten wurde durch den Vorfluter sandig lehmiger Schluff (Uls) kleinflächig abgelagert (Abbildung 18).



Abbildung 14: Einzugsgebiet des Rasslitzbaches (Orthofoto)

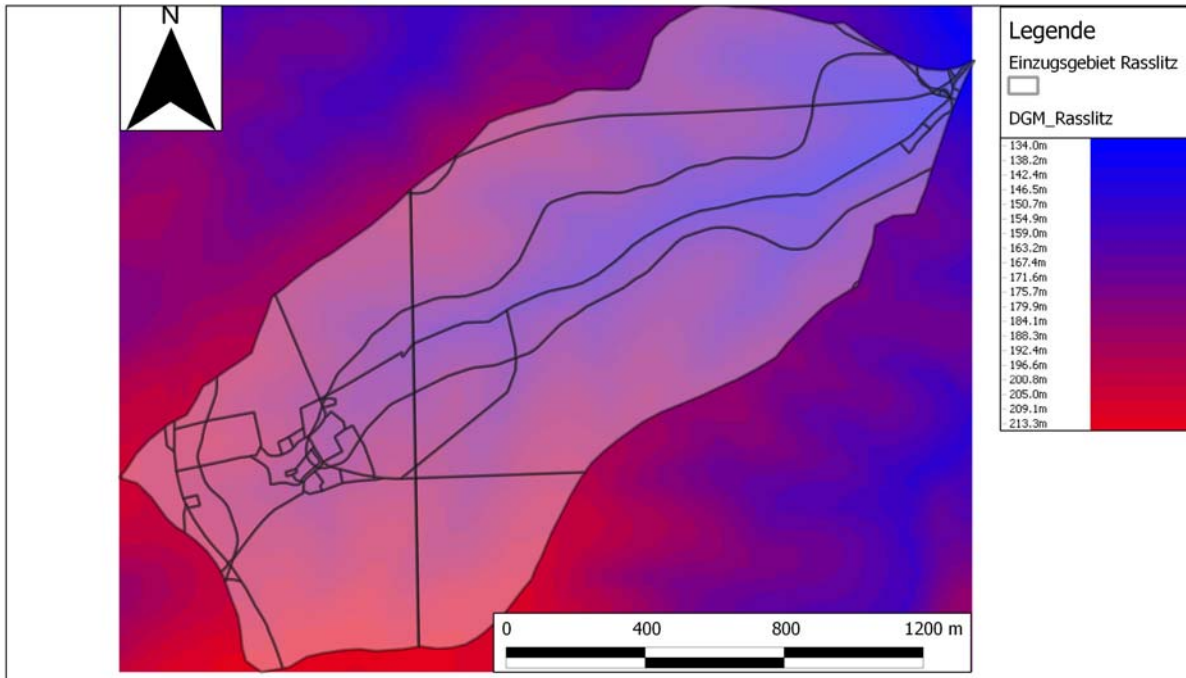


Abbildung 15: Höhenlagen Einzugsgebiet Rasslitzbach und digitales Geländemodell 10x10 m (DGM25)

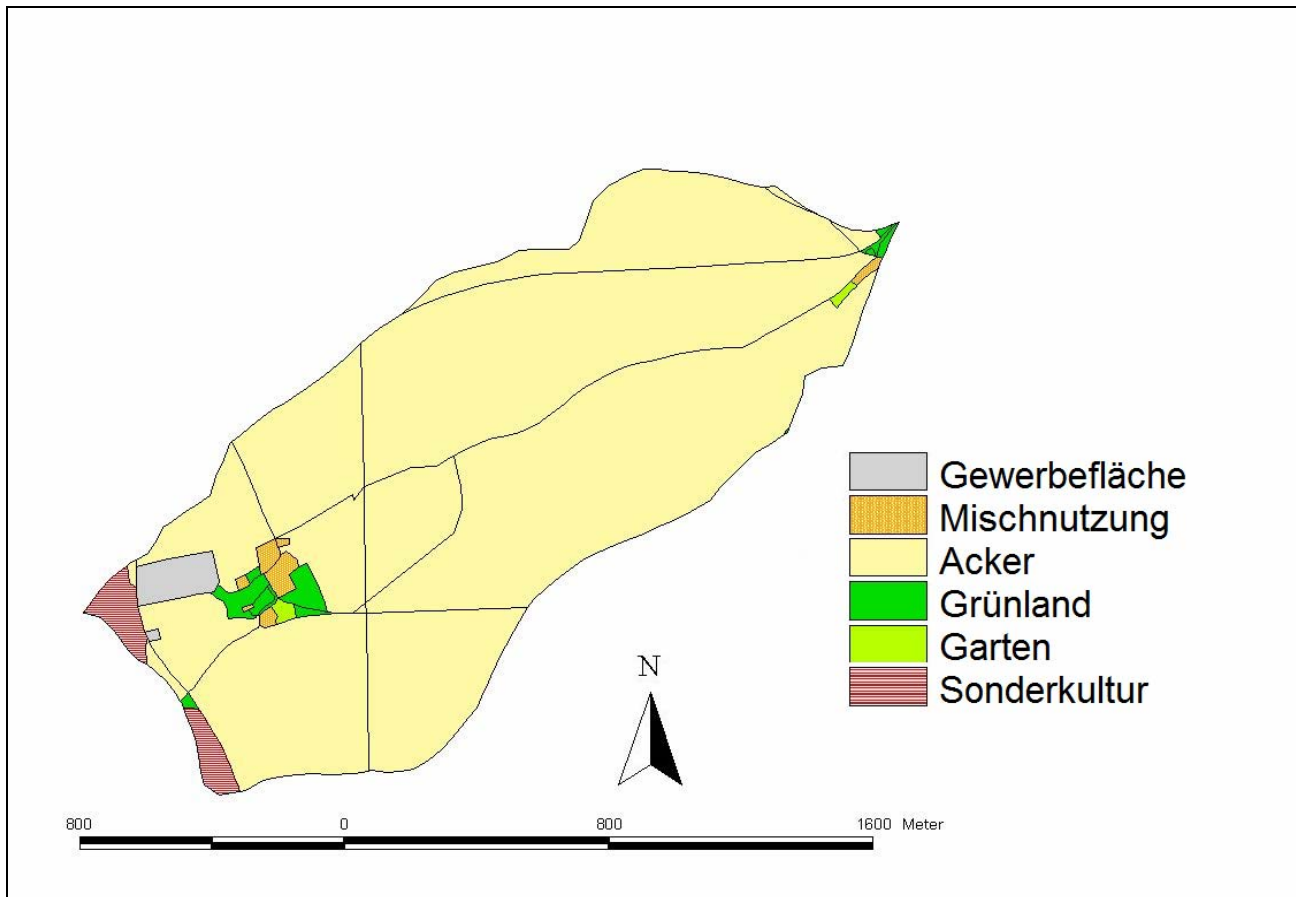


Abbildung 16: Landnutzungsverteilung Rasslitzbach (ATKIS DLM)

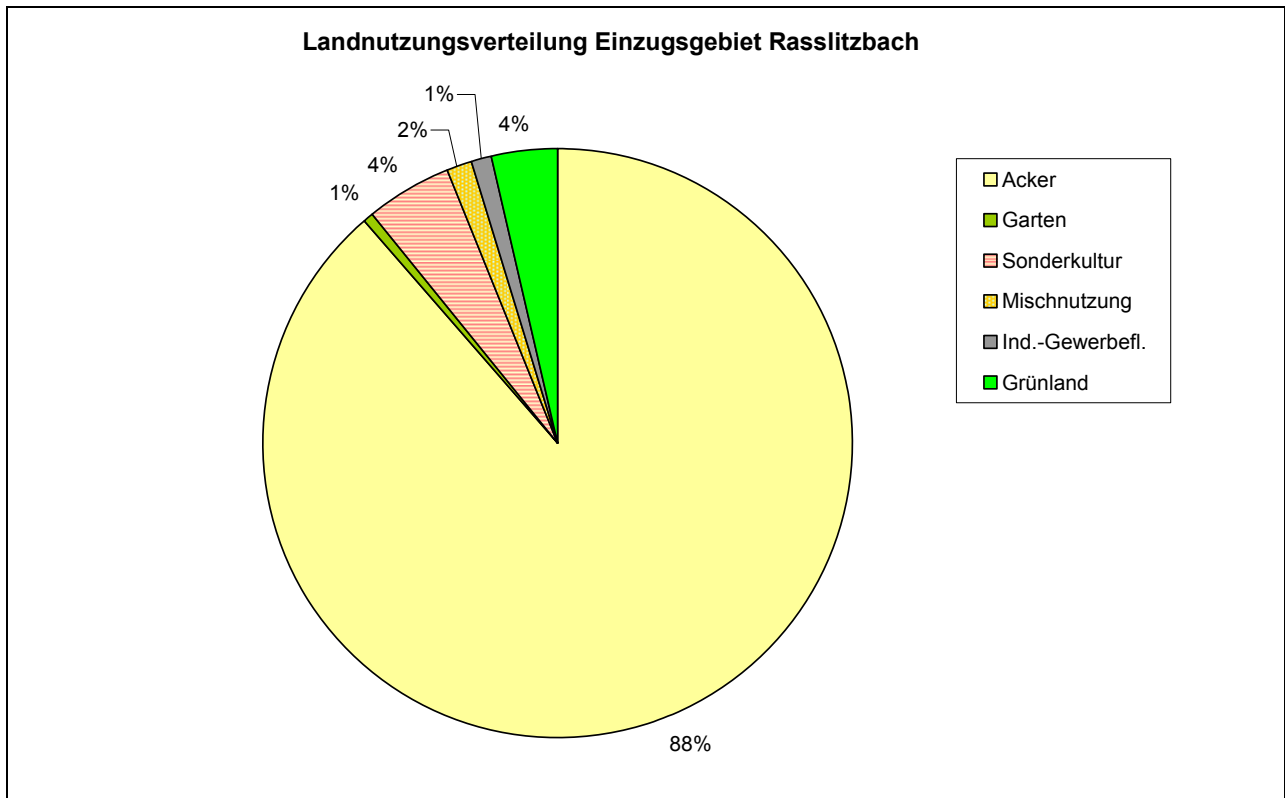


Abbildung 17: Prozentuale Landnutzungsverteilung Einzugsgebiet Rasslitzbach (ATKIS-DLM)

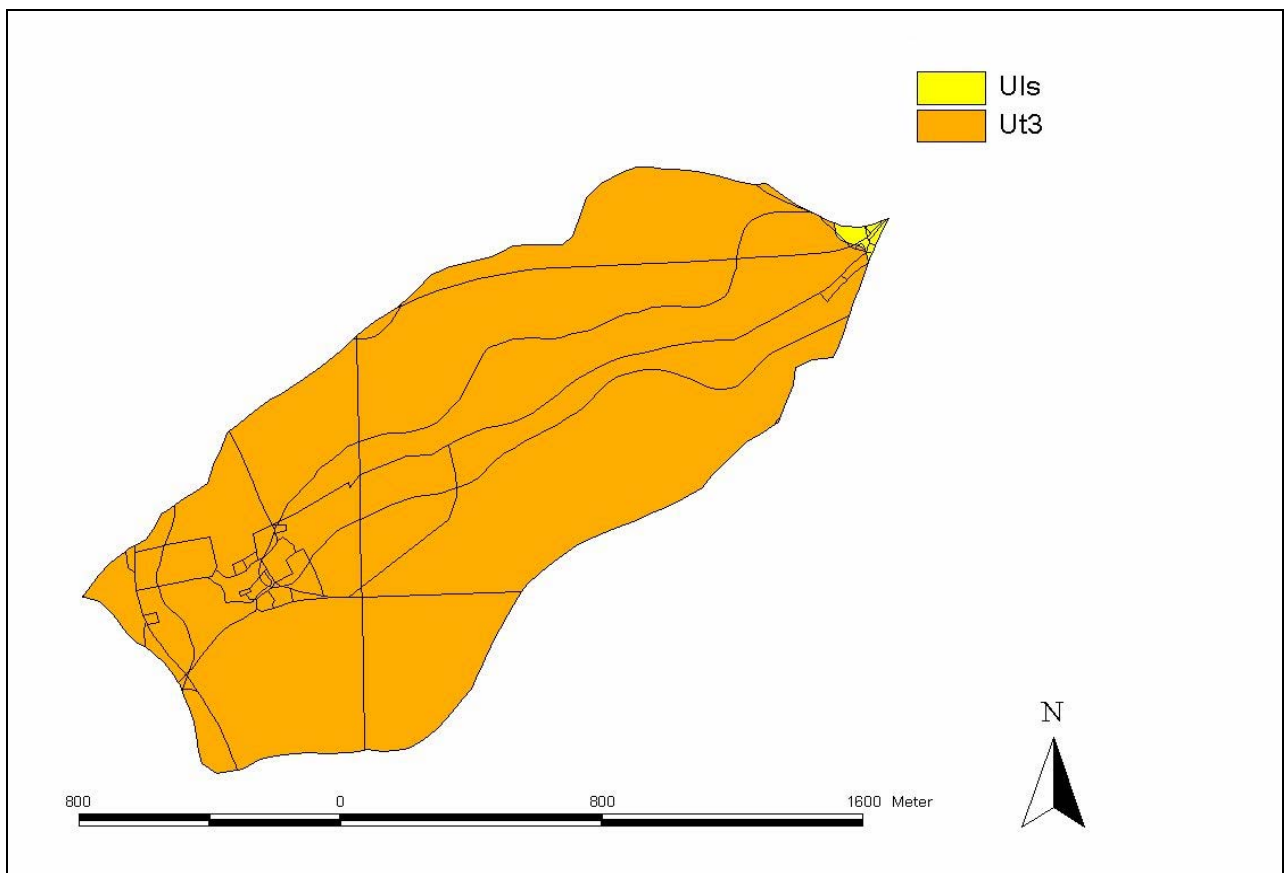


Abbildung 18: Bodenartenverteilung im Einzugsgebiet Rasslitzbach (BÜK 200)

### 2.4.3 Einzugsgebiet Viebigbach

Das Einzugsgebiet des Viebigbaches befindet sich im Naturraum des Oberlausitzer Lösshügellandes (Abbildung 19), südwestlich der Klimastation Görlitz auf einer Höhe zwischen 185 und 365 m NN (Abbildung 20). Der Viebigbach entwässert in südwestliche Richtung.

Das Einzugsgebiet hat eine Größe von 2,69 km<sup>2</sup>. Im ausgewählten Naturraum zählt das Einzugsgebiet des Viebigbaches jedoch zu den kleinsten. Abbildung 21 zeigt die Landnutzungsverteilung nach dem ATKIS DLM25, Abbildung 22 die prozentuale Landnutzungsverteilung.

Hauptbodenart ist Ut3, im äußersten Süd-Westen wurde schluffig-lehmiger Sand (Slu) kleinflächig abgelagert (Abbildung 23).



Abbildung 19: Einzugsgebiet des Viebigbaches (Orthofoto)

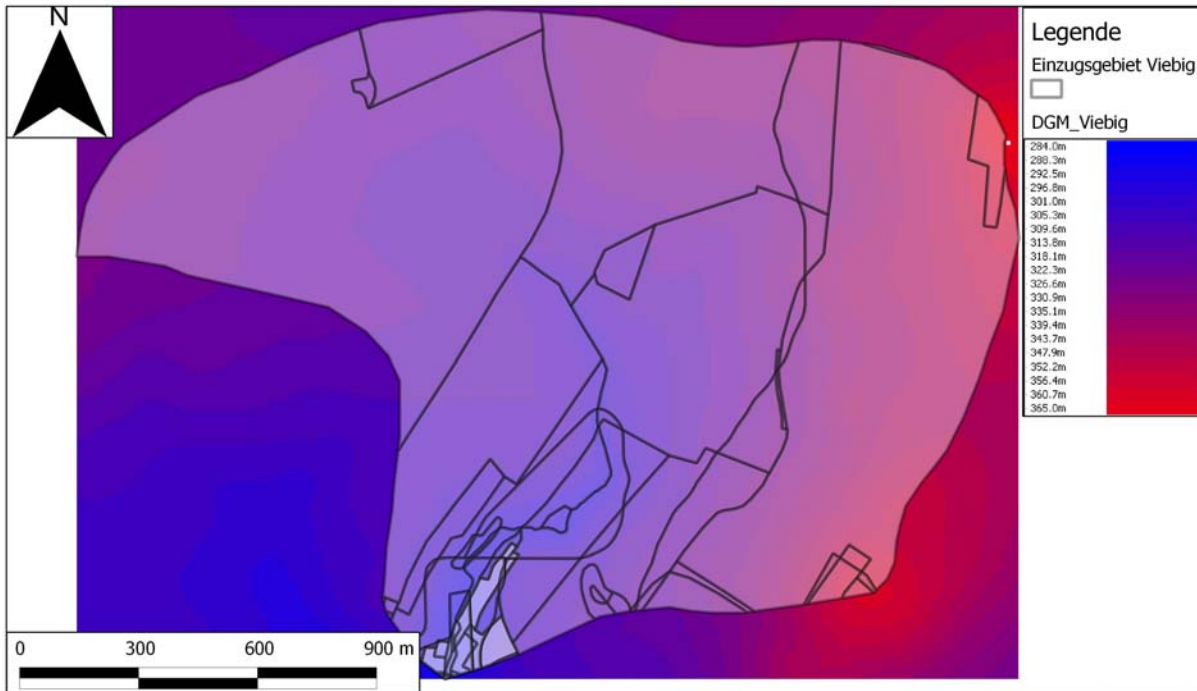


Abbildung 20: Höhenlagen Einzugsgebiet Viebigbach und digitales Geländemodell 10x10 m (DGM25)

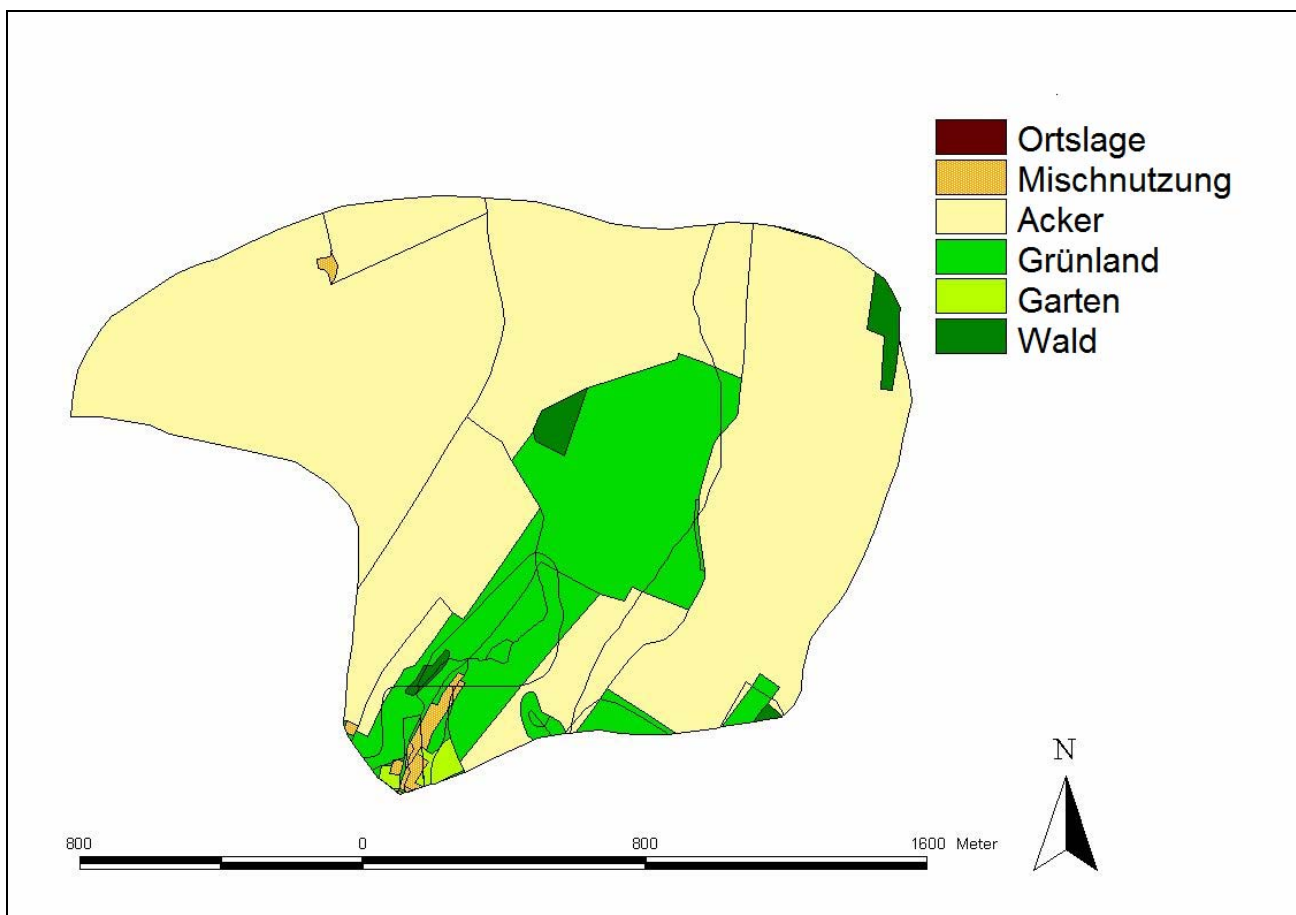


Abbildung 21: Landnutzungsverteilung Viebigbach (ATKIS DLM)

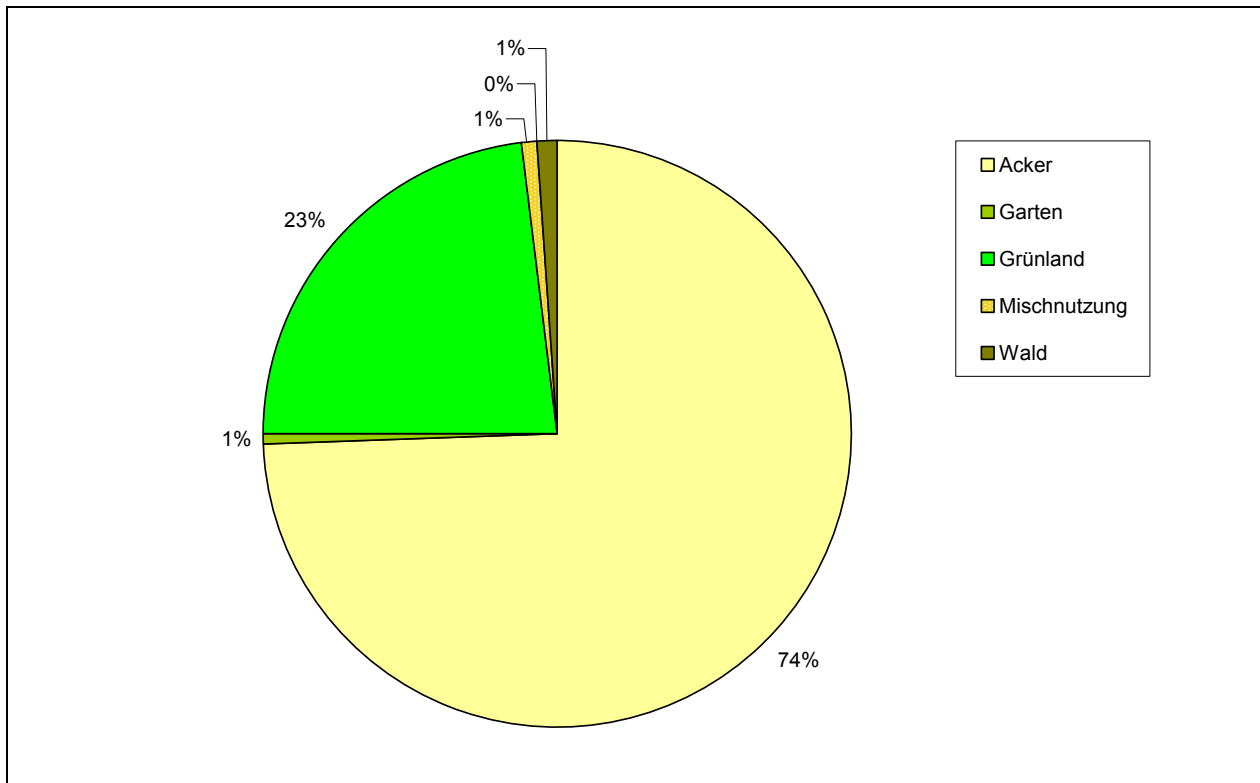


Abbildung 22: Prozentuale Landnutzungsverteilung Einzugsgebiet Viebigbach (ATKIS-DLM)

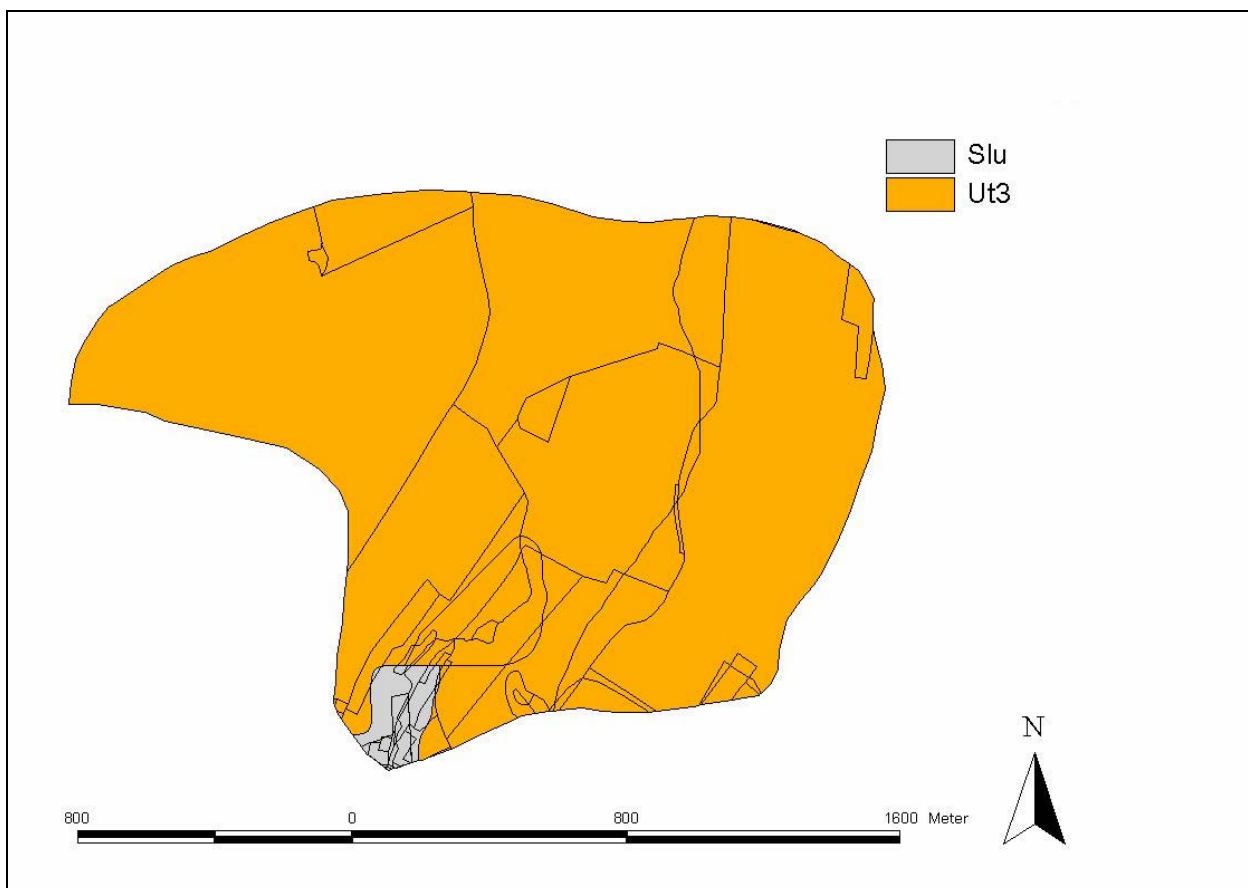


Abbildung 23: Bodenartenverteilung im Einzugsgebiet Viebigbach (BÜK 200)

## 2.5 Eingabeparameter Erosionsmodellierung

### 2.5.1 Niederschlagsparameter

Die Niederschlagsdaten für alle Starkregen  $\geq 0.1$  mm/min für den Referenz- und die Zukunftszeiträume wurden in Zusammenarbeit mit den Firmen CEC Potsdam und Geognostics in das Eingabeformat für EROSION 3D (\*.csv) umgewandelt. Die Niederschläge liegen in mm/min im 5-Minuten-Intervall vor. Es handelt sich um 1.915 Starkniederschläge im Referenzzeitraum und 6.763 Einzelereignisse für beide Zukunftszeiträume in den Läufen MAX und MIN (Läufe mit der höchsten und mit der geringsten mittleren Starkregenintensität für die drei Einzugsgebiete). Starkniederschläge bei Temperaturen unter 0 °C wurden nicht berücksichtigt. Zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser für den Referenzzeitraum wurden die gemessenen Niederschlagsdaten verwendet, für die Zukunftsszenarien die simulierten Daten.

Der Dateiname weist die Klimastation, das Datum und den Startzeitpunkt des Starkregens aus (Beispiel: Chemnitz\_(WST)\_\_\_\_1998-05-26-1745.csv: Der von der Klimastation Chemnitz (WST) aufgezeichnete Niederschlag mit Schwellenwertüberschreitung fand am 26.05.1998 statt, Aufzeichnungsbeginn war 17:45 Uhr).

### 2.5.2 Reliefparameter

Die räumliche Auflösung der Modellierungen in diesem Projekt wird durch das vom Landesvermessungsamt verfügbare digitale Geländemodell ATKIS-DGM25 bestimmt.

Die digitalen Geländemodelle für die drei Einzugsgebiete wurden aus dem für Sachsen flächendeckend vorliegendem DGM25 ausgeschnitten und mittels einer GIS-Interpolation (ArcView 3.3) auf ein 10m-Raster verfeinert.

Das im ASCII-Format vorliegende digitale Geländemodell wird direkt in EROSION 3D importiert und in EROSION 3D-Reliefparameter umgewandelt. Die Lage der Vorfluter wurde mit dem Erosionsmodell berechnet und der topografischen Karte angepasst.

### 2.5.3 Boden- und Landnutzungsparameter

#### 2.5.3.1 Fruchtfolgen

Die Informationen zur Fruchtfolge sind Grundlage für die Parametrisierung der Landnutzungsparameter für die Erosionssimulation. Die Fruchtfolgen für den Referenzzeitraum wurden vom LfULG (persönliche Mitteilung ZIMMERMANN 2010) recherchiert und zusammengestellt (Tabelle 19).

**Tabelle 19: Hauptfruchtarten für die Referenz-Einzugsgebiete (Quelle: pers. Mitteilung ZIMMERMANN, LFULG, 2010)**

Jahr	Dittersdorfer Bach (Klimastation Chemnitz)	Rasslitzbach (Klimastation Oschatz)	Viebigbach (Klimastation Görlitz)
1998	Sommergerste	Sommergerste	Sommergerste
1999	Winterweizen	Winterraps	Winterraps
2000	Wintergerste	Winterweizen	Winterweizen
2001	Winterraps	Wintergerste	Wintergerste
2002	Winterweizen	Silomais	Silomais
2003	Kleegras	Winterweizen	Winterweizen
2004	Silomais	Wintergerste	Wintergerste
2005	Wintergerste	Winterraps	Winterraps
2006	Winterraps	Winterweizen	Winterweizen
2007	Sommergerste	Zuckerrüben	Silomais

#### 2.5.3.2 Landnutzungsmodell

Die Auflösungen des digitalen Landnutzungsmodells - als Raster auf der Grundlage des ATKIS DLM25 - wurde wie das digitale Geländemodell durch eine Interpolations-Routine auf ein 10x10 m-Raster erhöht. Das resultierende Raster ist mit dem Raster des DGM deckungsgleich. Die Zuweisung der Boden- und Landnutzungsparameter erfolgte auf Basis einzelner Polygone, die eine Verschneidung von ATKIS-DLM25 und der BÜK200 darstellen. „Verlorene“ Kleinstpolygone wurden der umgrenzenden größeren Fläche zugeordnet und entsprechend parametrisiert. Jeder Fläche wurde eine eindeutige ID zugeordnet, um den späteren Zugriff auf die Einzelflächen zu ermöglichen.

Die Datenzuweisung an die einzelnen Polygone funktioniert über eine sogenannte „Lookup-Datei“, die mit einer Datentabelle und dem digitalen Landnutzungsmodell verschnitten wird. Die Lookup-Datei enthält für jedes Polygon die aktuelle Landnutzung, die Datentabelle beschreibt den genauen Bodenzustand mit Hilfe der Modell-Eingabeparameter (Lagerungsdichte [kg/m<sup>3</sup>], Gehalt an organischem Kohlenstoff [M-%], Anfangswassergehalt [Vol.-%], Erosionswiderstand [N/m<sup>2</sup>], Oberflächenrauigkeit nach Manning [s/m<sup>1/3</sup>], Bedeckungsgrad der Bodenoberfläche [%] und Korngrößenzusammensetzung des Feinbodens [fT, mT, gT, fU, mU, gU, fS, mS, gS]). Die Parameter wurden dem 2009 aktualisierten Parameterkatalog Sachsen (MICHAEL, A. 2000; SCHINDEWOLF 2009) entnommen.

Weil es sich bis auf die Korngrößenzusammensetzung um zeitlich veränderliche Größen handelt, müssen die einzelnen Parameter jeweils so verändert werden, dass sie den Bodenzustand zum Zeitpunkt eines jeden Starkregenereignisses definieren. Die Verknüpfung beider Dateien erfolgt über die in der Lookup-Datei hinterlegten Landnutzungsinformationen nach ATKIS DLM konkretisiert über die Feldfrüchte der Fruchtfolge. Die Zuordnung erfolgte manuell entsprechend der prozentualen Verteilung der Feldfrüchte (nach ZIMMERMANN 2010) und der Flächengrößen. Die Tabellen 20 bis 22 zeigen die auf dieser Grundlage verteilten Feldfrüchte in den drei Einzugsgebieten.

Beispiel: Im Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach wird dem Schlag mit der Flächen-ID 7 in den Jahren 1999, 2042 und 2092 die Fruchtart Winterweizen (WW) zugewiesen. Das bedeutet, dass der Winterweizen bereits nach der Ernte der Sommergerste im Jahr zuvor (1998, 2041, 2091) am 5. Oktober ausgesät wurde. Der Winterweizen wird am 9. August geerntet. Folgefrucht ist in diesem Falle Wintergerste (WG), die am 18. September des gleichen Jahres einhergehend mit einer Saatbettbereitung ausgesät wird.

Die Erosionssimulationen (Abschnitt 3.3) sind nur nachvollziehbar, wenn die entsprechende Zuordnung der Feldfrüchte berücksichtigt wird.

**Tabelle 20: Verteilung der Feldfrüchte nach Flächen-ID/Bodenarten und Jahr im Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach (Klimastation Chemnitz)**

Flächen-ID	Bodenart	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
		2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
		2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100
7	Slu	SG	WW	WG	Wraps	WW	Klee	Mais	WG	Wraps	SG
10	Slu	WW	WG	Wraps	WW	Klee	Mais	WG	Wraps	SG	WW
28	Slu	WG	Wraps	WW	Klee	Mais	WG	Wraps	SG	WW	WG
57	Slu	Wraps	WW	Klee	Mais	WG	Wraps	SG	WW	WG	Wraps
58	Slu	WW	WG	Wraps	WW	Klee	Mais	WG	Wraps	SG	WW
33	Uls	SG	WW	WG	Wraps	WW	Klee	Mais	WG	Wraps	SG
34	Uls	WW	WG	Wraps	WW	Klee	Mais	WG	Wraps	SG	WW
39	Uls	WG	Wraps	WW	Klee	Mais	WG	Wraps	SG	WW	WG
44	Uls	Wraps	WW	Klee	Mais	WG	Wraps	SG	WW	WG	Wraps
45	Uls	WG	Wraps	WW	Klee	Mais	WG	Wraps	SG	WW	WG
46	Uls	WW	Klee	Mais	WG	Wraps	SG	WW	WG	Wraps	WW
77	Uls	Wraps	WW	Klee	Mais	WG	Wraps	SG	WW	WG	Wraps

SG: Sommergerste, WW: Winterweizen, WG: Wintergerste, Wraps: Winterraps



**Tabelle 21: Verteilung der Feldfrüchte nach Flächen-ID/Bodenarten und Jahr im Einzugsgebiet Rasslitzbach (Klimastation Oschatz)**

Flächen-ID	Bodenart	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
		2041 2091	2042 2092	2043 2093	2044 2094	2045 2095	2046 2096	2047 2097	2048 2098	2049 2099	2050 2100
0	Uls	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
1	Uls	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
2	Uls	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
3	Uls	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
78	Uls	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
8	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
9	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
10	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
11	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
12	Ut3	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW
13	Ut3	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW
14	Ut3	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW
15	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG
16	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG
17	Ut3	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG	Wraps
19	Ut3	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG	Wraps
20	Ut3	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG	Wraps
21	Ut3	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG	Wraps
22	Ut3	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG	Wraps	WW
23	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
24	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG
25	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG
26	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG
32	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG
33	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG
35	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
37	Ut3	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW
39	Ut3	WW	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG	Wraps	WW
53	Ut3	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG	Wraps	WW
54	Ut3	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG	Wraps
55	Ut3	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG	Wraps	WW
64	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG
65	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
68	Ut3	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG	Wraps
70	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
72	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU
73	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG
74	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG
76	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	ZU	WW	WG

SG: Sommergerste, WW: Winterweizen, WG: Wintergerste, Wraps: Winterraps

**Tabelle 22: Verteilung der Feldfrüchte nach Flächen-ID/Bodenarten und Jahr im Einzugsgebiet Viebigbach (Klimastation Görlitz)**

Flächen-ID	Bodenart	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
		2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
		2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100
0	Slu	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais
1	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais
2	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais
3	Ut3	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais	WW
4	Ut3	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais	WW
5	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais	WW	WG
6	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais	WW	WG
7	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais
8	Ut3	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais	WW	WG	Wraps	WW
9	Ut3	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais	WW	WG	Wraps
10	Ut3	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais	WW	WG
11	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais
12	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais
13	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais
14	Ut3	SG	Wraps	WW	WG	Mais	WW	WG	Wraps	WW	Mais

SG: Sommergerste, WW: Winterweizen, WG: Wintergerste, Wraps: Winterraps

Jede Fläche durchläuft die in den Tabellen 20 bis 22 angegebenen Fruchtfolgen mit einer entsprechenden Bodenbearbeitung und Phänologie. Die Aussaat- und Erntetermine wurden der Arbeit von PÖHLER et al. (2007), zusammengestellt in Tabelle 12, entnommen. Für den Zeitraum zwischen der Ernte von Getreide und Aussaat der neuen Feldfrucht wurde angenommen, dass Stoppeln mit einer Bodenbedeckung von 90 % auf dem Schlag verbleiben. Die Fruchtfolgen wurden für die Erosionssimulationen der Zukunftsszenarien beibehalten, es sei denn, die Zukunftssimulation fokussiert auf eine Änderung der Fruchtfolge bzw. Landnutzung.

Das Modell METVER zur Berechnung der taggenauen Bodenfeuchten für die einzelnen Boden- und Fruchtarten wurde vom DWD für dieses Projekt kostenlos bereitgestellt; die Berechnung der Bodenfeuchten erfolgte im Rahmen einer Bachelorarbeit (PILZ, TU Bergakademie Freiberg, 2011) mit Unterstützung von BÖTTCHER (DWD). Die Bodenfeuchten im Oberboden (0-10 cm) liegen für die in den Referenzeinzugsgebieten vorkommenden Bodenarten, Landnutzungen und Fruchtarten für alle 365 Tage im Jahr im Referenzzeitraum (1998-2007) vor. Die Bodenfeuchten für die Zukunftsszenarien mit der jeweils höchsten und mit der jeweils geringsten mittleren Starkregenintensität (MIN und MAX-Läufe) der beiden Simulationszeiträume (2041-2050 und 2091-2100) wurden nach dem gleichen Verfahren berechnet.

## 2.6 Szenarien Erosionssimulation/Datengrundlagen

Für alle Erosionsmodellierungen bis auf die Simulation des Luftpolstereffektes wurde das Modell EROSION 3D, Version 3.1.6.8, 2010, verwendet. Die Gebietsausträge wurden jeweils am tiefsten Raster des Einzugsgebietes im Vorfluter abgelesen. Eine Dokumentation der Bodenausträge erfolgte ab einem Wert von  $\leq 0.1$  t/ha. Für Langfristsimulationen wurde das Modul „Long term simulation“ genutzt. Sofern nichts anderes angegeben ist, erfolgt die Angabe der Gebietsausträge für jeden Monat. Es wurden folgende Szenarien berechnet:

- Gebietsaustrag im Referenzzeitraum „konventionelle Bodenbearbeitung“ 1998-2007 (Einzugsgebiete Dittersdorfer Bach, Rasslitzbach, Viebigbach)
- Gebietsaustrag: Zukunftsszenario „konventionelle Bodenbearbeitung“ 2041-2050 und 2091-2100, Läufe MAX und MIN (Einzugsgebiete Dittersdorfer Bach, Rasslitzbach, Viebigbach)
- Gebietsaustrag: Zukunftsszenario „konservierende Bodenbearbeitung“ 2041-2050 und 2091-2100, Läufe MAX und MIN (Einzugsgebiete Dittersdorfer Bach, Rasslitzbach, Viebigbach)
  - Grubberbearbeitung und Direktsaat

- Gebietsaustrag: Zukunftsszenario „Veränderter Gehalt an organischem Kohlenstoff“ 2041-2050 und 2091-2100, Läufe MAX und MIN (Einzugsgebiete Dittersdorfer Bach, Rasslitzbach, Viebigbach)
  - konventionelle Bodenbearbeitung, Abnahme des Corg-Gehaltes bis 2050: - 0.1 %, bis 2100: -0.2 %
- Gebietsaustrag: Zukunftsszenario „veränderte Phänologie“ Beispielsimulationen (Einzugsgebiete Dittersdorfer Bach, Rasslitzbach)
  - konventionelle Bodenbearbeitung, Phänologieverschiebung nach ESTRELLA (2007) (Tabelle 14)
- Gebietsaustrag: Zukunftsszenarios „Monokultur Winterweizen“, „Monokultur Mais“ 2041-2050, Lauf MAX (Einzugsgebiete Dittersdorfer Bach, Rasslitzbach)
  - konventionelle Bodenbearbeitung
- Gebietsaustrag: Zukunftsszenario „veränderte Landnutzung“ (Einzugsgebiet Viebigbach)
  - Szenario „Grünland“, Szenario „Forst“ für Oktober 2041 (MIN-Lauf)
- Gebietsaustrag: Zukunftsszenario „Luftpostereffekt“ (Einzugsgebiet Viebigbach)
  - konventionelle und konservierende Bodenbearbeitung für ein Extremereignis am 20. Juli 2042 (MIN-Lauf),

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Auswirkungen des Klimawandels auf das Starkniederschlagsgeschehen

Die Auswertung der Niederschlagsdaten im Referenzzeitraum und in den Simulationszeiträumen erfolgte in einem vom Bereich Boden- und Gewässerschutz der TU Bergakademie Freiberg und vom Martin-Anderson-Nexö-Gymnasium Dresden betreuten wissenschaftlichen Schülerprojekts von MICHAEL, G. (unveröffentlicht, 2012). Die Starkniederschläge wurden temperaturunabhängig ausgewertet. Es wurden Anzahl, Niederschlagssummen und Intensitäten der Starkniederschläge verglichen. Die Daten wurden der Arbeit von MICHAEL entnommen und in vergleichender und konzentrierter Form zusammengestellt.

#### 3.1.1 Vergleich der Anzahl der Starkniederschläge im Referenzzeitraum (1998-2007) und in den Zukunftszeiträumen (2041-2050 und 2091-2100)

##### 3.1.1.1 Klimastation Chemnitz

In Tabelle 23 und Abbildung 24 wurden die Anzahl der prognostizierten Starkniederschläge im Vergleich zur Anzahl im Referenzzeitraum aufgelistet bzw. abgebildet, Abbildung 25 zeigt die prozentuale Abweichung nach Monaten.

**Tabelle 23: Vergleich der Anzahl von Starkniederschlägen ( $\geq 0.1$  mm/min) Station Chemnitz Referenzzeitraum 1998-2007 (gemessene Daten), Simulationszeiträume 2041-2050 und 2091-2100, Läufe mit der geringsten mittleren Intensität (MIN) und der höchsten mittleren Intensität (MAX)**

Monat	Referenzzeitraum 1998-2007	MIN 2041-2050	+/- [%]	MAX 2041-2050	+/- [%]	MIN 2091-2100	+/- [%]	MAX 2091-2100	+/- [%]
Januar	29	20	-31	17	-41	22	-24	19	-35
Februar	25	17	-32	15	-40	28	+12	26	+4
März	49	51	+5	58	+18	51	+4	74	+51
April	37	48	+30	39	+5	34	-8	44	+19
Mai	91	47	-48	56	-38	43	-53	47	-48
Juni	111	86	-23	98	-12	74	-33	84	-24
Juli	124	111	-10	130	+5	97	-22	108	-13
August	124	108	-13	100	-19	121	-2	105	-15
September	82	67	-18	34	-59	49	-40	73	-11
Oktober	59	32	-46	51	-14	44	-25	21	-64
November	45	40	-11	48	+7	31	-31	40	-11
Dezember	22	21	-5	35	+59	35	+59	43	+95
<b>GESAMT</b>	<b>798</b>	<b>648</b>	<b>-19</b>	<b>681</b>	<b>-15</b>	<b>629</b>	<b>-21</b>	<b>684</b>	<b>-14</b>

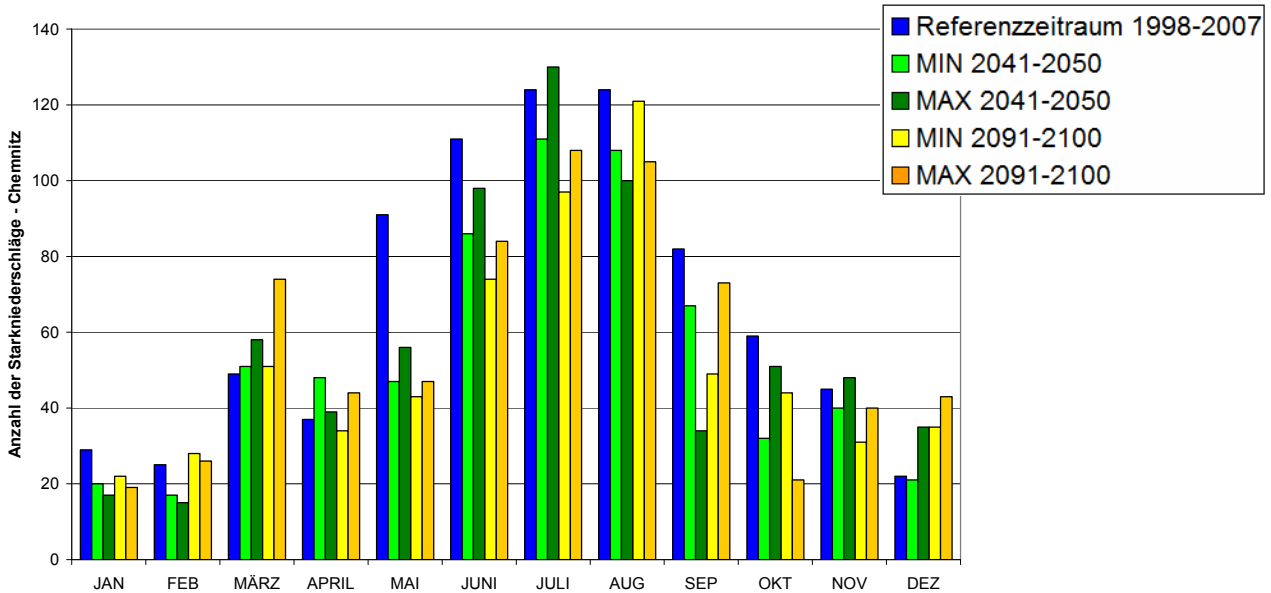


Abbildung 24: Anzahl der Starkniederschläge  $\geq 0.1$  mm/min, Klimastation Chemnitz

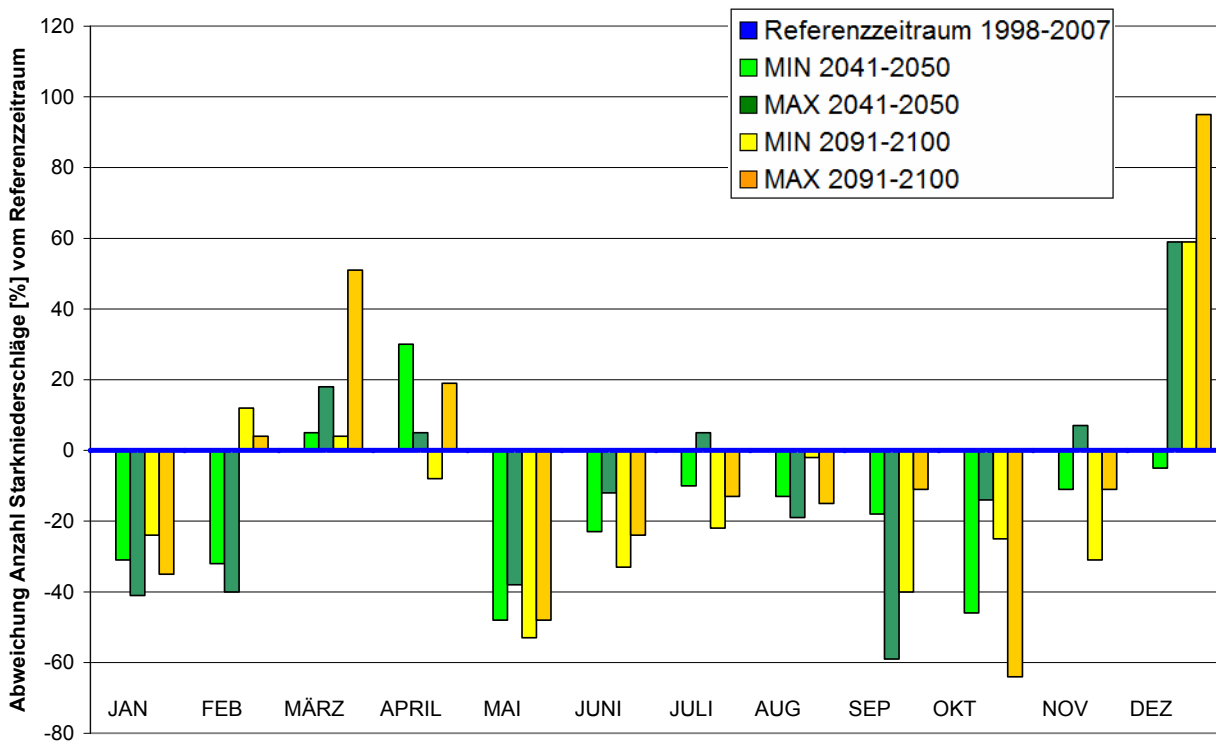


Abbildung 25: Prozentuale Abweichung der Anzahl zukünftiger Starkniederschläge [%] vom Referenzzeitraum – Klimastation Chemnitz

Es sind zwei Trends zu beobachten: Die absolute Anzahl der Starkniederschläge  $\geq 0.1$  mm/min nimmt in beiden simulierten Zeiträumen im Vergleich zum Referenzzeitraum in etwa gleichem Maße ab. Die prozentuale Abnahme beträgt für den Lauf mit der geringsten mittleren Niederschlagsintensität (MIN) circa 20 %, für den Lauf mit der höchsten mittleren Niederschlagsintensität (MAX) etwa 15 %, bezogen auf die jeweilige Dekade (Tabelle 23, Abbildung 24 und Abbildung 25).

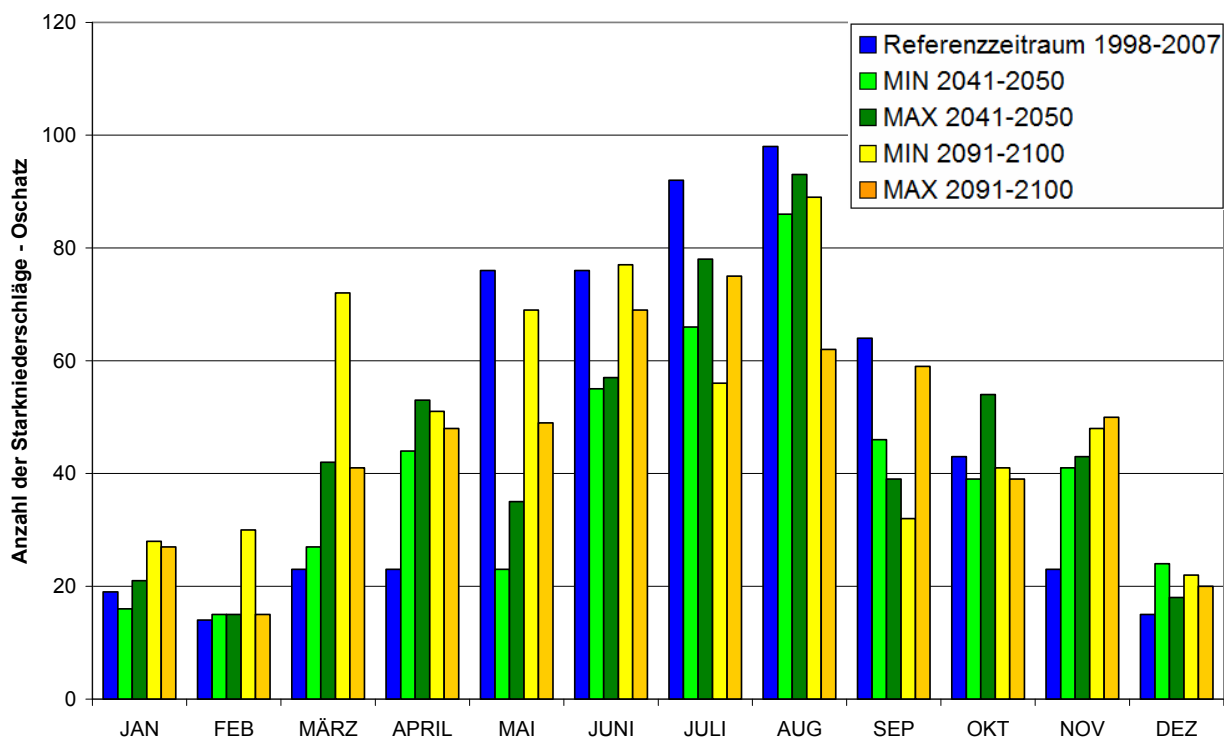
Dieser Trend - bis auf wenige Ausnahmen - bezieht sich allerdings auf die Monate Mai bis November und den Monat Januar. In den Monaten März, April und Dezember steigt dagegen die Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum - ebenfalls mit wenigen Ausnahmen - an.

### 3.1.1.2 Klimastation Oschatz

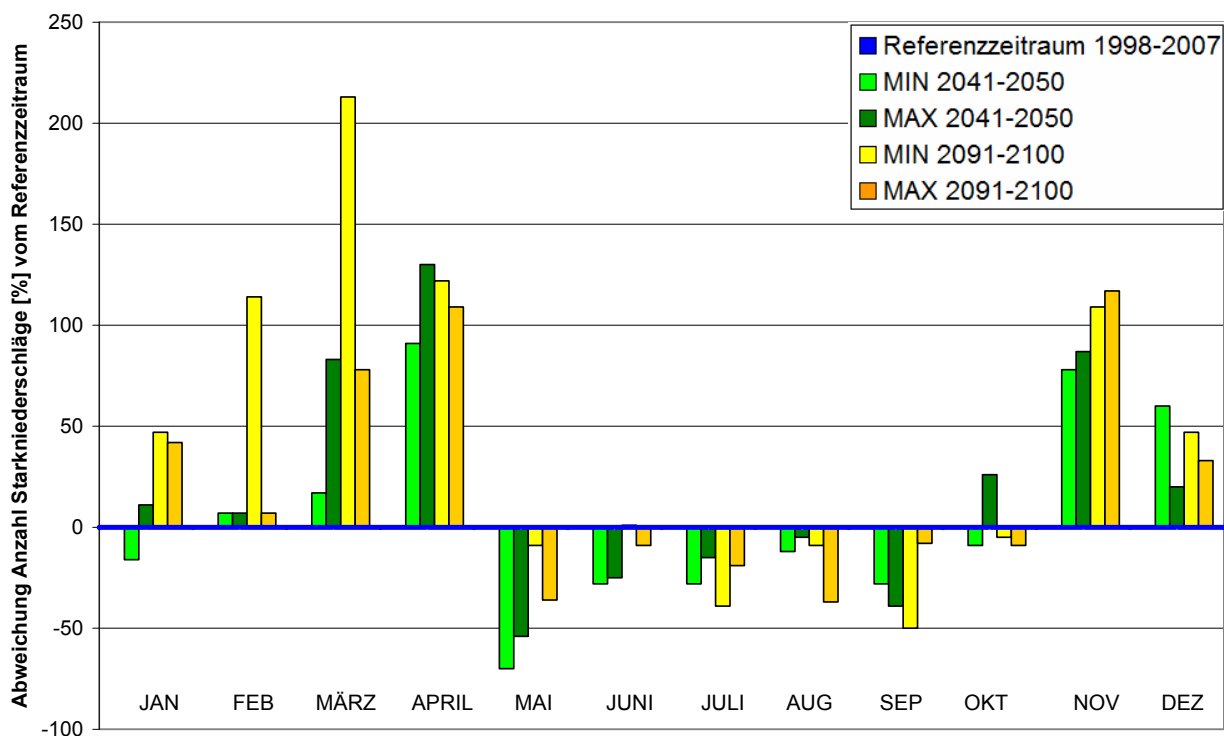
Die Tabelle 24 und die Abbildung 26 zeigen die Anzahl der prognostizierten Starkniederschläge im Vergleich zur Anzahl im Referenzzeitraum. Abbildung 27 stellt die monatliche prozentuale Abweichung der Anzahl zukünftiger Starkniederschläge dar.

**Tabelle 24: Vergleich der Anzahl von Starkniederschlägen ( $\geq 0.1$  mm/min) Station Oschatz Referenzzeitraum 1998-2007 (gemessene Daten), Simulationszeiträume 2041-2050 und 2091-2100, Läufe mit der geringsten mittleren Intensität (MIN) und der höchsten mittleren Intensität (MAX)**

Monat	Referenzzeitraum 1998-2007	MIN 2041-2050	+/- [%]	MAX 2041-2050	+/- [%]	MIN 2091-2100	+/- [%]	MAX 2091-2100	+/- [%]
Januar	19	16	-16	21	+11	28	+47	27	+42
Februar	14	15	+7	15	+7	30	+114	15	+7
März	23	27	+17	42	+83	72	+213	41	+78
April	23	44	+91	53	+130	51	+122	48	+109
Mai	76	23	-70	35	-54	69	-9	49	-36
Juni	76	55	-28	57	-25	77	+1	69	-9
Juli	92	66	-28	78	-15	56	-39	75	-19
August	98	86	-12	93	-5	89	-9	62	-37
September	64	46	-28	39	-39	32	-50	59	-8
Oktober	43	39	-9	54	+26	41	-5	39	-9
November	23	41	+78	43	+87	48	+109	50	+117
Dezember	15	24	+60	18	+20	22	+47	20	+33
<b>GESAMT</b>	<b>566</b>	<b>482</b>	<b>-15</b>	<b>548</b>	<b>-3</b>	<b>615</b>	<b>+9</b>	<b>554</b>	<b>-2</b>



**Abbildung 26: Anzahl der Starkniederschläge  $\geq 0.1$  mm/min, Klimastation Oschatz**



**Abbildung 27: Prozentuale Abweichung der Anzahl zukünftiger Starkniederschläge [%] vom Referenzzeitraum – Klimastation Oschatz**

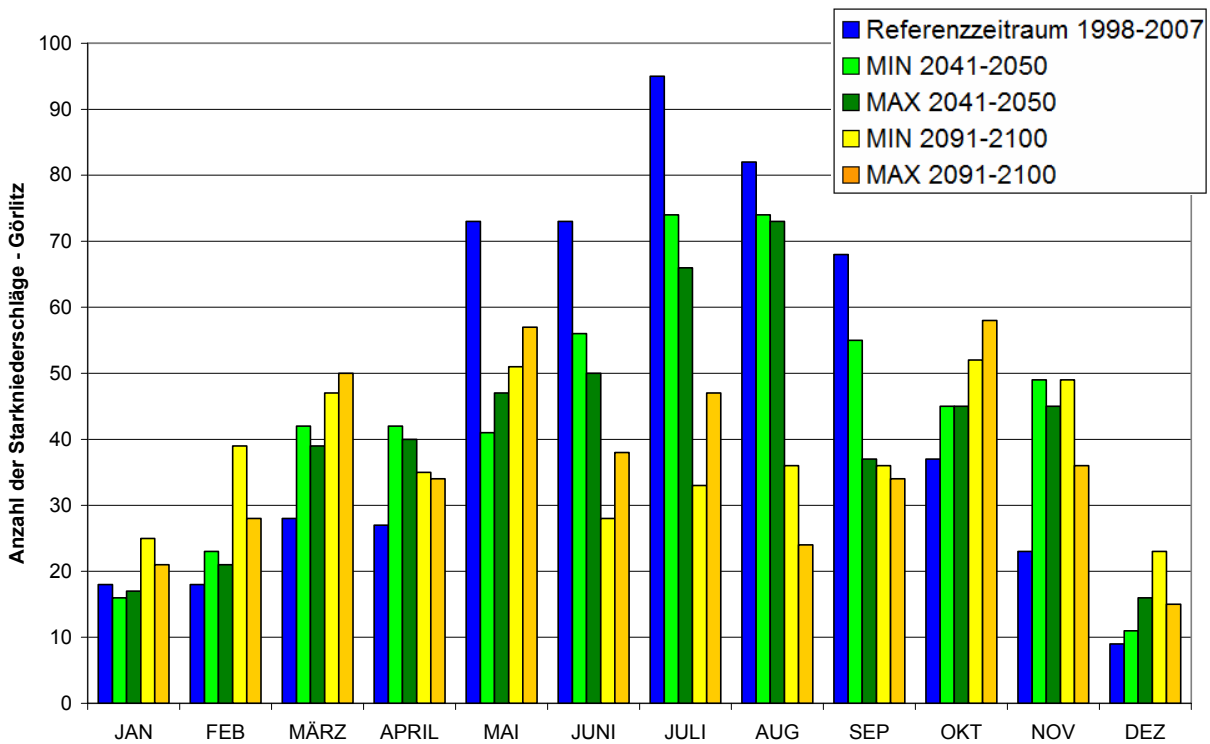
Die Anzahl der Starkniederschläge nimmt im ersten Simulationszeitraum 2041-2050 im Vergleich zum Referenzzeitraum leicht ab (-15% MIN, - 3% MAX). Im zweiten Simulationszeitraum (2091-2100) bleibt die Anzahl der Starkniederschläge im Raum Oschatz in etwa gleich (+ 9% MIN, -2% MAX) (Abbildung 26). Es ist eine deutliche Zunahme der Starkniederschlagshäufigkeit in allen Wintermonaten und in den Monaten März und April zu beobachten – dagegen nimmt die Häufigkeit im Mai und im September sowie in allen Sommermonaten ab (Abbildung 27).

### 3.1.1.3 Klimastation Görlitz

Tabelle 25 und Abbildung 28 zeigen die Anzahl der prognostizierten Starkniederschläge im Vergleich zur Anzahl im Referenzzeitraum, Abbildung 29 stellt die prozentuale Abweichung nach Monaten dar.

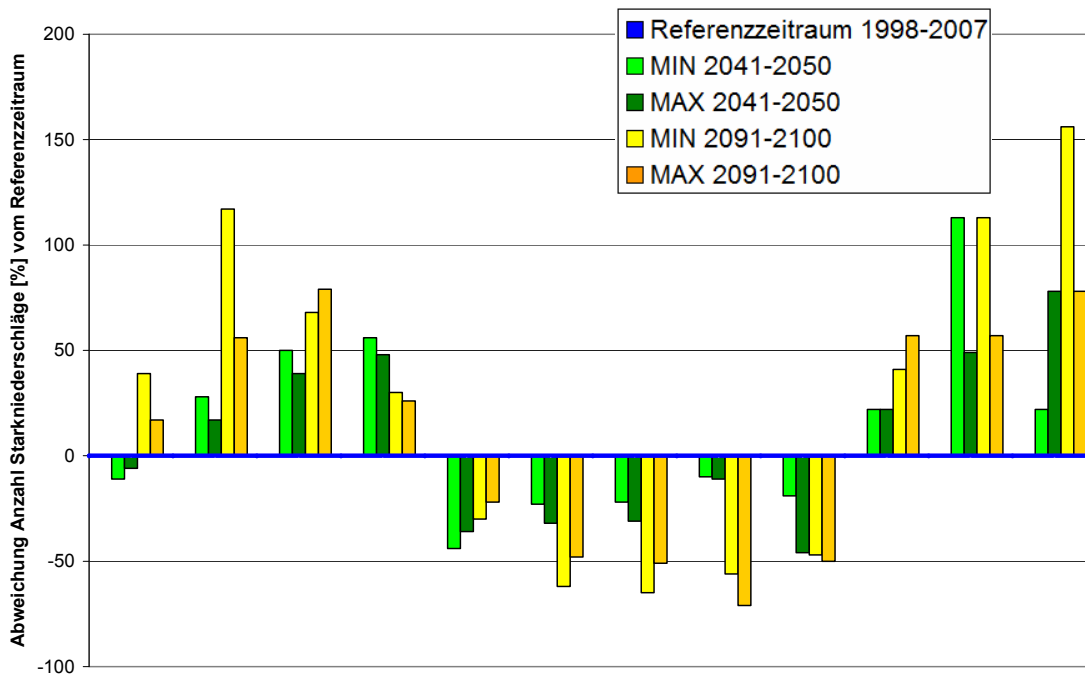
**Tabelle 25: Vergleich der Anzahl von Starkniederschlägen ( $\geq 0.1$  mm/min) Station Görlitz Referenzzeitraum 1998-2007 (gemessene Daten), Simulationszeiträume 2041-2050 und 2091-2100, Läufe mit der geringsten mittleren Intensität (MIN) und der höchsten mittleren Intensität (MAX)**

Monat	Referenzzeitraum 1998-2007	MIN 2041-2050	+/- [%]	MAX 2041-2050	+/- [%]	MIN 2091-2100	+/- [%]	MAX 2091-2100	+/- [%]
Januar	18	16	-11	17	-6	25	+39	21	+17
Februar	18	23	+28	21	+17	39	+117	28	+56
März	28	42	+50	39	+39	47	+68	50	+79
April	27	42	+56	40	+48	35	+30	34	+26
Mai	73	41	-44	47	-36	51	-30	57	-22
Juni	73	56	-23	50	-32	28	-62	38	-48
Juli	95	74	-22	66	-31	33	-65	47	-51
August	82	74	-10	73	-11	36	-56	24	-71
September	68	55	-19	37	-46	36	-47	34	-50
Oktober	37	45	+22	45	+22	52	+41	58	+57
November	23	49	+113	45	+49	49	+113	36	+57
Dezember	9	11	+22	16	+78	23	+156	15	+78
<b>GESAMT</b>	<b>551</b>	<b>528</b>	<b>-4</b>	<b>496</b>	<b>-10</b>	<b>454</b>	<b>-18</b>	<b>442</b>	<b>-20</b>



**Abbildung 28: Anzahl der Starkniederschläge  $\geq 0.1$  mm/min, Klimastation Görlitz**

Die absolute Anzahl der Starkniederschläge nimmt in der Region Görlitz in allen Simulationszeiträumen und Läufen ab. Die Abnahme verstärkt sich im zweiten Simulationszeitraum gegenüber dem ersten (Abbildung 28). Den monatliche Trend bildet Abbildung 29 ab: starke Abnahme der Starkniederschlagshäufigkeit in den Monaten Mai bis September, starke Zunahme in den Monaten Februar bis April und Oktober bis Dezember. Diese Veränderung gegenüber dem Referenzzeitraum verstärkt sich im zweiten Simulationszeitraum. Für den Januar wird auch im 2. Simulationszeitraum eine Zunahme der Anzahl von Starkniederschlägen projiziert.



**Abbildung 29: Prozentuale Abweichung der Anzahl zukünftiger Starkniederschläge [%] vom Referenzzeitraum – Klimastation Görlitz**

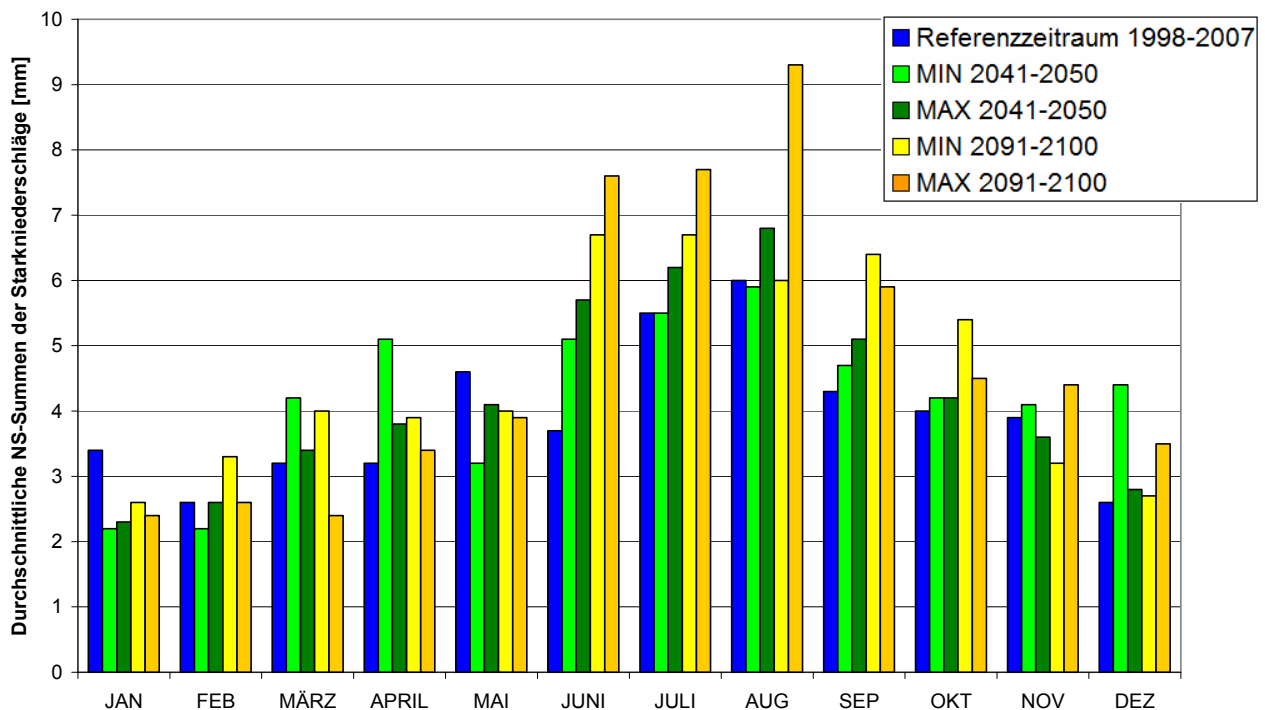
### 3.1.2 Vergleich der durchschnittlichen Niederschlagssummen der Starkniederschläge im Referenzzeitraum (1998-2007) und den Zukunftszeiträumen (2041-2050 und 2091-2100)

#### 3.1.2.1 Klimastation Chemnitz

Tabelle 26 listet die durchschnittlichen Niederschlagssummen der simulierten zukünftigen Starkniederschläge auf.

**Tabelle 26: Vergleich der Ø Niederschlagssummen (NS-Summe) von Starkniederschlägen ( $\geq 0.1$  mm/min) Station Chemnitz Referenzzeitraum 1998-2007 (gemessene Daten), Simulationszeiträume 2041-2050 und 2091-2100, Läufe mit der geringsten mittleren Intensität (MIN) und der höchsten mittleren Intensität (MAX)**

Monat	Ø NS-Summe Referenzzeitraum 1998-2007 [mm]	Ø NS-Summe MIN 2041-2050 [mm]	+/- [%]	Ø NS-Summe MAX 2041-2050 [mm]	+/- [%]	Ø NS-Summe MIN 2091-2100 [mm]	+/- [%]	Ø NS-Summe MAX 2091-2100 [mm]	+/- [%]
Januar	3.4	2.2	-36	2.3	-31	2.6	-21	2.4	-27
Februar	2.6	2.2	-15	2.6	-1	3.3	+27	2.6	0
März	3.2	4.2	+31	3.4	+7	4.0	+24	2.4	-26
April	3.2	5.1	+62	3.8	+21	3.9	+22	3.4	+7
Mai	4.6	3.2	-30	4.1	-9	4.0	-13	3.9	+16
Juni	3.7	5.1	+36	5.7	+51	6.7	+80	7.6	+103
Juli	5.5	5.5	0	6.2	+12	6.7	+22	7.7	+39
August	6.0	5.9	-2	6.8	+14	6.0	0	9.3	+54
September	4.3	4.7	+10	5.1	+17	6.4	+49	5.9	+37
Oktober	4.0	4.2	+7	4.2	+5	5.4	+35	4.5	+14
November	3.9	4.1	+6	3.6	-7	3.2	-19	4.4	+13
Dezember	2.6	4.4	+74	2.8	+10	2.7	+6	3.5	+38
<b>GESAMT</b>	<b>4.4</b>	<b>4.8</b>	<b>+8</b>	<b>5.2</b>	<b>+18</b>	<b>5.2</b>	<b>+18</b>	<b>5.7</b>	<b>+30</b>



**Abbildung 30: Ø Niederschlagssummen der Starkniederschläge  $\geq 0.1$  mm/min, Klimastation Chemnitz**



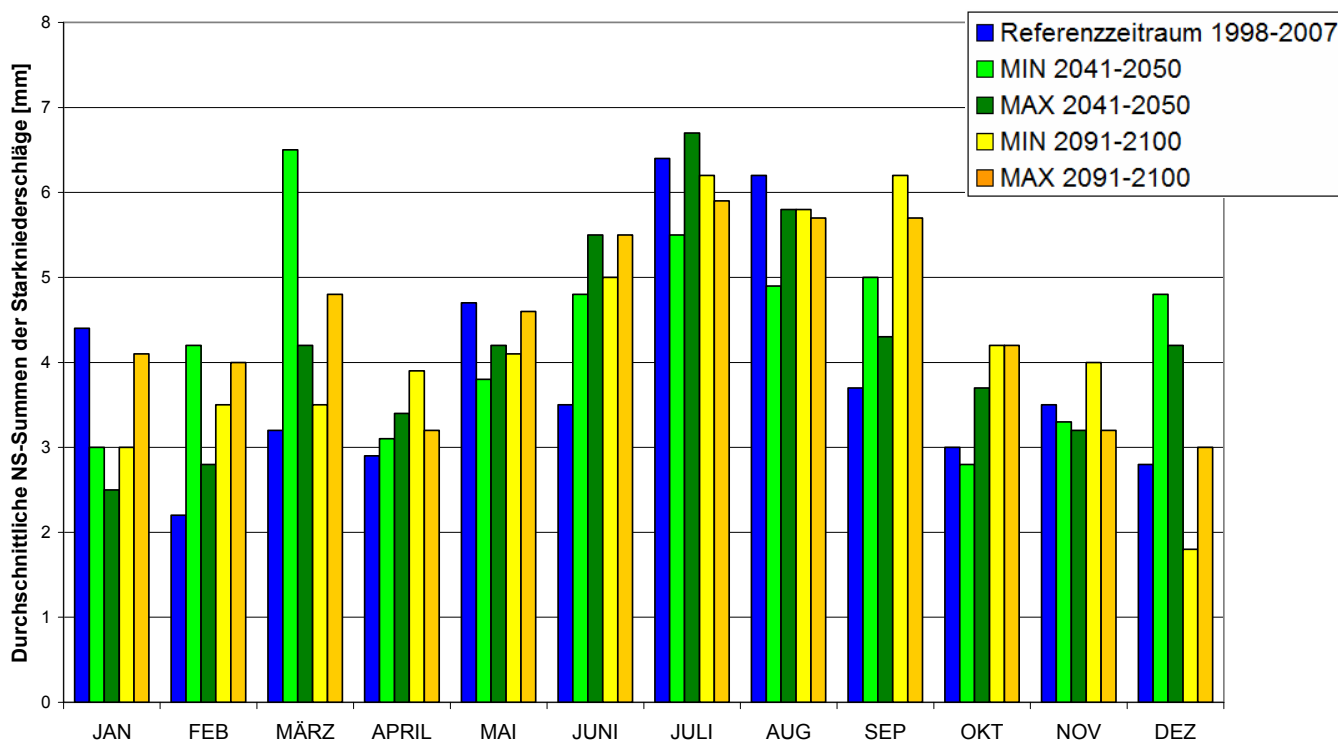
Im Raum Chemnitz nimmt die durchschnittliche Niederschlagssumme je Starkniederschlag in allen Zukunftssimulationen im Jahresmittel deutlich zu, dieser Trend scheint sich im zweiten Simulationszeitraum – insbesondere im Sommerhalbjahr - zu verstärken (Abbildung 30). In folgenden Monaten steigt die durchschnittliche Niederschlagssumme je Starkregen in allen Zukunftssimulationen: April, Juni, Juli, September, Oktober und Dezember. Für den Monat Juni wird der höchste Anstieg der durchschnittlichen Niederschlagssumme je Starkniederschlag festgestellt (36-103 %). Nur in den Monaten Januar und Mai nimmt die durchschnittliche Niederschlagssumme je Starkregen in allen Zukunftssimulationen ab.

### 3.1.2.2 Klimastation Oschatz

Tabelle 27 listet die durchschnittlichen Niederschlagssummen der projizierten zukünftigen Starkniederschläge für Oschatz auf.

**Tabelle 27: Vergleich der Ø Niederschlagssummen (NS-Summe) von Starkniederschlägen (≥ 0.1 mm/min) Station Oschatz, Referenzzeitraum 1998-2007 (gemessene Daten), Simulationszeiträume 2041-2050 und 2091-2100, Läufe mit der geringsten mittleren Intensität (MIN) und der höchsten mittleren Intensität (MAX)**

	Ø NS-Summe Referenzzeitraum 1998-2007 [mm]	Ø NS-Summe MIN 2041-2050 [mm]	+/- [%]	Ø NS-Summe MAX 2041-2050 [mm]	+/- [%]	Ø NS-Summe MIN 2091-2100 [mm]	+/- [%]	Ø NS-Summe MAX 2091-2100 [mm]	+/- [%]
Januar	4.4	3.0	-32	2.5	-44	3.0	-33	4.1	-8
Februar	2.2	4.2	+87	2.8	+27	3.5	+58	4.0	+80
März	3.2	6.5	+102	4.2	+29	3.5	+8	4.8	+50
April	2.9	3.1	+9	3.4	+20	3.9	+37	3.2	+13
Mai	4.7	3.8	-19	4.2	-12	4.1	-14	4.6	-2
Juni	3.5	4.8	+37	5.5	+57	5.0	+44	5.5	+57
Juli	6.4	5.5	-14	6.7	+6	6.2	-2	5.9	-7
August	6.2	4.9	-22	5.8	-7	5.8	-7	5.7	-8
September	3.7	5.0	+35	4.3	+16	6.2	+67	5.7	+53
Oktober	3.0	2.8	-3	3.7	+25	4.2	+41	4.2	+41
November	3.5	3.3	-6	3.2	-8	4.0	+14	3.2	-9
Dezember	2.8	4.8	+72	4.2	+51	1.8	-35	3.0	+6
<b>GESAMT</b>	<b>4.5</b>	<b>4.4</b>	<b>-2</b>	<b>4.7</b>	<b>+3</b>	<b>4.5</b>	<b>0</b>	<b>4.8</b>	<b>+6</b>



**Abbildung 31: Ø Niederschlagssummen der Starkniederschläge ≥ 0.1 mm/min, Klimastation Oschatz**

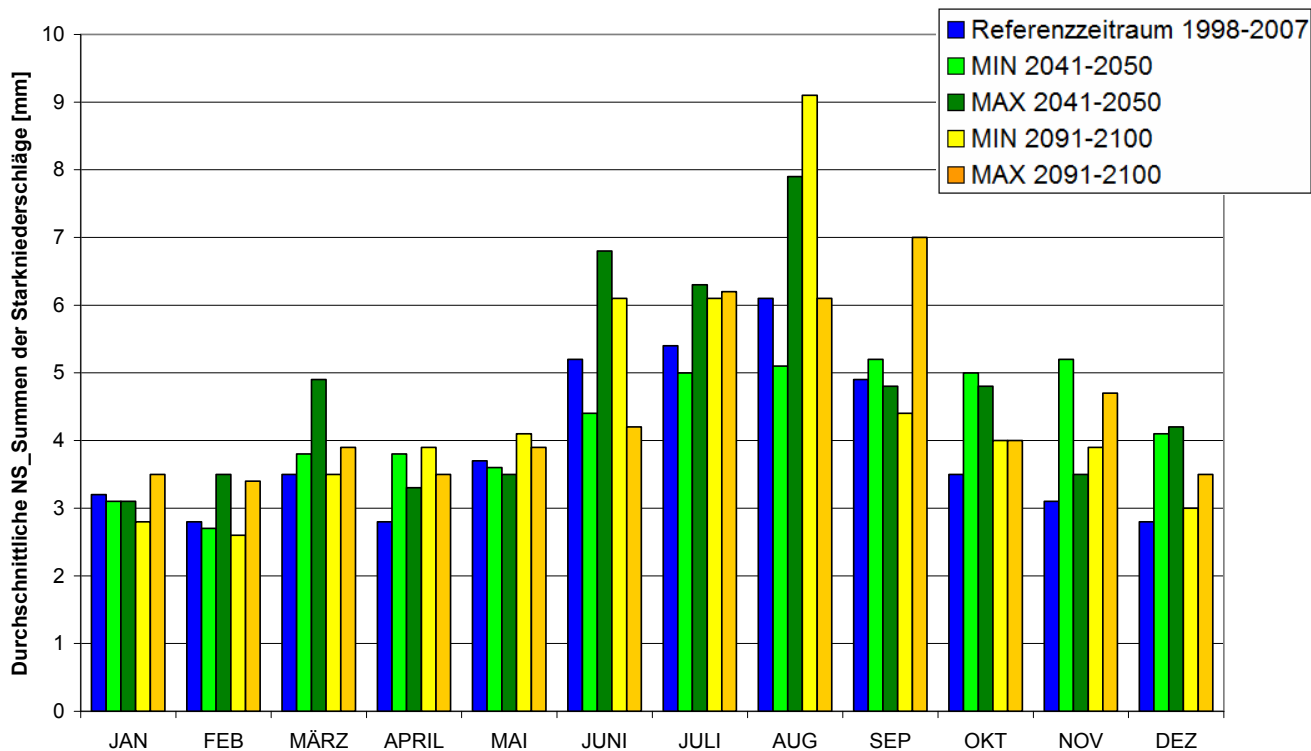
Die durchschnittliche Niederschlagssumme je Starkniederschlag in der Region Oschatz ändert sich im Jahresmittel zukünftig kaum. Die WETTREG-Simulationen lassen jedoch eine monatliche Differenzierung zu: in den Monaten Januar, Mai und August werden die Summen geringer, in den Monaten Februar, März, April, Juni, September, Oktober und Dezember fast durchgängig höher (Abbildung 31). Auch in der Region Oschatz werden für den Monat Juni die höchsten Anstiege der Niederschlagssummen durch Starkregen festgestellt.

### 3.1.2.3 Klimastation Görlitz

Tabelle 28 zeigt die durchschnittlichen Niederschlagssummen der simulierten zukünftigen Starkniederschläge für die Niederschlagstation Görlitz im Vergleich zum Referenzzeitraum.

**Tabelle 28: Vergleich der Ø Niederschlagssummen (NS-Summe) von Starkniederschlägen (≥ 0.1 mm/min) Station Görlitz Referenzzeitraum 1998-2007 (gemessene Daten), Simulationszeiträume 2041-2050 und 2091-2100 Läufe mit der geringsten mittleren Intensität (MIN) und der höchsten mittleren Intensität (MAX)**

Monat	Ø NS-Summe Referenzzeitraum 1998-2007 [mm]	Ø NS-Summe MIN 2041-2050 [mm]	+/- [%]	Ø NS-Summe MAX 2041-2050 [mm]	+/- [%]	Ø NS-Summe MIN 2091-2100 [mm]	+/- [%]	Ø NS-Summe MAX 2091-2100 [mm]	+/- [%]
Januar	3.2	3.1	-3	3.1	-2	2.8	-13	3.5	+11
Februar	2.8	2.7	-4	3.5	+24	2.6	-9	3.4	+23
März	3.5	3.8	+6	4.9	+38	3.5	0	3.9	+11
April	2.8	3.8	+37	3.3	+18	3.9	+39	3.5	+26
Mai	3.7	3.6	-2	3.5	-5	4.1	+9	3.9	+5
Juni	5.2	4.4	-17	6.8	+30	6.1	+16	4.2	-20
Juli	5.4	5.0	-9	6.3	+17	6.1	+12	6.2	+15
August	6.1	5.1	-17	7.9	+29	9.1	+48	6.1	-1
September	4.9	5.2	+7	4.8	-1	4.4	-9	7.0	+43
Oktober	3.5	5.0	+41	4.8	+34	4.0	+13	4.0	+12
November	3.1	5.2	+67	3.5	+12	3.9	+25	4.7	+49
Dezember	2.8	4.1	+46	4.2	+50	3.0	+8	3.5	+24
<b>GESAMT</b>	<b>4.6</b>	<b>4.5</b>	<b>-1</b>	<b>5.1</b>	<b>+14</b>	<b>4.4</b>	<b>-3</b>	<b>4.5</b>	<b>-1</b>



**Abbildung 32: Ø Niederschlagssummen der Starkniederschläge ≥ 0.1 mm/min, Klimastation Görlitz**

Auch in der Region Görlitz bleiben die durchschnittlichen Niederschlagssummen je Starkregen im Jahresmittel zukünftig in etwa gleich. Mit erhöhten Niederschlagssummen durch Starkniederschläge ist jedoch in den Monaten Oktober, November, Dezember, März und April zu rechnen (Abbildung 32). In den Sommermonaten, insbesondere im Juni und August, schwanken die Prognosen stark (von -20 % bis + 48 %).

### **3.1.3 Vergleich der Niederschlagsintensitäten der Starkniederschläge im Referenzzeitraum (1998-2007) und in den Zukunftszeiträumen (2041-2050 und 2091-2100)**

Um die Niederschlagsintensitäten zu vergleichen, wurde zunächst die maximale Intensität im 5-Minuten-Intervall eines jeden Starkniederschlages ermittelt. In einem nächsten Schritt wurden fünf Grenzwerte festgelegt ([1] >0.15 mm/min, [2] >0.2 mm/min, [3] >0.5 mm/min, [4] >1.0 mm/min, [5] > 2.0 mm/min) und gezählt, wie viele Ereignisse den jeweiligen Grenzwert überschreiten. Niederschlagsereignisse, die beispielsweise den Grenzwert [2] überschreiten, werden auch bei der Überschreitung des Grenzwertes [1] mitgezählt. Die Abbildungen 33 bis 47 stellen dar, inwiefern die Anzahl der Niederschläge pro Klasse im Vergleich zum Referenzzeitraum zu- oder abnimmt.

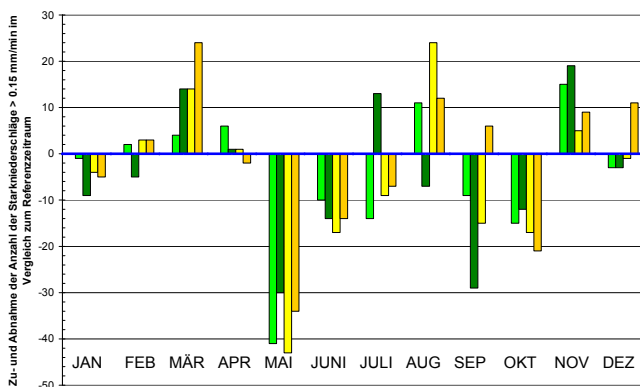
### 3.1.3.1 Klimastation Chemnitz

**Tabelle 29: Vergleich der maximalen Intensitäten der Starkniederschläge nach Schwellenwertüberschreitung  
Anzahl der Starkniederschläge nach Grenzwertüberschreitung – Klimastation Chemnitz**

Grenzwert [1]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 0.15 mm/min														
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT	
REF 1998-2007	14	9	23	23	66	82	96	83	51	38	12	13	510	+/-
MIN 2041-2050	13	11	27	29	25	72	82	94	42	23	27	10	455	-55
MAX 2041-2050	5	4	37	24	36	68	109	76	22	26	31	10	448	-62
MIN 2091-2100	10	12	37	24	23	65	87	107	36	21	17	12	451	-59
MAX 2091-2100	9	12	47	21	32	68	89	95	57	17	21	24	492	-18
Grenzwert [2]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 0.2 mm/min														
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT	
REF 1998-2007	5	3	7	9	47	52	64	62	28	19	4	6	306	+/-
MIN 2041-2050	5	0	12	14	14	48	59	70	27	10	13	6	278	-28
MAX 2041-2050	2	1	18	12	22	42	79	52	16	13	15	7	279	-27
MIN 2091-2100	3	6	17	12	13	51	60	77	23	16	5	7	290	-16
MAX 2091-2100	5	6	20	11	18	53	68	74	39	11	12	19	336	+30
Grenzwert [3]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 0.5 mm/min														
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT	
REF 1998-2007	1	0	0	1	11	12	17	17	5	1	0	0	65	+/-
MIN 2041-2050	1	0	3	2	1	14	19	22	8	3	4	4	81	+16
MAX 2041-2050	0	0	1	3	2	15	33	21	4	4	4	0	87	+22
MIN 2091-2100	0	0	4	3	3	14	20	18	8	3	1	0	74	+9
MAX 2091-2100	0	0	2	5	4	23	28	31	17	2	3	1	116	+51
Grenzwert [4]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 1.0 mm/min														
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT	
REF 1998-2007	0	0	0	0	4	1	7	6	1	0	0	0	19	+/-
MIN 2041-2050	1	0	1	1	1	1	4	4	2	3	2	2	22	+3
MAX 2041-2050	0	0	0	1	2	6	9	9	0	1	1	0	29	+10
MIN 2091-2100	0	0	1	2	1	2	6	6	3	1	1	0	23	+4
MAX 2091-2100	0	0	1	1	3	8	12	10	1	0	3	0	39	+20
Grenzwert [5]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 2.0 mm/min														
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT	
REF 1998-2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+/-
MIN 2041-2050	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	2	0	5	+5
MAX 2041-2050	0	0	0	0	0	2	1	3	0	0	0	0	6	+6
MIN 2091-2100	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	3	+3
MAX 2091-2100	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2	+2

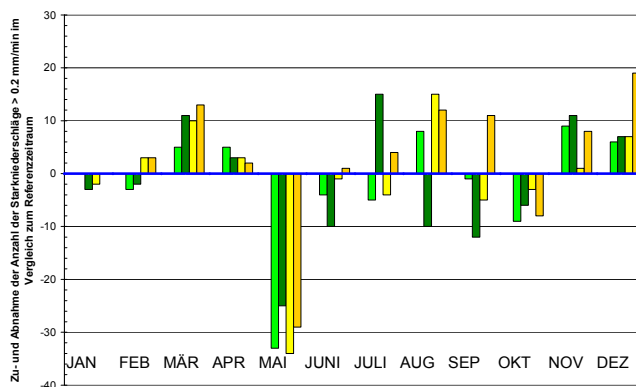
Die Anzahl der Starkniederschläge, deren Intensität den Grenzwert [1] überschreitet, sinkt in allen Zukunftsszenarien. Bis auf den Lauf mit der höchsten mittleren Starkregenintensität 2091-2100 (MAX) gilt das auch für die Überschreitung des Grenzwertes [2]. Die Anzahl der Ereignisse, deren Intensität die höheren Grenzwerte [3], [4] und [5] überschreitet, nimmt dagegen in allen Zukunftsszenarien deutlich zu. Das bedeutet, dass die Anzahl der Starkniederschläge mit geringeren Intensitäten abnimmt, wohingegen Ereignisse mit hohen und sehr hohen Intensitäten zunehmend häufiger auftreten werden (Abbildungen 33 bis 37).

**Chemnitz: Grenzwert [1] > 0.15 mm/min**



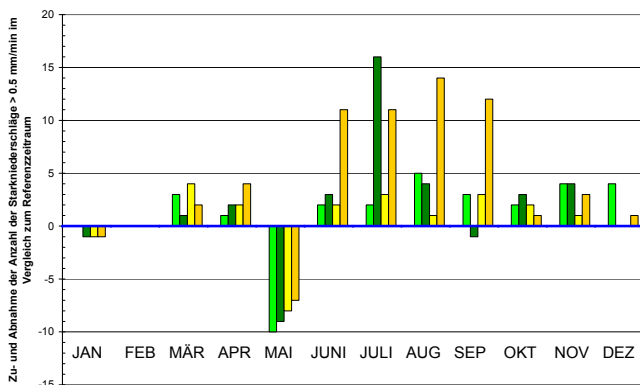
**Abb. 33: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [1]  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum**

**Chemnitz: Grenzwert [2] > 0.2 mm/min**



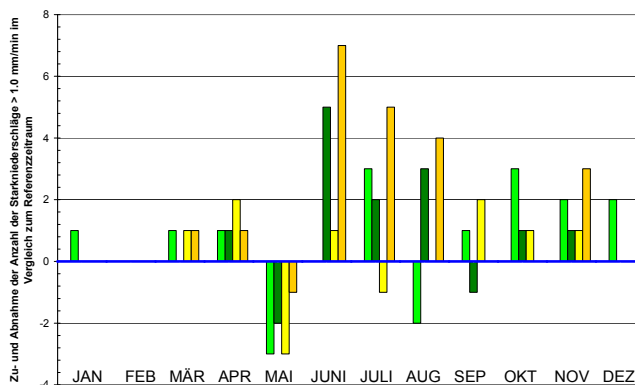
**Abb. 34: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [2]  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum**

**Chemnitz: Grenzwert [3] > 0.5 mm/min**



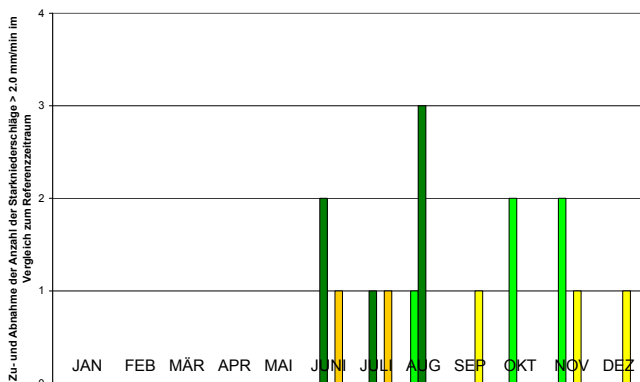
**Abb. 35: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [3]  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum**

**Chemnitz: Grenzwert [4] > 1.0 mm/min**

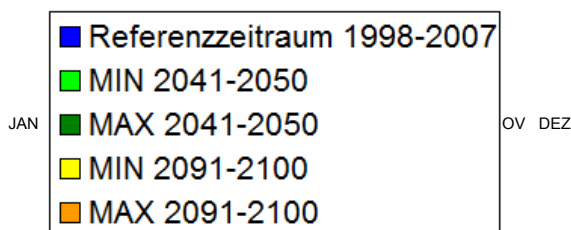


**Abb. 36: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [4]  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum**

**Chemnitz: Grenzwert [5]: > 2.0 mm/min**



**Abb. 37: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [5]  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum**



**Legende zu den Abbildungen 33 bis 37**

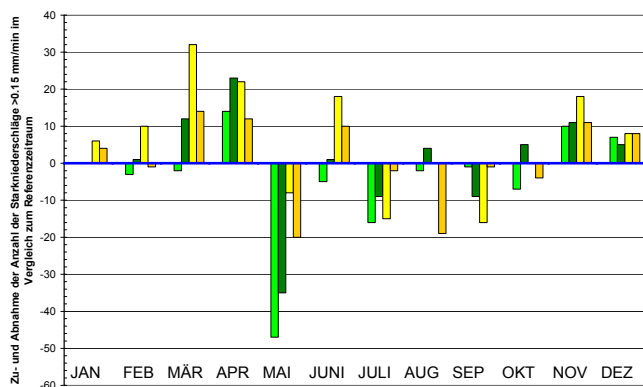
Aus den Abbildungen 33 bis 37 ist eine monatliche Differenzierung ablesbar: Die Wahrscheinlichkeit, dass Starkniederschläge mit hohen und sehr hohen Intensitäten (>0.5 mm/min, Grenzwertüberschreitungen [3], [4], [5]) auftreten können, nimmt mit Ausnahme der Monate Februar und Mai in fast allen Zeiträumen und Berechnungsläufen deutlich zu. Für den Monat Mai ist ein starker Rückgang von Starkniederschlägen aller Intensitätsklassen zu verzeichnen. Extreme Niederschlagsintensitäten [>2.0 mm/min] können in der 2. Jahreshälfte ab Juni zukünftig häufiger als im Referenzzeitraum auftreten.

### 3.1.3.2 Klimastation Oschatz

**Tabelle 30: Vergleich der maximalen Intensitäten der Starkniederschläge nach Schwellenwertüberschreitung  
Anzahl der Starkniederschläge nach Grenzwertüberschreitung – Klimastation Oschatz**

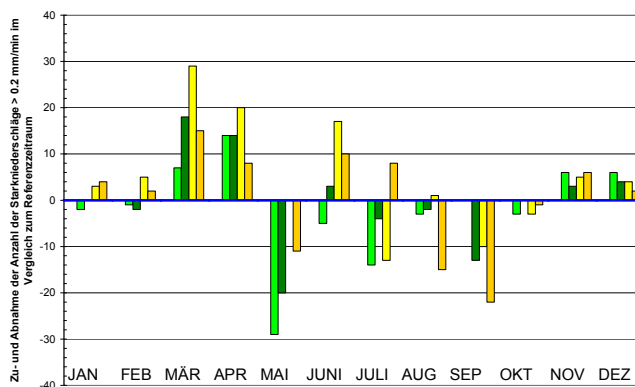
Grenzwert [1]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 0.15 mm/min													
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT
REF 1998-2007	10	7	16	13	60	48	68	71	37	23	12	4	369 +/-
MIN 2041-2050	10	4	14	30	13	43	52	69	36	16	22	11	320 -49
MAX 2041-2050	10	8	28	36	25	49	59	75	28	28	23	9	378 +9
MIN 2091-2100	16	17	48	35	52	66	53	74	21	23	30	12	447 +78
MAX 2091-2100	14	6	30	28	40	58	66	52	36	19	23	12	384 +15
Grenzwert [2]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 0.2 mm/min													
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT
REF 1998-2007	6	3	5	8	38	31	50	53	24	12	6	1	237 +/-
MIN 2041-2050	4	2	12	22	9	26	36	50	24	9	12	7	213 -24
MAX 2041-2050	6	1	23	22	18	34	46	51	11	12	9	5	238 +1
MIN 2091-2100	9	8	34	28	38	48	37	54	14	9	11	5	295 +58
MAX 2091-2100	10	5	20	16	27	41	58	38	2	11	12	3	243 +6
Grenzwert [3]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 0.5 mm/min													
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT
REF 1998-2007	1	0	1	0	10	5	20	12	5	2	1	0	57 +/-
MIN 2041-2050	0	0	5	3	0	10	14	19	9	0	1	0	61 +4
MAX 2041-2050	4	0	2	3	4	15	25	22	4	1	1	2	83 +26
MIN 2091-2100	2	2	6	7	7	19	20	27	8	1	2	2	103 +46
MAX 2091-2100	4	2	4	4	6	20	24	17	8	2	2	2	95 +38
Grenzwert [4]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 1.0 mm/min													
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT
REF 1998-2007	1	0	0	0	2	0	5	2	1	0	0	0	11 +/-
MIN 2041-2050	0	0	4	1	0	2	4	3	6	0	1	0	21 +10
MAX 2041-2050	0	0	0	2	3	3	6	6	1	0	0	1	22 +11
MIN 2091-2100	0	0	2	3	2	2	0	1	2	0	1	0	13 +1
MAX 2091-2100	1	0	1	1	3	2	2	0	4	0	0	0	14 +2
Grenzwert [5]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 2.0 mm/min													
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT
REF 1998-2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 +/-
MIN 2041-2050	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1 +1
MAX 2041-2050	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 0
MIN 2091-2100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 0
MAX 2091-2100	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1 +1

**Oschatz: Grenzwert [1] > 0.15 mm/min**



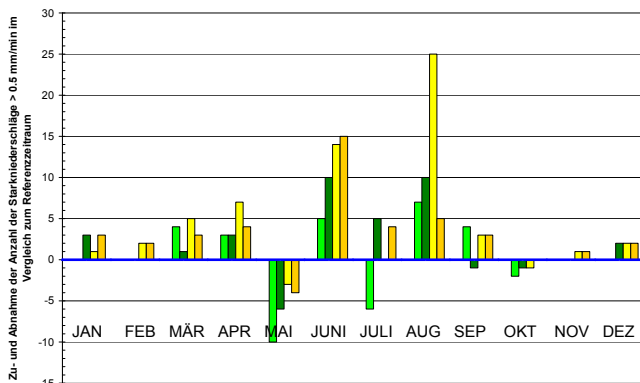
**Abb. 38: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [1]**  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum

**Oschatz: Grenzwert [2] > 0.2 mm/min**



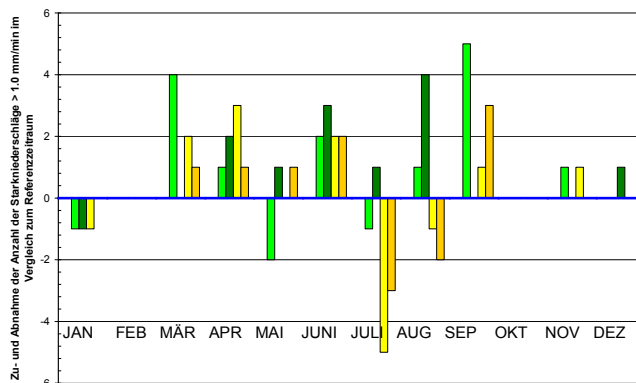
**Abb. 39: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [2]**  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum

**Oschatz: Grenzwert [3] > 0.5 mm/min**



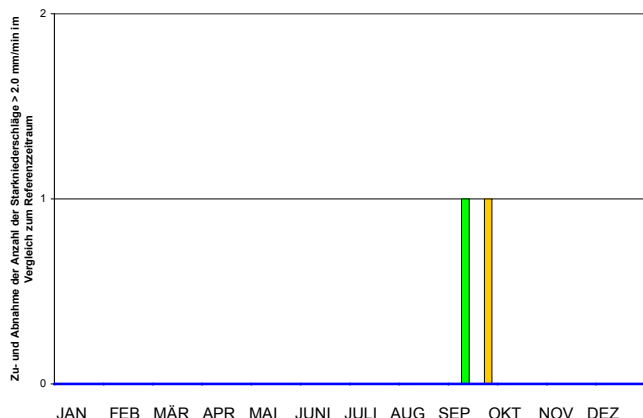
**Abb. 40: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [3]**  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum

**Oschatz: Grenzwert [4] > 1.0 mm/min**

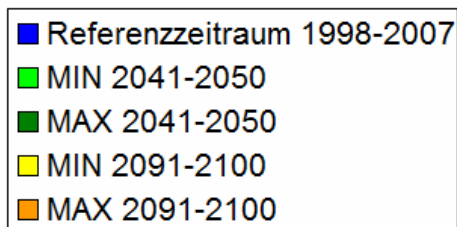


**Abb. 41: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [4]**  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum

**Oschatz: Grenzwert [5]: > 2.0 mm/min**



**Abb. 42: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [5]**  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum



**Legende zu den Abbildungen 38 bis 42**

Die Anzahl der Ereignisse, deren maximale Intensität den jeweiligen Grenzwert überschreitet, steigt in allen Zukunftssimulationen im Vergleich zum Referenzzeitraum. Ausnahme ist der Simulationslauf mit der geringsten mittleren Starkregenintensität (MIN) im Zeitraum 2041-2050, und das auch nur die Grenzwerte [1] und [2] betreffend (Tabelle 30, Abbildungen 38 bis 42). Es wird projiziert, dass die Anzahl der Starkregen mit maximalen Intensitäten von 0.15-1.0 mm/min im zweiten Simulationszeitraum (2091-2100) sogar stark zunehmen wird. Im ersten Simulationszeitraum (2041-2050) kommt es zudem häufiger zu Extremereignissen mit Intensitäten >1.0 und < 2.0 mm/min (Grenzwert [4]). Solche Extreme werden vor allem für die Monate März, April, Juni, August und September vorausgesagt. In den Wintermonaten treten Niederschlagsereignisse mit Intensitäten bis 0.5 mm/min (Grenzwert [3]) etwas öfter auf. In den Monaten Februar, Mai und Oktober nimmt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Ereignissen mit mittleren und hohen Intensitäten dagegen ab.

### 3.1.3.3 Klimastation Görlitz

**Tabelle 31: Vergleich der maximalen Intensitäten der Starkniederschläge nach Schwellenwertüberschreitung  
Anzahl der Starkniederschläge nach Grenzwertüberschreitung – Klimastation Görlitz**

Grenzwert [1]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 0.15 mm/min														
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT	
REF 1998-2007	11	8	15	10	48	57	69	65	36	19	8	6	352	+/-
MIN 2041-2050	9	11	21	26	19	39	52	44	40	28	31	10	330	-22
MAX 2041-2050	7	12	20	23	28	38	60	55	24	26	25	8	326	-26
MIN 2091-2100	14	32	23	21	32	20	23	24	25	38	35	11	298	-54
MAX 2091-2100	10	17	29	18	37	23	32	17	27	37	20	10	277	-75

Grenzwert [2]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 0.2 mm/min														
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT	
REF 1998-2007	7	4	8	4	27	39	49	45	26	8	3	1	221	+/-
MIN 2041-2050	4	0	13	18	10	23	37	32	23	22	16	5	203	-18
MAX 2041-2050	2	5	13	16	7	30	49	42	18	13	12	5	212	-9
MIN 2091-2100	8	12	11	10	12	14	19	16	16	25	21	7	171	-50
MAX 2091-2100	8	12	17	10	21	17	20	12	21	20	12	7	177	-44

Grenzwert [3]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 0.5 mm/min														
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT	
REF 1998-2007	0	1	1	0	4	15	16	9	5	0	0	0	51	+/-
MIN 2041-2050	0	0	2	11	1	3	19	13	5	1	4	2	61	+10
MAX 2041-2050	0	2	5	5	2	13	16	12	6	2	1	1	65	+14
MIN 2091-2100	2	1	2	2	4	2	7	6	4	3	4	1	38	-13
MAX 2091-2100	0	0	5	0	4	7	6	3	4	3	6	1	39	-12

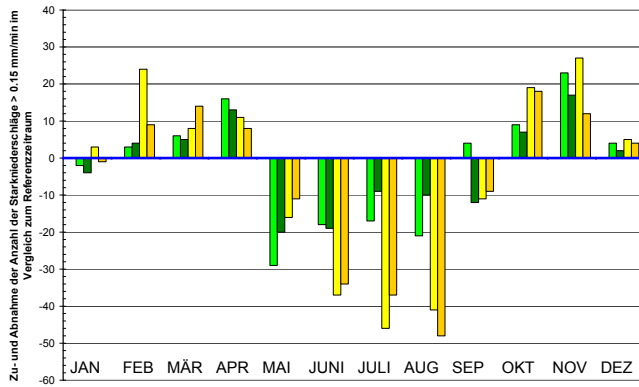
Grenzwert [4]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 1.0 mm/min														
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT	
REF 1998-2007	0	0	0	0	3	2	3	4	2	0	0	0	14	+/-
MIN 2041-2050	0	0	2	4	0	1	4	3	0	1	3	1	19	+5
MAX 2041-2050	0	1	2	1	1	3	4	1	1	1	0	1	16	+2
MIN 2091-2100	0	0	0	2	2	2	0	0	3	2	1	0	12	-2
MAX 2091-2100	0	0	4	0	3	2	2	2	3	3	5	1	25	+12

Grenzwert [5]: Anzahl der Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität > 2.0 mm/min														
Dekade	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	GESAMT	
REF 1998-2007	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	+/-
MIN 2041-2050	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	2	0	6	+4
MAX 2041-2050	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1
MIN 2091-2100	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	4	+2
MAX 2091-2100	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0

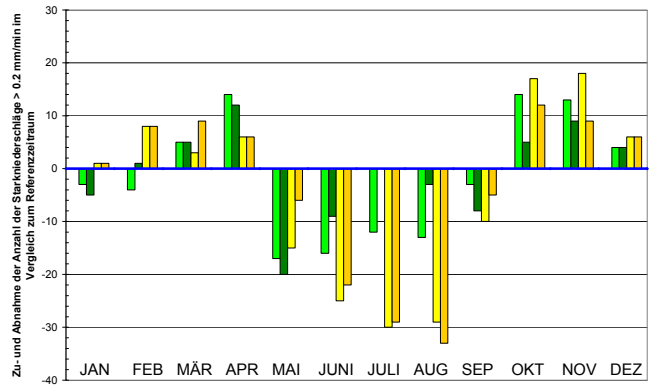


**Görlitz: Grenzwert [1] > 0.15 mm/min**



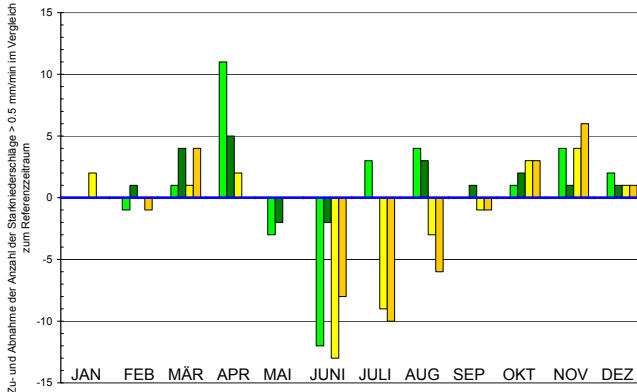
**Abb. 43: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [1]**  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum

**Görlitz: Grenzwert [2] > 0.2 mm/min**



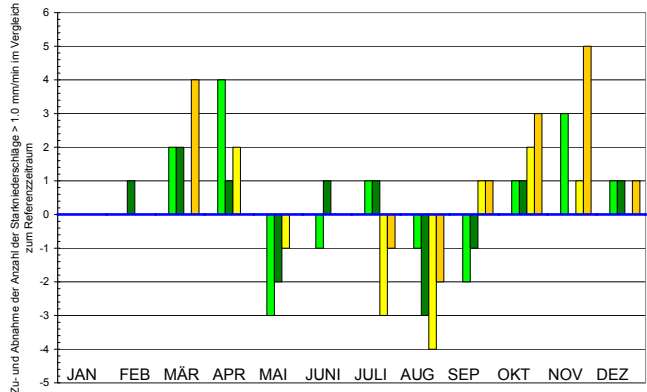
**Abb. 44: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [2]**  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum

**Görlitz: Grenzwert [3] > 0.5 mm/min**



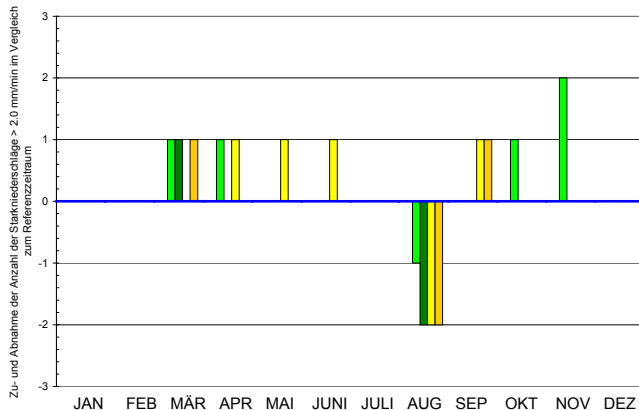
**Abb. 45: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [3]**  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum

**Görlitz: Grenzwert [4] > 1.0 mm/min**

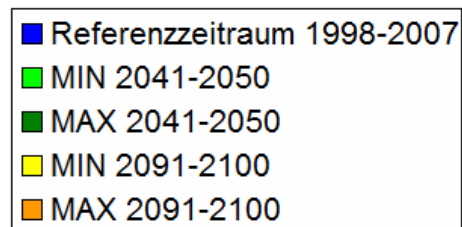


**Abb. 46: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [4]**  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum

**Oschatz: Grenzwert [5]: > 2.0 mm/min**



**Abb. 47: Zu- und Abnahme Grenzwertüberschreitung [5]**  
Anzahl der Starkniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum



**Legende zu den Abbildungen 43 bis 47**

Im ersten Simulationszeitraum 2041-2050 sinkt die Anzahl der Starkregen mit Intensitäten > 0.15 und < 0.5 mm/min (Grenzwerte [1] und [2]) deutlich. Extremereignisse mit hohen und sehr hohen Intensitäten (Überschreitung der Grenzwerte [3], [4] und zum Teil auch [5]) werden dagegen etwas häufiger vorkommen (Tabelle 31). Im zweiten Simulationszeitraum 2091-2100 ist der Rückgang von Ereignissen mit Grenzwertüberschreitungen [1] bis [3] sogar noch stärker ausgeprägt, extreme Intensitäten treten nicht signifikant häufiger als im Referenzzeitraum auf.

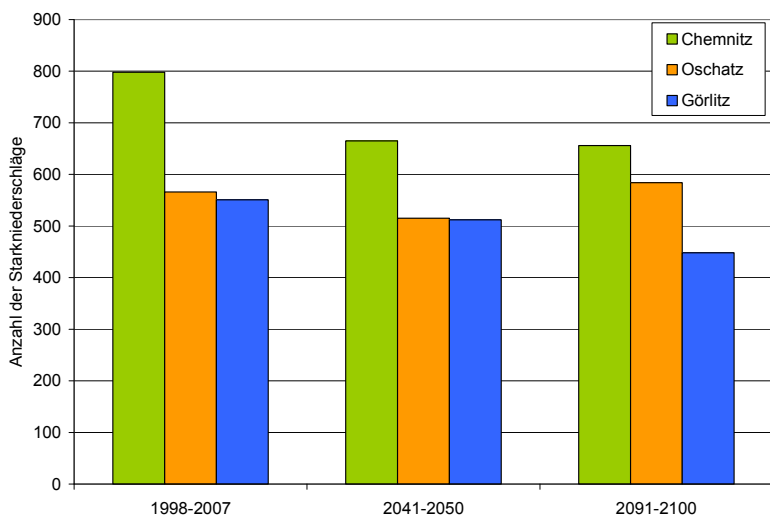
Die Abbildungen 43 bis 47 verdeutlichen jedoch eine starke Differenzierung im Jahresverlauf: Von Oktober bis April – mit Ausnahme des Januars – nehmen Starkniederschläge mit Grenzwertüberschreitungen [1] bis [4] zu, von Mai bis September jedoch ab.

### 3.1.4 Vergleich der Entwicklung des Starkniederschlagsgeschehens für die Klimastationen Chemnitz, Oschatz und Görlitz

In Tabelle 32 und in den Abbildungen 48 bis 53 werden die absolute Anzahl der Starkniederschläge und die Anzahl der Starkniederschläge nach Intensitäten (Grenzwerte [1] bis [5]) vergleichend für die drei Niederschlagsstationen dargestellt. Aus den Daten der MIN- und MAX-Läufe wurden Mittelwerte gebildet.

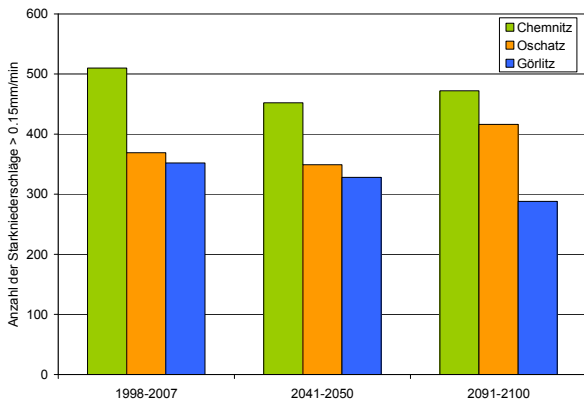
**Tabelle 32: Anzahl der Starkniederschläge nach Klimastationen: absolute Anzahl, Niederschlagssummen, Anzahl nach Intensitäten nach Grenzwerten [1] bis [5]**

Anzahl Summe Anzahl nach Intensitätsklassen	Chemnitz			Oschatz			Görlitz		
	Referenz- zeitraum 1998-2007	MIN/MAX Mittelwert 2041-2050	MIN/MAX Mittelwert 2091-2100	Referenz- zeitraum 1998-2007	MIN/MAX Mittelwert 2041-2050	MIN/MAX Mittelwert 2091-2100	Referenz- zeitraum 1998-2007	MIN/MAX Mittelwert 2041-2050	MIN/MAX Mittelwert 2091-2100
Anzahl	798	665	656	566	515	584	551	512	448
NS-Summe	4.4	5.0	5.4	4.5	4.6	4.7	4.6	4.8	4.4
Anzahl > 0.15 mm/min [1]	510	452	472	369	349	416	352	328	288
Anzahl > 0.2 mm/min [2]	306	278	313	237	226	269	221	208	174
Anzahl > 0.5 mm/min [3]	65	84	95	57	72	99	51	63	38
Anzahl > 1.0 mm/min [4]	19	26	31	11	22	14	14	18	18
Anzahl > 2.0 mm/min [5]	0	6	2	0	0.5	0.5	2	4	3

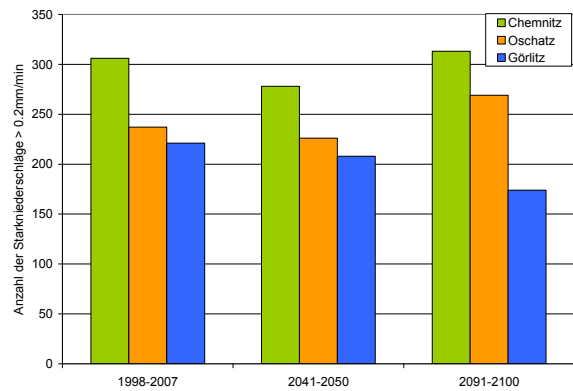


**Abbildung 48: Anzahl der Starkniederschläge nach Klimastationen**

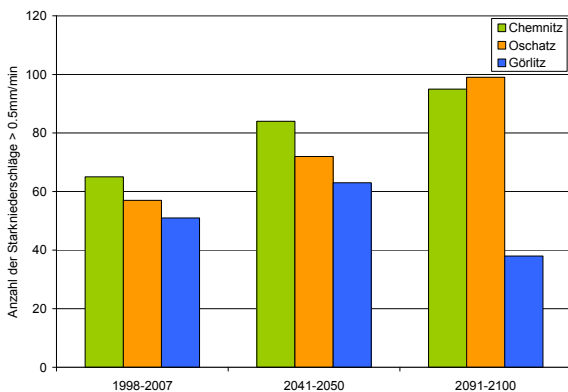
Die absolute Anzahl der Starkniederschläge > 0.1 mm/min nimmt von West nach Ost auch zukünftig in beiden Simulationszeiträumen ab. Im Referenzzeitraum und im ersten Simulationszeitraum ist die Starkregenhäufigkeit in der Region Oschatz nur geringfügig höher als in der Region Görlitz. Im zweiten Simulationszeitraum steigt die absolute Anzahl der Starkregen in der Region Oschatz, in der Region Görlitz sinkt sie (-23 %).



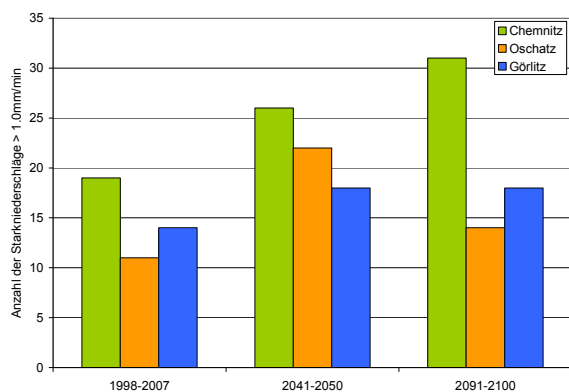
**Abb. 49: Anzahl der Starkniederschläge > 0.15 mm/min [1] nach Klimastationen**



**Abb. 50: Anzahl der Starkniederschläge > 0.2 mm/min [2] nach Klimastationen**

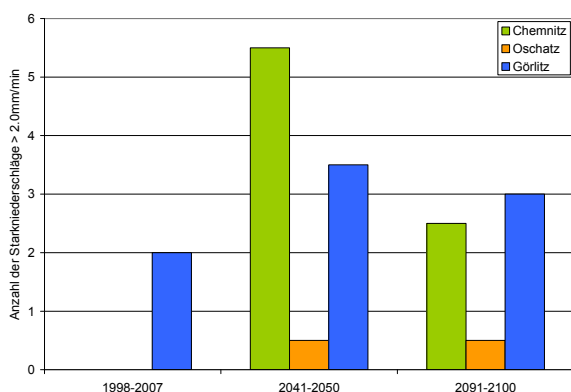


**Abb. 51: Anzahl der Starkniederschläge > 0.5 mm/min [3] nach Klimastationen**



**Abb. 52: Anzahl der Starkniederschläge > 1.0 mm/min [4] nach Klimastationen**

Die Anzahl der Starkniederschläge mittlerer Intensitäten (Grenzwerte [1] bis [3]) nimmt ebenfalls von West nach Ost ab. Lediglich für Starkniederschläge > 0.5 mm/min wird für die Region Oschatz im zweiten Simulationszeitraum ein leichter Anstieg gegenüber Chemnitz vorhergesagt. Starkniederschläge mit Intensitätsspitzen > 1.0 mm/min kommen dagegen in der Region Görlitz im zweiten Simulationszeitraum häufiger vor als in Oschatz.



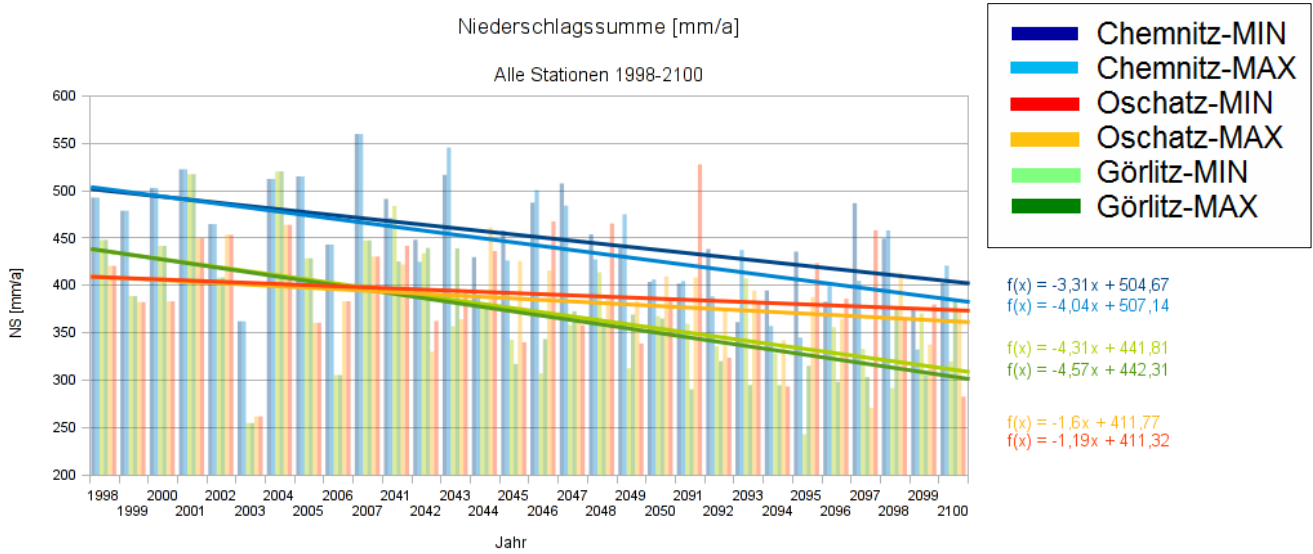
**Abb. 53: Anzahl der Starkniederschläge > 2.0 mm/min [5] nach Klimastationen**

Extreme Niederschläge (> 1.0 und > 2.0 mm/min: Grenzwerte [4] und [5]) kommen in allen drei Klimaregionen häufiger vor als im Referenzzeitraum. Niederschläge mit Intensitäten > 2.0 mm/min (Grenzwert [5]) kommen in der Region Görlitz sogar in beiden Simulationszeiträumen öfter vor als in Chemnitz und Oschatz.

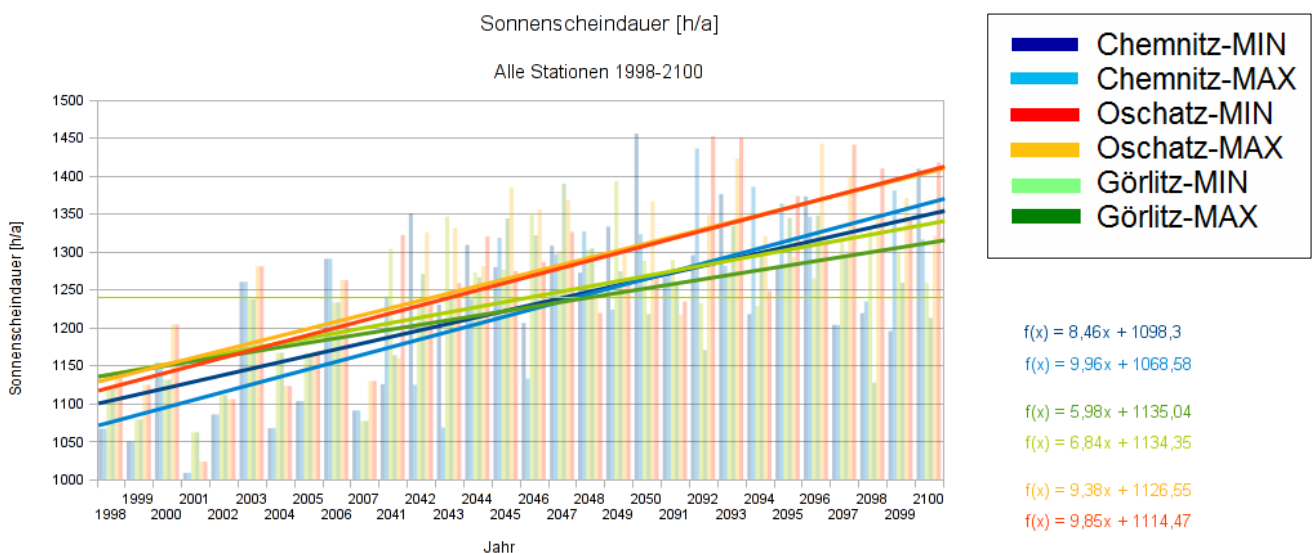
## 3.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenfeuchte

Die Modellierungen der Bodenfeuchte mit dem Modell METVER für den Referenzzeitraum und die Simulationszeiträume sowie die Auswertung der Daten erfolgten durch Christine Pilz (2011) im Rahmen einer vom DWD (Falk Böttcher, DWD Außenstelle Leipzig) und von der TU Bergakademie Freiberg (Anne Routschek) betreuten Bachelorarbeit.

Grundlage zur Berechnung der Bodenfeuchten der Böden in den drei Einzugsgebieten (Chemnitz: Dittersdorfer Bach, Oschatz: Rasslitzbach, Görlitz: Viebigbach) sind die gemessenen bzw. mit WETTREG berechneten Tageswerte für den Niederschlag, die Temperatur und die Sonnenscheindauer. Abbildung 54 zeigt die Entwicklung der Niederschlagssummen (Gesamtniederschlag in mm/a) für den Referenzzeitraum und die beiden Simulationszeiträume von 1998-2100, Abbildung 55 die Sonnenscheindauer in h/a.



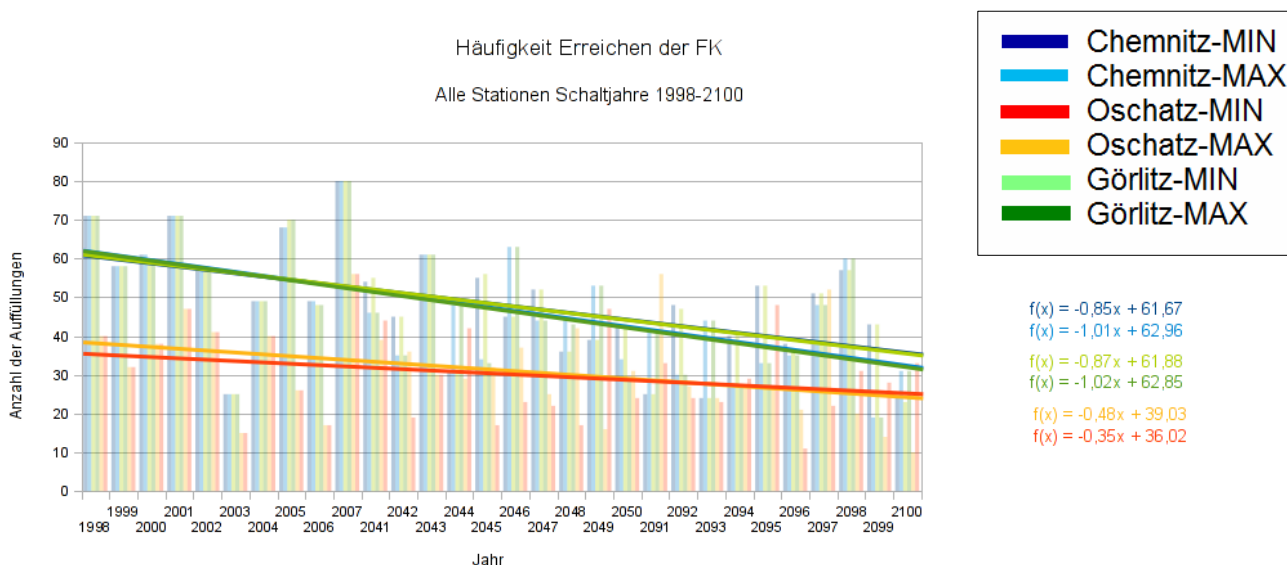
**Abbildung 54: Niederschlagssummen der Klimastationen Chemnitz, Oschatz und Görlitz im Referenzzeitraum und in den Simulationszeiträumen (PILZ 2011)**



**Abbildung 55: Sonnenscheindauer der Klimastationen Chemnitz, Oschatz und Görlitz im Referenzzeitraum und in den Simulationszeiträumen (PILZ 2011)**

Die Niederschlagssummen nehmen für alle Stationen zukünftig ab. In der Region Görlitz fallen im Jahre 2100 durchschnittlich 80 mm weniger Niederschlag, um Oschatz verringert sich das Jahresmittel um etwa 60 mm. Für die Region Chemnitz wird nur eine geringe Abnahme von ca. 15 mm/a vorhergesagt. Die Sonnenscheindauer [h/a] nimmt bis zum Jahr 2100 dagegen deutlich zu: um Chemnitz und Oschatz um durchschnittlich 350 h/a, um Görlitz 100 h/a.

Die Häufigkeit der Tage, an denen die Böden Feldkapazität erreichen, geht deshalb zurück (Abbildung 56). An den Standorten Chemnitz und Görlitz sinkt die Anzahl dieser Tage von ca. 62 auf 35, in Oschatz sinkt sie von 38 auf 25 (PILZ 2011).



**Abbildung 56: Anzahl der Tage, an denen Feldkapazität erreicht wird - Klimastationen Chemnitz, Oschatz und Görlitz im Referenzzeitraum und in den Simulationszeiträumen (PILZ 2011)**

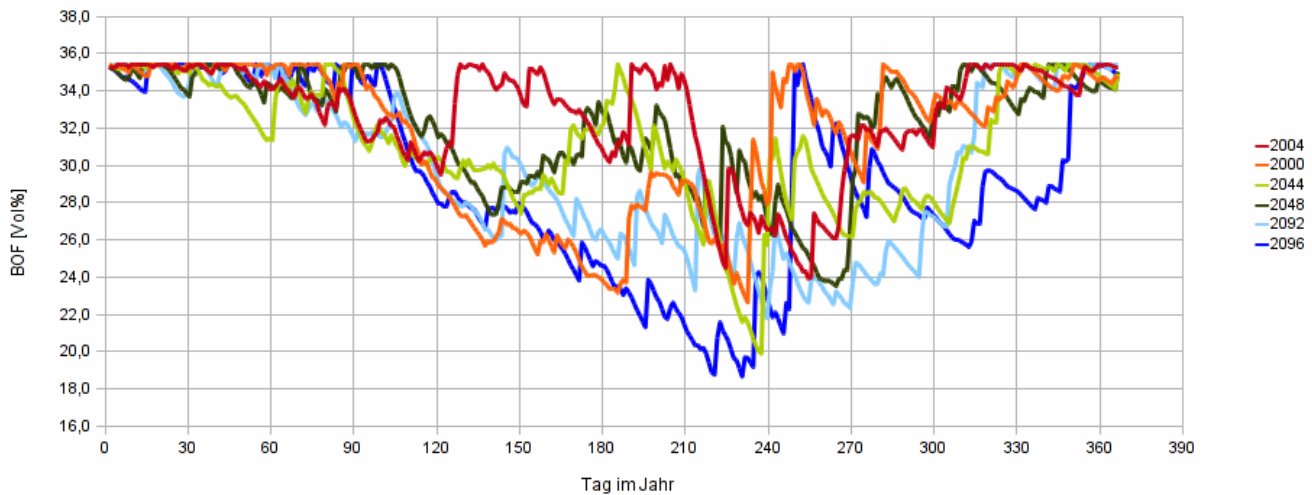
### 3.2.1 Klimastation Chemnitz

Die Bodenfeuchten wurden für die beiden im Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches vorkommenden Bodenarten Slu und Uls berechnet. Die Unterschiede zwischen den Bodenfeuchten der beiden Bodenarten sind jedoch marginal, deshalb wurde der Vergleich nur für die Bodenart Slu durchgeführt. Aufgrund der Datenfülle wurden in der folgenden Darstellung nur die Schaltjahre mit der Beschränkung auf eine Fruchtart – Winterweizen - betrachtet.

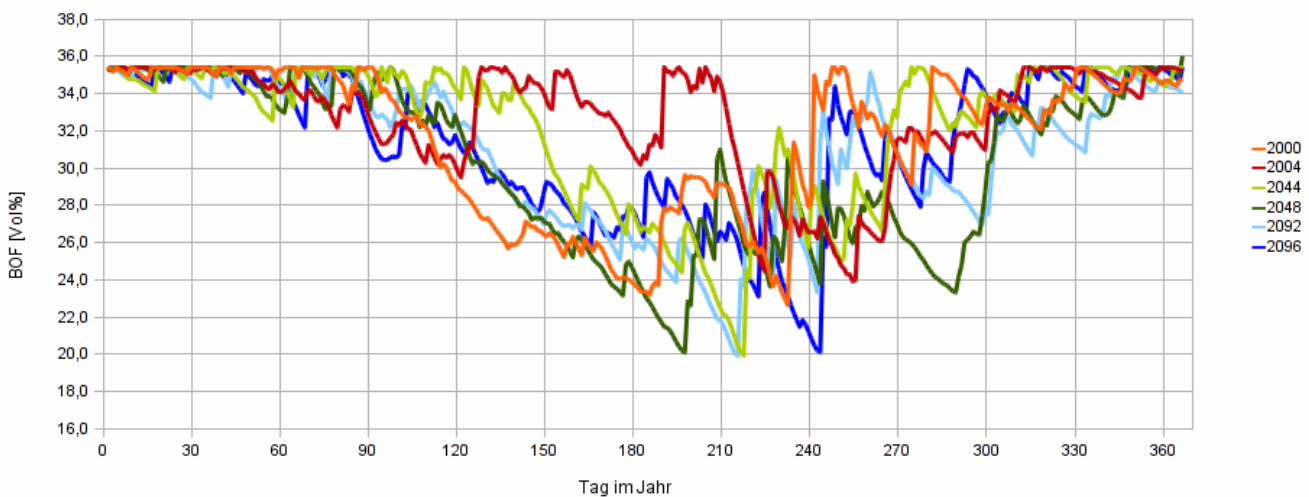
Die Jahresverläufe ähneln sich in den Zukunftsszenarien stärker als im Referenzzeitraum (Abbildung 57 und Abbildung 58). Die Bodenfeuchten sind in den Sommermonaten zukünftig im Durchschnitt geringer. Die Tiefstwerte werden im betrachteten Zeitraum in den Jahren 2092 und 2096 für den Lauf mit der geringsten mittleren Starkregenintensität (MIN) erreicht. Die Ergebnisse des MAX-Laufes zeigen insgesamt geringfügig höhere Werte. Beim MIN-Lauf (2091-2100) verlängert sich der Zeitraum zwischen dem Beginn der Ausschöpfung des Bodenwasserspeichers ab Feldkapazität im Frühjahr bis zur Wiederauffüllung im Herbst. Gleiches konnte für den MAX-Lauf nicht festgestellt werden.

Um zu untersuchen, inwiefern sich die Bodenfeuchte zukünftig verändert, wurden die taggenau vorliegenden Bodenfeuchtwerte nach KA5 (S. 115) in die Klassen „trocken“ ( $pF > 4.0$ ), „schwach feucht“ ( $pF 4.0 \text{ bis } > 2.7$ ), „feucht“ ( $pF 2.7 \text{ bis } > 2.1$ ) und „sehr feucht“ ( $pF \leq 2.1$ ) eingeteilt und die Häufigkeitsverteilung bestimmt.

Über beide Läufe MAX und MIN gemittelt, nimmt die Anzahl der Tage mit „sehr feuchten“ Werten stark ab, die Anzahl der Tage mit „feuchten“ und „schwach feuchten“ Werten nimmt bei beiden Läufen etwa gleich stark zu. Beim MIN-Lauf ist dieser Trend deutlicher zu erkennen als beim MAX-Lauf. Die absoluten Mengenverhältnisse der Bodenfeuchteklassen des Referenzzeitraumes bleiben jedoch erhalten. Dies bedeutet, dass auch bei den simulierten Läufen die Tage mit „sehr feuchten“ Werten den größten Anteil, die „feuchten“ einen mittleren und die „schwach feuchten“ Werte den geringsten Anteil ausmachen.



**Abbildung 57: Verlauf der Bodenfeuchte im Referenzzeitraum und im MIN-Lauf (Schaltjahre), Bodenart Slu, Winterweizen, Klimastation Chemnitz (PILZ 2011)**



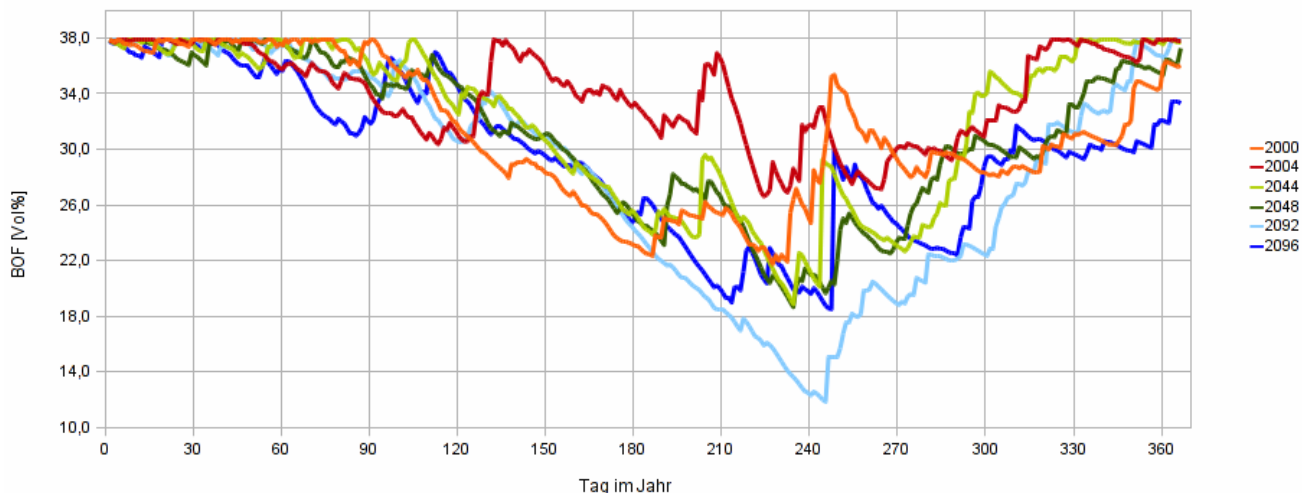
**Abbildung 58: Verlauf der Bodenfeuchte im Referenzzeitraum und im MAX-Lauf (Schaltjahre), Bodenart Slu, Winterweizen, Klimastation Chemnitz (PILZ 2011)**

### 3.2.2 Klimastation Oschatz

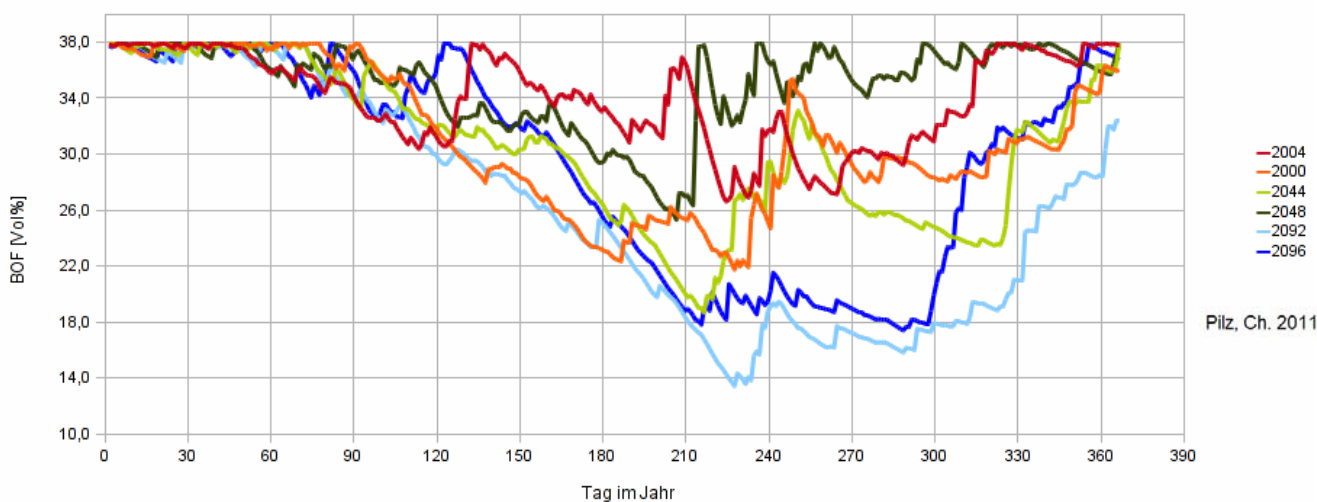
Die Bodenfeuchten wurden für die im Einzugsgebiet des Rasslitzbaches vorkommende Bodenart Ut3 berechnet. Es wurden die Bodenfeuchten in den Schaltjahren bei Anbau von Winterweizen betrachtet.

Beim Vergleich der Bodenfeuchten im Referenzzeitraum mit den Bodenfeuchten in den Zukunftsszenarien ist zu erkennen, dass die Bodenfeuchte im Referenzzeitraumes stärker alterniert als in den simulierten Zeiträumen, zudem sind die Bodenfeuchten insgesamt betrachtet höher als in den Zukunftssimulationen.

Die sommerliche Trockenperiode verlängert sich in den simulierten Zeiträumen, wobei diese Tendenz erst in den Jahren 2091-2100 eindeutig erkennbar ist. Insgesamt verändern sich die Werte dahingehend, dass die Anzahl der Tage mit „schwach feuchten“ Werten im Zeitraum 2041-2100 zunimmt, die Anzahl der Tage mit „feuchten“ Werten wenig und die Anzahl der Tage mit „sehr feuchten“ Werten stark abnimmt. Dazu kommen Tage mit „trockenen“ Werten, die es im Referenzzeitraum nicht gibt.



**Abbildung 59: Verlauf der Bodenfeuchte im Referenzzeitraum und im MIN-Lauf (Schaltjahre), Bodenart Ut3, Winterweizen, Klimastation Oschatz (PILZ 2011)**



**Abbildung 60: Verlauf der Bodenfeuchte im Referenzzeitraum und im MAX-Lauf (Schaltjahre), Bodenart Ut3, Winterweizen, Klimastation Oschatz (PILZ 2011)**

### 3.2.3 Klimastation Görlitz

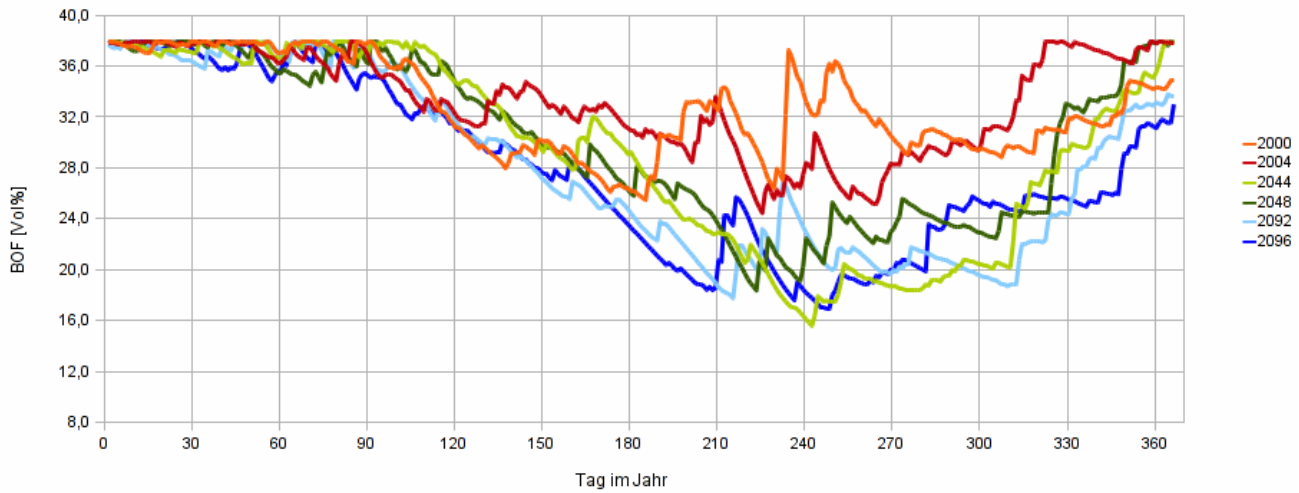
Der Vergleich der Bodenfeuchten für das Einzugsgebiet Viebigbach (Klimastation Görlitz) wurde unter den gleichen Annahmen wie für das Rasslitzbach-Einzugsgebiet durchgeführt: Auswahl der Schaltjahre, Bodenart Ut3, Fruchtart Winterweizen.

Beim Vergleich der aus den realen Klimadaten gewonnenen Bodenfeuchten mit den Bodenfeuchten aus den simulierten Klimadaten zeigt sich, dass die Bodenfeuchten für die simulierten Zeiträume wieder insgesamt mehr Ähnlichkeit untereinander aufweisen als die Bodenfeuchten im Referenzzeitraum. Insgesamt sind die Bodenfeuchten in den Zukunftszeiträumen geringer als im Referenzzeitraum.

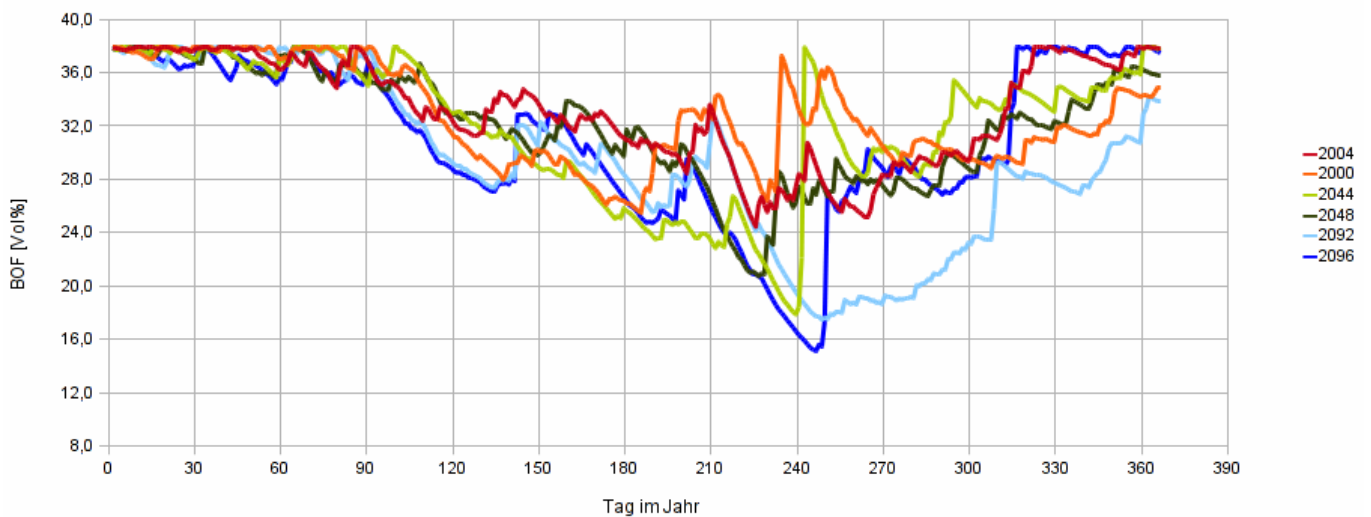
Der Beginn der sommerlichen Ausschöpfung verfrüht sich. Der Zeitpunkt des Erreichens der Tiefstwerte und der Zeitpunkt der ersten Auffüllung im Herbst rücken näher an das Jahresende, wodurch sich die sommerliche Trockenphase verlängert. Zukünftig treten in der Region Görlitz Jahre auf, in denen der Bodenspeicher bis zum Jahresende nicht mehr aufgefüllt wird. Jedoch gibt es auch Abweichungen: Die Jahre 2044 und 2048 des Laufes MAX zeigen im Frühjahr eine höhere Feuchte als alle Referenzjahrgänge.

Bei Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der einzelnen Bodenfeuchteklassen ist erkennbar, dass die Anzahl der Tage mit „sehr feuchten“ und „feuchten“ Werten abnimmt (PILZ 2011). Die Anzahl der Tage mit „schwach feuchten“ Werten steigt dagegen sehr

stark an. Dadurch verändern sich auch die Mengenverhältnisse des Auftretens der einzelnen Klassen. Im Referenzzeitraum ist der Anteil der Tage mit „sehr feuchten“ Werten am größten, in den simulierten Zeiträumen dagegen überwiegen die Tage mit „schwach feuchten“ Werten. Dies ist im MAX-Lauf mit der höchsten mittleren Starkregenintensität deutlicher ausgeprägt als im MIN-Lauf.



**Abbildung 61: Verlauf der Bodenfeuchte im Referenzzeitraum und im MIN-Lauf (Schaltjahre), Bodenart Ut3, Winterweizen, Klimastation Görlitz (PILZ 2011)**



**Abbildung 62: Verlauf der Bodenfeuchte im Referenzzeitraum und im MAX-Lauf (Schaltjahre), Bodenart Ut3, Winterweizen, Klimastation Görlitz (PILZ 2011)**

Die mit METVER auf der Grundlage der mit WETTREG simulierten Klimadaten berechneten zukünftigen Bodenfeuchten stimmen im Trend gut mit den Prognosen nach KLÖCKING et al. (2009) überein.



## 3.3 Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser

### 3.3.1 Gebietsausträge im Referenzzeitraum „Konventionelle Bodenbearbeitung“ 1998-2007

#### 3.3.1.1 Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches (Klimastation Chemnitz)

Tabelle 33 listet die simulierten Gebietsausträge im Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches auf.

**Tabelle 33: Gebietsausträge [t/ha] 1998-2007, Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach (Chemnitz); Abbildung 63 bezieht sich auf die Markierung September 2005**

Jahr \ Monat	1998 [t/ha]	1999 [t/ha]	2000 [t/ha]	2001 [t/ha]	2002 [t/ha]	2003 [t/ha]	2004 [t/ha]	2005 [t/ha]	2006 [t/ha]	2007 [t/ha]	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
März	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
April	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Mai	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	1
Juni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Juli	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	2
August	0.2	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0	1.7	1.8	4.0	6
September	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.9	0.2	0.0	2
Oktober	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
November	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Anzahl/Jahr	2	1	1	0	1	0	2	2	2	1	Σ12
Austrag/Jahr Summe [t/ha]	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.0	2.9	12.6	2.0	4.0	Gesamtaustrag: 22.3 t/ha

Der Gebietsaustrag aus dem Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches im Referenzzeitraum beträgt 22.3 t/ha. EROSION 3D berechnet für insgesamt 16 Monate einen Sedimenteintrag in den Vorfluter. In Tabelle 33 wurden nur die zwölf Monate erfasst, in denen es zu Einträgen  $\geq 0.1$  t/ha kommt. Pro Jahr gibt es nie mehr als zwei Monate, in denen Einträge  $\geq 0.1$  t/ha in den Vorfluter simuliert wurden. Der Monat August ist im 10-Jahres-Zeitraum sechsmal und damit am häufigsten betroffen.

Fast 50 % des Eintrages in dieser Dekade sind auf ein Starkregenereignis am 11.09.2005 mit Spitzenintensitäten  $> 1.8$  mm/min zurückzuführen. Erosion und Deposition für dieses Ereignis sind in Abbildung 63 dargestellt. Zur Veranschaulichung wurden die Flächen-ID der am meisten von Erosion betroffenen Ackerschläge eingetragen. Mit Hilfe der Daten aus Tabelle 21 lassen sich die Feldfrüchte zuordnen. Die Simulation wurde unter folgenden Annahmen durchgeführt: Auf den Schlägen 7, 33 und 46 wurden die Wintergerste am 15.07.2005 geerntet und der nachfolgende Winterraps am 29.08.2005 ausgesät, sie befinden sich demzufolge im Saatbettzustand nach konventioneller Bodenbearbeitung. Aufgrund der fehlenden Bodenbedeckung und der feinkrümeligen Bodenstruktur, die stark verschlammungsanfällig ist, kommt es aus diesen Schlägen zu größeren Einträgen in den Vorfluter. Auf dem Schlag 39 wurde die Sommergerste am 10.08.2005 geerntet. Es wird angenommen, dass bis zur nächsten Bodenbearbeitung mit der Einsaat des Winterweizens am 05.10.2005 Stoppeln belassen werden. Die Bodenbedeckung durch Stoppeln wirkt zwar erosionsmindernd, aufgrund der Verdichtung durch Erntemaschinen wird dennoch viel Boden aus diesem Schlag in den Vorfluter eingetragen. Im Süden des Einzugsgebietes befindet sich ein zusammenhängendes Waldgebiet, in dem trotz der starken Niederschläge keine Erosion auftritt.

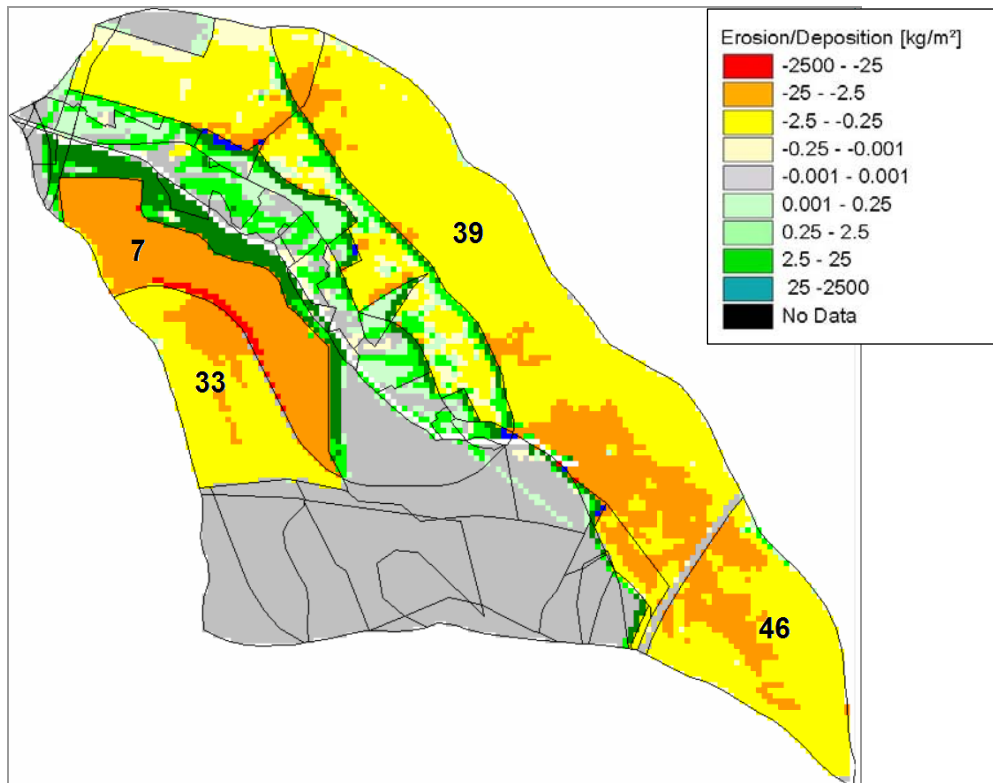


Abbildung 63: Erosion und Deposition im Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach (Klimastation Chemnitz) - September 2005 (zurückzuführen auf ein Starkregenereignis am 11.09.2005)

### 3.3.1.2 Einzugsgebiet des Rasslitzbaches (Klimastation Oschatz)

Tabelle 34 zeigt die berechneten Gebietsausträge im Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet des Rasslitzbaches.

Tabelle 34: Gebietsausträge [t/ha] 1998-2007, Einzugsgebiet Rasslitzbach (Oschatz); Abbildung 64 bezieht sich auf die Markierung August 2002

Jahr \ Monat	1998 [t/ha]	1999 [t/ha]	2000 [t/ha]	2001 [t/ha]	2002 [t/ha]	2003 [t/ha]	2004 [t/ha]	2005 [t/ha]	2006 [t/ha]	2007 [t/ha]	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	2
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
März	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2
April	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Mai	0.0	4.2	0.0	0.0	0.1	0.0	8.1	0.0	0.0	1.3	4
Juni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1
Juli	0.0	0.7	0.0	2.2	0.7	0.0	20.7	0.2	0.0	0.0	5
August	0.0	0.0	0.0	0.0	32.2	0.0	1.3	0.1	0.0	20.8	4
September	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	2
Oktober	0.8	0.0	0.0	1.3	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3
November	1.2	0.0	0.0	0.6	0.9	0.0	1.0	0.0	0.0	0.3	5
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1
Anzahl/Jahr	3	2	0	3	7	1	5	2	0	6	Σ29
Austrag/Jahr Summe [t/ha]	4.3	4.9	0.0	4.1	34.8	0.1	31.3	0.3	0.0	30.9	Gesamtaustrag: 110.7 t/ha

Für den Zeitraum von Januar 1998 bis Dezember 2007 werden 111 t/ha Gebietsaustrag aus dem Einzugsgebiet des Rasslitzbaches berechnet. Innerhalb des 10-Jahres-Zeitraumes kommt es dreimal zu Sedimenteinträgen > 20 t/ha (August 2002, Juli 2004 und August 2007). Für 90 Monate wird eine Sedimentfracht ausgegeben, der Grenzwert 0.1 t/ha wird 29-mal erreicht bzw. überschritten. Die Monate Mai, Juli, August und November sind am häufigsten betroffen (vier- bis fünfmal in der Dekade), nur für November wird kein Sedimenteintrag berechnet.

Abbildung 64 zeigt die Verteilung von Erosion und Deposition infolge der Starkregenereignisse im August 2002. Die Starkregen fielen am 07., 08. und 10.08.2002. Die Ackerflächen sind bis auf die Polygone mit den IDs 12 und 37 – insbesondere die Maisschläge und die schon abgeernteten Wintergerste – aufgrund der hohen Niederschlagsintensitäten und -mengen in etwa gleichmäßig stark erodiert. Die Schläge mit den ID 12 und 37 befinden sich am Rand des Einzugsgebietes und sind kaum von konzentriertem Oberflächenabfluss betroffen. Auf fast allen übrigen Schlägen führt der Oberflächenabfluss zu starker Erosion in den Tiefenlinien. Der Winterweizen auf diesen Schlägen befindet sich im Reifezustand unmittelbar vor der Ernte.

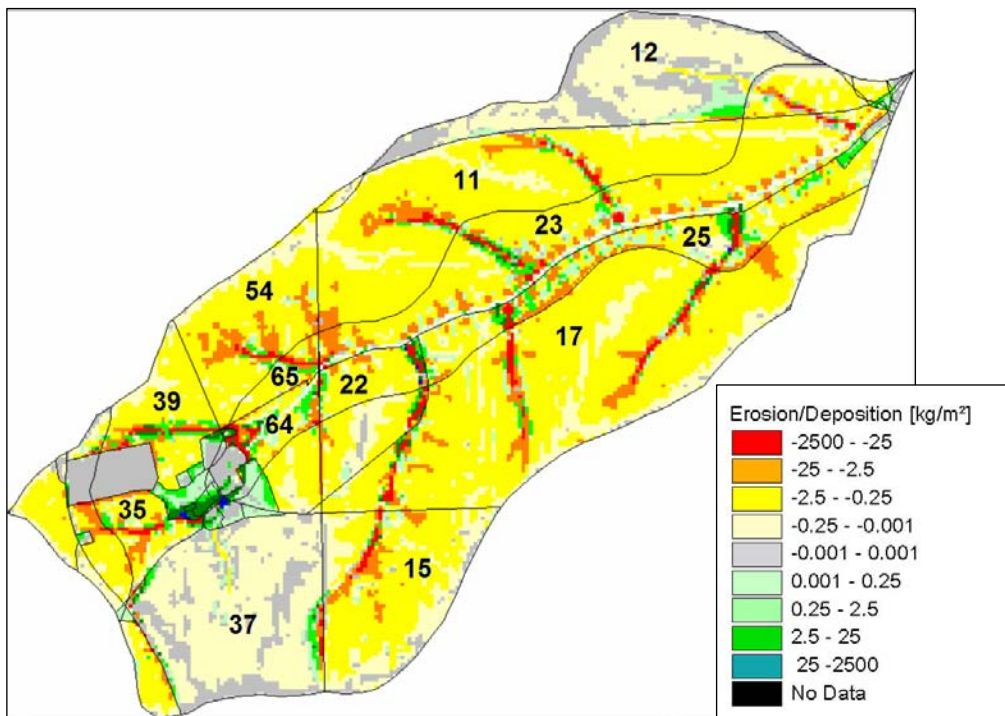


Abbildung 64: Erosion und Deposition im Einzugsgebiet des Rasslitzbaches (Klimastation Oschatz) - August 2002 (zurückzuführen auf ein Starkregenereignis am 07.08.2002)

### 3.3.1.3 Einzugsgebiet des Viebigbaches (Klimastation Görlitz)

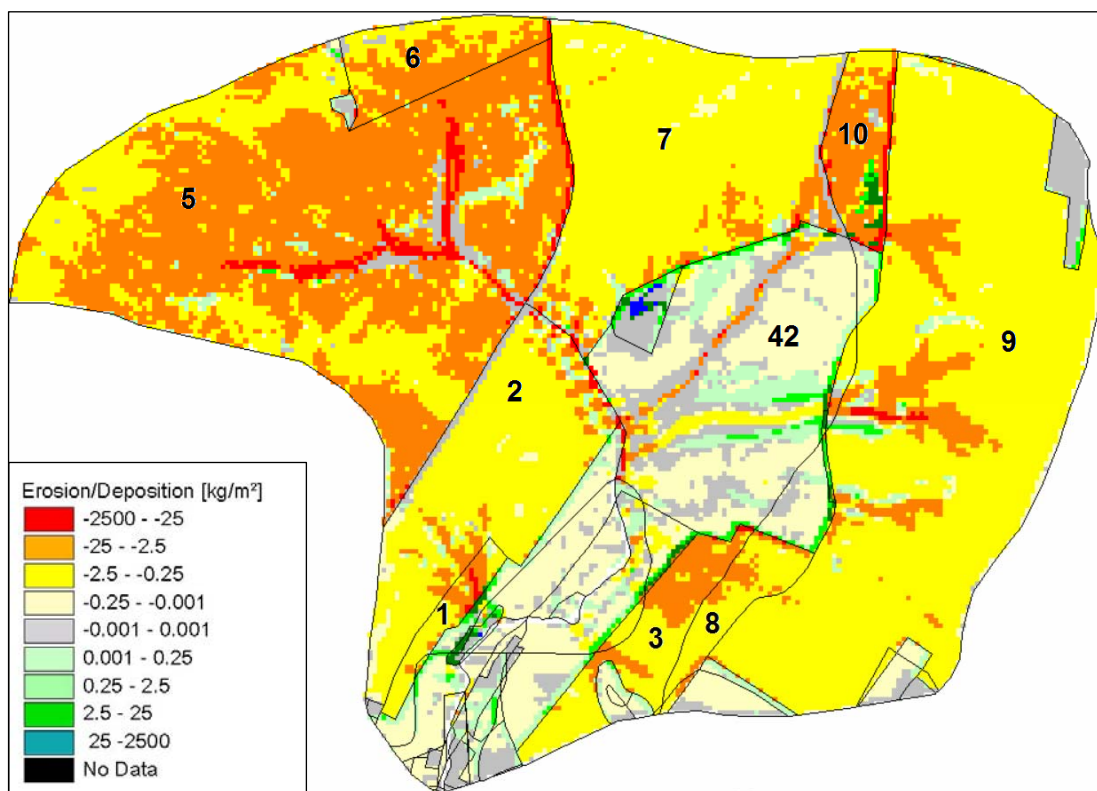
In Tabelle 35 wurden die Gebietsausträge im Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet des Viebigbaches zusammengestellt.

Tabelle 35: Gebietsausträge [t/ha] 1998-2007, Einzugsgebiet Viebigbach (Görlitz); Abbildung 65 bezieht sich auf die Markierung August 2000

Jahr	Monat	1998 [t/ha]	1999 [t/ha]	2000 [t/ha]	2001 [t/ha]	2002 [t/ha]	2003 [t/ha]	2004 [t/ha]	2005 [t/ha]	2006 [t/ha]	2007 [t/ha]	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
Januar		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Februar		0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
März		0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
April		0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
Mai		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.9	1
Juni		0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	2
Juli		0.0	0.0	0.0	0.1	0.9	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	3
August		0.0	0.0	42.3	8.6	47.5	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	4
September		19.4	1.6	0.0	15.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3
Oktober		0.0	0.0	0.0	0.1	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2
November		0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
Dezember		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1
Anzahl/Jahr		1	1	2	6	5	0	1	2	0	2	Σ20
Austrag/Jahr Summe [t/ha]		19.4	1.6	42.6	24.9	51.1	0.0	1.4	2.1	0.0	17.0	Gesamtaustrag: 160.1 t/ha

Die Anzahl der Monate, in denen Gebietsausträge für den Viebigbach ermittelt werden, ist im Vergleich zum Einzugsgebiet des Rasslitzbaches gering. Für 25 Monate wird ein Sedimentaustrag berechnet. Der Grenzwert von 0.1 t/ha wird in der Dekade nur 20-mal überschritten. Der Gebietsaustrag ist jedoch mit 160 t/ha deutlich größer. Im August 2000 und im August 2002 werden Austräge > 40 t/ha simuliert. Im September 1998 und 2001 sowie im Mai 2007 übersteigen die Sedimenteinträge in den Vorfluter 15 t/ha. Juli, August und September sind die Monate mit dem höchsten Erosionsrisiko.

In Abbildung 65 wird die Verteilung von Erosion und Deposition für August 2000 dargestellt (Gebietsaustrag 42.3 t/ha). Der Austrag ist hauptsächlich auf ein Starkregenereignis am 21.08.2000 zurückzuführen. Wintergerste und Winterweizen (Schläge 1, 2, 3, 7, 8, 9) sind abgeerntet, auf den Feldern wurden Stoppeln belassen. Die Schläge, denen im Jahre 2000 die Fruchtart Mais zugeordnet wurde (5, 6 und 10), werden stark erodiert. Tritt der Oberflächenabfluss vom Ackerschlag in das angrenzende Grünland (Beispiel Fläche 42), wird die Fließgeschwindigkeit aufgrund der höheren Rauigkeit geringer: es kommt zur Deposition.



**Abbildung 65: Erosion und Deposition im Einzugsgebiet des Viebigbaches (Klimastation Görlitz) - August 2000 (zurückzuführen auf ein Starkregenereignis am 21.08.2000)**

### 3.3.2 Gebietsausträge Zukunftsszenario „Konventionelle Bodenbearbeitung“ 2041-2050 und 2091-2100, Läufe MIN und MAX

#### 3.3.2.1 Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches (Klimastation Chemnitz)

Tabelle 36 zeigt die Gebietsausträge für den MIN-Lauf (Lauf mit der geringsten mittleren Starkregenintensität) für den Zeitraum 2041-2050, Tabelle 37 die Gebietsausträge für den MAX-Lauf (Lauf mit der höchsten mittleren Starkregenintensität) für das Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches. Tabelle 38 (MIN-Lauf) und Tabelle 39 (MAX-Lauf) beziehen sich auf den 2. Simulationszeitraum 2091-2100.

Tabelle 36: Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2041-2050, MIN-Lauf

Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach: Gebietsausträge 2041-2050, MIN-Lauf											
Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
März	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1
April	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	3
Mai	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	1
Juni	3.9	0.3	0.1	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	5
Juli	0.2	0.0	0.1	0.3	0.3	0.5	0.0	0.0	0.3	1.0	7
August	2.4	0.0	1.4	0.9	6.9	0.9	0.9	4.0	0.9	2.3	9
September	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	2.4	9.1	3
Oktober	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
November	0.0	9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Anzahl/Jahr	3	3	3	2	4	3	2	1	6	4	Σ31
Austrag/Jahr Summe [t/ha]	6.5	10.1	1.6	1.2	13.2	1.6	2.0	4.0	5.0	12.4	Gesamtaustrag: 57.6 t/ha
Das entspricht einer Erhöhung um 158 % gegenüber dem Referenzzeitraum.											

Tabelle 37: Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2041-2050, MAX-Lauf

Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach: Gebietsausträge 2041-2050, MAX-Lauf											
Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
März	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1
April	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.1	3
Mai	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	2
Juni	5.0	0.8	0.0	0.2	0.0	0.0	9.6	0.3	0.1	0.0	6
Juli	0.9	3.9	0.1	0.2	0.2	2.8	0.2	5.1	0.2	1.2	10
August	0.5	0.8	12.2	1.5	0.1	1.7	0.0	3.3	10.2	4.1	9
September	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.5	0.3	5
Oktober	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
November	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	1
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Anzahl/Jahr	5	4	2	4	2	3	2	3	7	5	Σ37
Austrag/Jahr Summe [t/ha]	6.6	5.7	12.3	2.3	0.3	4.9	9.8	8.7	14.6	5.8	Gesamtaustrag: 71.0 t/ha
Das entspricht einer Erhöhung um 218 % gegenüber dem Referenzzeitraum.											

Für den Zeitraum 2041-2050 wird für beide Läufe (MAX und MIN) ein starker Anstieg der Gebietsausträge berechnet. Der Bodenabtrag im Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach verdreifacht sich (58 t/ha [MIN] und 71 t/ha [MAX]) im Vergleich zum Referenzzeitraum (22 t/ha) (siehe Abbildung 66). Die Anzahl der Monate, in denen Einträge  $\geq 0.1$  t/ha in den Vorfluter simuliert werden, steigt von 12 im Referenzzeitraum auf 31 Monate (MIN) bzw. 37 Monate (MAX). Erosionsereignisse kommen am häufigsten in den Monaten Juni bis September vor, davon sind die Monate Juli und August besonders häufig betroffen.

Tabelle 38: Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2091-2100, MIN-Lauf

Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach: Gebietsausträge 2091-2100, MIN-Lauf												
Jahr	Monat	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
		[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	
Januar		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Februar		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
März		0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	2
April		0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	2
Mai		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Juni		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Juli		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
August		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
September		0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	5.3	0.0	0.2	0.7	0.7	5
Oktober		0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
November		0.0	0.0	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
Dezember		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Anzahl/Jahr		1	0	1	1	2	2	0	2	1	1	Σ11
Austrag/Jahr Summe [t/ha]		0.1	0.0	0.3	2.3	4.8	5.8	0.0	1.3	0.7	0.7	Gesamtaustrag: 16.0 t/ha
Das entspricht einer Verringerung um 28 % gegenüber dem Referenzzeitraum.												

Tabelle 39: Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2091-2100, MAX-Lauf

Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach: Gebietsausträge 2041-2100, MAX-Lauf												
Jahr	Monat	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
		[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	
Januar		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Februar		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
März		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1
April		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	2
Mai		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Juni		0.0	0.0	12.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	2
Juli		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.2	2
August		0.0	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.9	0.0	5
September		0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.5	1.3	0.1	0.0	0.0	4
Oktober		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1.5	0.0	2
November		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Dezember		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Anzahl/Jahr		0	1	3	0	0	2	2	4	4	2	Σ18
Austrag/Jahr Summe [t/ha]		0.0	0.1	13.1	0.0	0.0	0.6	1.5	1.4	4.2	0.6	Gesamtaustrag: 21.5 t/ha
Das entspricht einer Verringerung um 4 % gegenüber dem Referenzzeitraum.												

Für den zweiten Simulationszeitraum (2091-2100) wird ein Rückgang der Gebietsausträge auf etwa das heutige Niveau simuliert (16 t/ha [MIN] bzw. 22 t/ha [Max]). Luftpolster- und Hydrophobizitätseffekte, die aufgrund der trockeneren Böden im zweiten Simulationszeitraum wahrscheinlich sind, wurden bei diesen Simulationen nicht berücksichtigt. Die Anzahl der Monate, in denen Erosion auftritt, kehrt wieder auf das Niveau des Referenzzeitraums zurück – allerdings kommt es aufgrund der veränderten Verteilung der Starkniederschläge zu einer leichten Verschiebung des Peaks im Sommer in die Frühjahrs- und Herbstmonate.

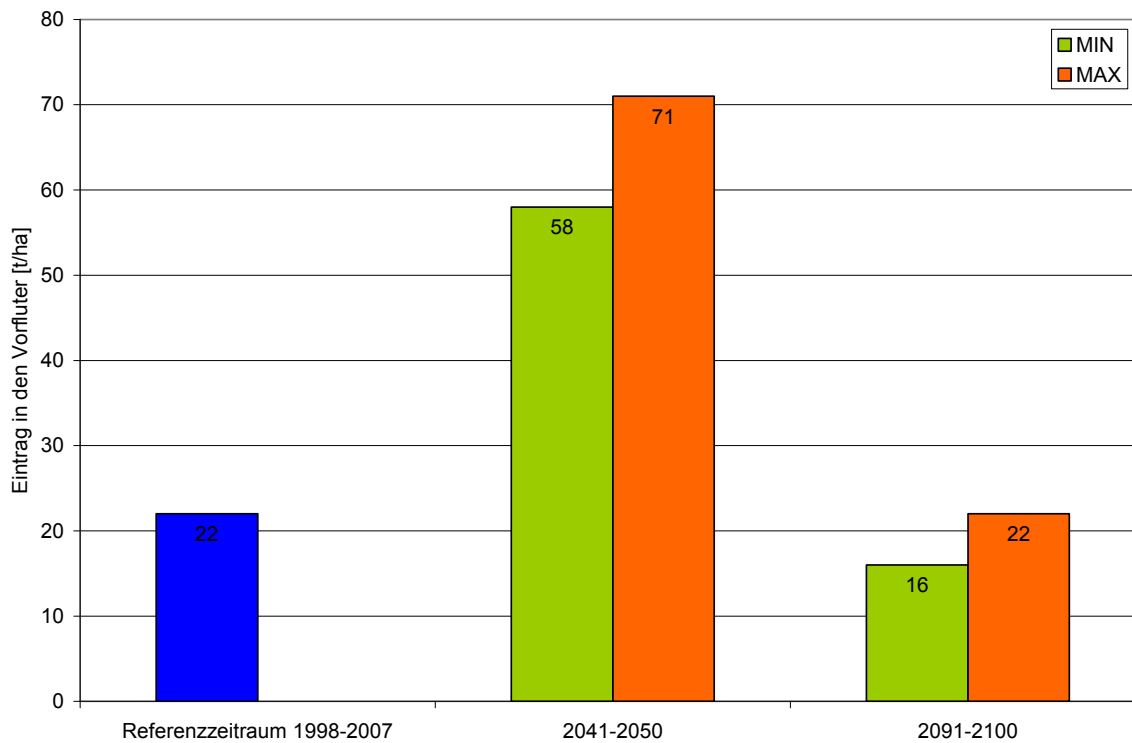


Abbildung 66: Gebietsausträge Dittersdorfer Bach für die Dekaden 2041-2050 und 2091-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum

### 3.3.2.2 Einzugsgebiet des Rasslitzbaches (Klimastation Oschatz)

In Tabelle 40 sind die Gebietsausträge für den MIN-Lauf für den Zeitraum 2041-2050, in Tabelle 41 die Gebietsausträge für den MAX-Lauf für das Einzugsgebiet des Rasslitzbaches zusammengestellt. Tabelle 42 (MIN-Lauf) und Tabelle 43 (MAX-Lauf) beziehen sich auf den 2. Simulationszeitraum 2091-2100.

Tabelle 40: Gebietsausträge Rasslitzbach 2041-2050, MIN-Lauf

Einzugsgebiet Rasslitzbach: Gebietsausträge 2041-2050, MIN-Lauf											
Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.8	0.0	2
März	6.9	13.4	1.1	0.0	0.0	0.0	26.2	0.0	4.9	0.0	5
April	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.4	0.0	5.1	0.0	0.0	4
Mai	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
Juni	5.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	3
Juli	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	0.3	0.0	0.0	3
August	0.0	0.0	0.9	2.0	0.0	0.0	0.0	4.8	0.2	0.1	5
September	16.9	0.0	5.7	0.0	1.7	0.0	0.0	16.6	0.0	0.0	4
Oktober	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	2
November	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.7	0.0	0.0	3
Dezember	0.0	0.0	4.4	0.0	0.0	3.2	0.4	0.0	0.0	2.4	4
<b>Anzahl/Jahr</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>Σ36</b>
<b>Austrag/Jahr Summe [t/ha]</b>	<b>29.7</b>	<b>13.7</b>	<b>12.2</b>	<b>2.0</b>	<b>1.8</b>	<b>3.7</b>	<b>27.9</b>	<b>28.9</b>	<b>5.9</b>	<b>2.5</b>	<b>Gesamtaustrag: 128.3 t/ha</b>
<b>Das entspricht einer Erhöhung um 16 % gegenüber dem Referenzzeitraum.</b>											

Tabelle 41: Gebietsausträge Rasslitzbach 2041-2050, MAX-Lauf

Einzugsgebiet Rasslitzbach: Gebietsausträge 2041-2050, MAX-Lauf											
Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	1
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	1
März	0.0	0.2	3.5	1.4	0.0	14.0	0.0	0.0	0.3	0.5	6
April	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	21.4	0.2	0.0	0.0	0.0	3
Mai	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	2
Juni	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	2
Juli	3.6	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	3
August	41.5	0.0	0.0	2.9	5.1	0.0	0.1	0.0	1.9	0.0	5
September	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.5	1
Oktober	0.0	0.0	0.0	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
November	0.2	0.1	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	4
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	1.0	0.0	5.3	0.0	3
Anzahl/Jahr	3	3	1	4	4	2	6	2	4	3	Σ32
Austrag/Jahr Summe [t/ha]	45.3	0.4	3.5	10.0	7.0	35.4	2.8	0.3	7.7	10.5	Gesamtaustrag: 122.9 t/ha
Das entspricht einer Erhöhung um 11 % gegenüber dem Referenzzeitraum.											

Im ersten Simulationszeitraum (2041-2050) wird ein leichter Anstieg des Gebietsaustrages um durchschnittlich 13 % für beide Läufe berechnet. Die Anzahl der Monate, in denen Einträge  $\geq 0.1$  t/ha auftreten, steigt ebenfalls leicht an.

Tabelle 42: Gebietsausträge Rasslitzbach 2091-2100, MIN-Lauf

Einzugsgebiet Rasslitzbach: Gebietsausträge 2091-2100, MIN-Lauf											
Jahr \ Monat	2091 [t/ha]	2092 [t/ha]	2093 [t/ha]	2094 [t/ha]	2095 [t/ha]	2096 [t/ha]	2097 [t/ha]	2098 [t/ha]	2099 [t/ha]	2100 [t/ha]	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
Januar	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2
Februar	0.0	4.6	6.4	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	5
März	28.4	0.0	0.0	7.3	2.8	11.0	0.0	0.9	0.0	0.0	5
April	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	4.3	0.0	0.0	13.6	3
Mai	3.7	0.0	0.1	0.0	0.0	16.1	0.0	1.3	0.0	0.2	5
Juni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Juli	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
August	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2
September	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2
Oktober	0.5	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2
November	2.7	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	10.4	0.0	4
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	1
Anzahl/Jahr	4	1	6	4	2	5	2	3	2	2	Σ31
Austrag/Jahr Summe [t/ha]	35.3	4.6	23.5	9.8	2.9	44.5	4.4	2.3	10.5	13.8	Gesamtaustrag: 151.6 t/ha
Das entspricht einer Erhöhung um 37 % gegenüber dem Referenzzeitraum.											



Tabelle 43: Gebietsausträge Rasslitzbach 2091-2100, MAX-Lauf

Einzugsgebiet Rasslitzbach: Gebietsausträge 2041-2100, MAX-Lauf											
Jahr \ Monat	2091 [t/ha]	2092 [t/ha]	2093 [t/ha]	2094 [t/ha]	2095 [t/ha]	2096 [t/ha]	2097 [t/ha]	2098 [t/ha]	2099 [t/ha]	2100 [t/ha]	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
Januar	1.5	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	3
Februar	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	0.5	3
März	0.0	0.0	0.0	5.8	0.1	0.0	6.5	20.4	1.1	0.3	6
April	0.0	2.2	8.1	3.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	5
Mai	0.0	0.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3
Juni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	2
Juli	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
August	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
September	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	35.5	0.0	0.0	4.9	0.0	3
Oktober	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
November	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Dezember	0.6	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	3
Anzahl/Jahr	3	4	3	3	3	1	1	4	4	2	Σ28
Austrag/Jahr Summe [t/ha]	2.3	8.2	8.9	9.0	0.4	35.5	6.5	21.8	11.0	0.8	Gesamtaustrag: 104.4 t/ha

Das entspricht einer Verringerung um 6 % gegenüber dem Referenzzeitraum.

Die Aussage für den zweiten Simulationszeitraum 2091-2100 ist nicht eindeutig: für den MIN-Lauf wird eine Erhöhung des Gebietsaustrages ausgegeben, für den MAX-Lauf aufgrund der geringeren Bodenfeuchten sogar eine, wenn auch geringe, Abnahme (Abbildung 67). Im Mittel werden im Vergleich zum Referenzzeitraum keine höheren Gebietsausträge berechnet, auch die Anzahl der Monate mit Einträgen in den Vorfluter ist in etwa gleich hoch. Das Erosionsrisiko bleibt demnach im Einzugsgebiet des Rasslitzbachs auf einem hohen Niveau.

Im zweiten Simulationszeitraum ist auch für das Einzugsgebiet des Rasslitzbaches ein Trend zur Verlagerung der Erosionsereignisse von den Sommermonaten Juli und August insbesondere in das Frühjahr und in den Spätherbst erkennbar.

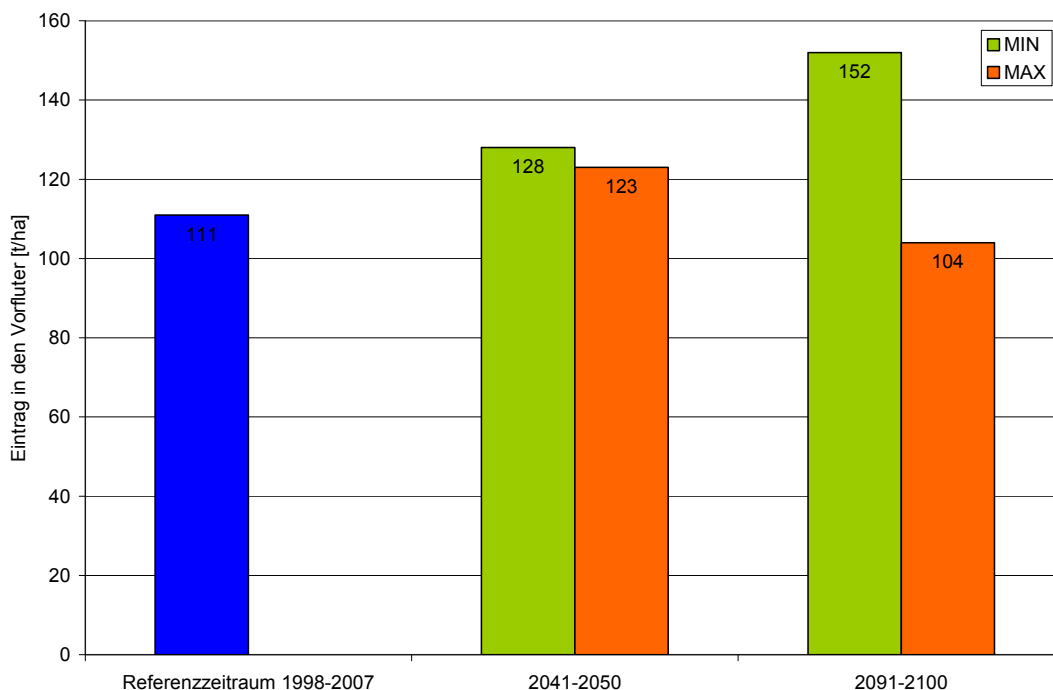


Abbildung 67: Gebietsausträge Rasslitzbach für die Dekaden 2041-2050 und 2091-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum

### 3.3.2.3 Einzugsgebiet des Viebigbaches (Klimastation Görlitz)

Tabelle 44 listet die Gebietsausträge für den MIN-Lauf für den Zeitraum 2041-2050, Tabelle 45 die Gebietsausträge für den MAX-Lauf für das Einzugsgebiet des Viebigbaches auf. Tabelle 46 (MIN-Lauf) und Tabelle 47 (MAX-Lauf) beziehen sich auf den 2. Simulationszeitraum 2091-2100.

**Tabelle 44: Gebietsausträge Viebigbach 2041-2050, MIN-Lauf**

Einzugsgebiet Viebigbach: Gebietsausträge 2041-2050, MIN-Lauf											
Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
März	0.0	0.0	0.0	17.4	0.0	0.1	3.0	0.0	0.0	0.0	3
April	4.2	0.0	0.0	0.0	6.4	0.4	0.0	1.1	0.0	0.0	4
Mai	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	1
Juni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Juli	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
August	0.0	0.0	0.0	42.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
September	0.0	0.0	0.0	9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
Oktober	41.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2
November	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	19.2	0.0	0.0	42.2	3
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	2
<b>Anzahl/Jahr</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Σ17</b>
<b>Austrag/Jahr Summe [t/ha]</b>	<b>45.2</b>	<b>1.9</b>	<b>0.0</b>	<b>69.2</b>	<b>13.4</b>	<b>0.5</b>	<b>22.2</b>	<b>1.1</b>	<b>0.5</b>	<b>43.3</b>	<b>Gesamtaustrag: 197.3 t/ha</b>
Das entspricht einer Erhöhung um 23 % gegenüber dem Referenzzeitraum.											

**Tabelle 45: Gebietsausträge Viebigbach 2041-2050, MAX-Lauf**

Einzugsgebiet Viebigbach: Gebietsausträge 2041-2050, MAX-Lauf											
Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	0.0	1
März	10.3	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.8	3
April	0.0	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
Mai	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2
Juni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	1
Juli	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	2
August	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	1
September	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Oktober	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
November	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Dezember	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
<b>Anzahl/Jahr</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>Σ12</b>
<b>Austrag/Jahr Summe [t/ha]</b>	<b>11.1</b>	<b>5.0</b>	<b>0.0</b>	<b>2.4</b>	<b>0.0</b>	<b>0.1</b>	<b>2.6</b>	<b>0.0</b>	<b>5.7</b>	<b>26.8</b>	<b>Gesamtaustrag: 53.7 t/ha</b>
Das entspricht einer Verringerung um 66 % gegenüber dem Referenzzeitraum.											

Im Vergleich zum Referenzzeitraum werden zum einen höhere Austräge (MIN-Lauf), zum anderen deutlich geringere Austräge (MAX-Lauf) simuliert. Ursache ist die unterschiedliche Anzahl der prognostizierten besonders extremen Starkniederschläge mit Intensitäten > 2.0 mm/min (siehe Tabelle 31: MIN-Lauf: 6, MAX-Lauf: 1). Zudem werden diese extremen Starkniederschläge im Oktober, November und am 31. August datiert, sie finden also jeweils zu einem Zeitpunkt mit sehr geringer Bodenbedeckung statt.

Das zukünftige Erosionsrisiko bis zur Mitte des Jahrhunderts bleibt demnach in der Region um Görlitz auf sehr hohem Niveau, steigt aber im Vergleich zu den Regionen um Chemnitz und Oschatz nicht eindeutig an. Die Vorhersageunsicherheit könnte in einer stärkeren Heterogenität des zukünftigen Starkniederschlagsgeschehens und des Feuchteregimes des Bodens begründet sein.

**Tabelle 46: Gebietsausträge Viebigbach 2091-2100, MIN-Lauf**

Einzugsgebiet Viebigbach: Gebietsausträge 2091-2100, MIN-Lauf											
Jahr \ Monat	2091 [t/ha]	2092 [t/ha]	2093 [t/ha]	2094 [t/ha]	2095 [t/ha]	2096 [t/ha]	2097 [t/ha]	2098 [t/ha]	2099 [t/ha]	2100 [t/ha]	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Februar	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
März	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	3
April	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	3.4	0.0	2
Mai	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Juni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1
Juli	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
August	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
September	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Oktober	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
November	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Anzahl/Jahr	0	1	0	2	1	2	0	0	1	1	Σ8
Austrag/Jahr Summe [t/ha]	0.0	1.6	0.0	0.3	1.0	4.6	0.0	0.0	3.4	2.5	Gesamtaustrag: 13.4 t/ha
Das entspricht einer Verringerung um 92 % gegenüber dem Referenzzeitraum.											

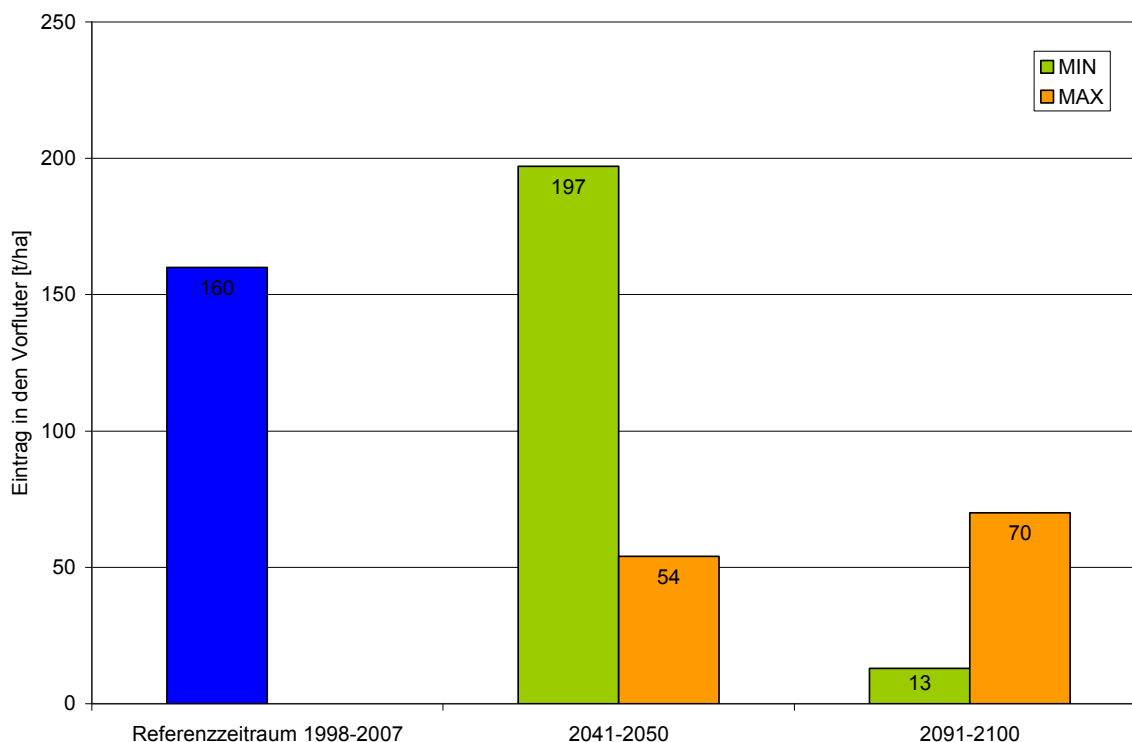
**Tabelle 47: Gebietsausträge Viebigbach 2091-2100, MAX-Lauf**

Einzugsgebiet Viebigbach: Gebietsausträge 2091-2100, MAX-Lauf											
Jahr \ Monat	2091 [t/ha]	2092 [t/ha]	2093 [t/ha]	2094 [t/ha]	2095 [t/ha]	2096 [t/ha]	2097 [t/ha]	2098 [t/ha]	2099 [t/ha]	2100 [t/ha]	Zählung, wie oft der Monat betroffen ist
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
März	0.1	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	58.2	0.0	0.0	3
April	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Mai	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
Juni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Juli	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
August	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
September	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
Oktober	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0
November	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	5.5	2
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1
Anzahl/Jahr	1	0	0	0	3	0	1	1	0	2	Σ8
Austrag/Jahr Summe [t/ha]	0.1	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	1.8	58.2	0.0	6.2	Gesamtaustrag: 69.8 t/ha
Das entspricht einer Verringerung um 56 % gegenüber dem Referenzzeitraum.											

Im Vergleich zum Referenzzeitraum werden für den zweiten Simulationszeitraum in beiden Läufen deutlich geringere Gebietsausträge berechnet (Abbildung 68). Im MIN-Lauf ist die prognostizierte Anzahl der extremen Starkniederschläge mit einer Intensität >2.0 mm/min in der Dekade zwar doppelt so hoch wie im Referenzzeitraum, jedoch ist der Bodenabtrag aufgrund der viel geringeren Bodenfeuchten niedriger. Im MAX-Lauf kommt es im März 2098 zu einer Abfolge von vier extremen Niederschlägen (Intensitäten > 1.0-2.2 mm/min), die mit einer Austragssumme von 58.2 t/ha 84 % des Gebietsaustrages der gesamten Dekade liefern. Für die Bodenfeuchte wurde jeweils Feldkapazität berechnet.

Das Erosionsrisiko nimmt demnach bis zum Ende des Jahrhunderts in dieser Region ab. Einzelne seltene Extreme können jedoch zu sehr hohen Gebietsausträgen führen.

Auch in der Region Görlitz nimmt die Wahrscheinlichkeit sommerlicher Erosionsereignisse ab, dagegen steigt das Risiko in den Frühjahrs- und Herbstmonaten.



**Abbildung 68: Gebietsausträge Viebigbach für die Dekaden 2041-2050 und 2091-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum**

### 3.3.3 Gebietsausträge Zukunftsszenario „Konservierende Bodenbearbeitung“ 2041-2050 und 2091-2100, Läufe MIN und MAX, Grubberbearbeitung und Direktsaat

#### 3.3.3.1 Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches (Klimastation Chemnitz)

In den Tabellen 48 bis 51 sind die Gebietsausträge für den MIN- und den MAX-Lauf für beide Simulationszeiträume für das Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches aufgelistet, die unter der Annahme berechnet wurden, dass alle Schläge dauerhaft konservierend bearbeitet werden (G: Grubber, D: Direktsaat). Zum Vergleich werden die bei konventioneller Bearbeitung berechneten Werte (P) mit abgebildet. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit wurden die Nullwerte nicht in die Tabellen eingetragen.

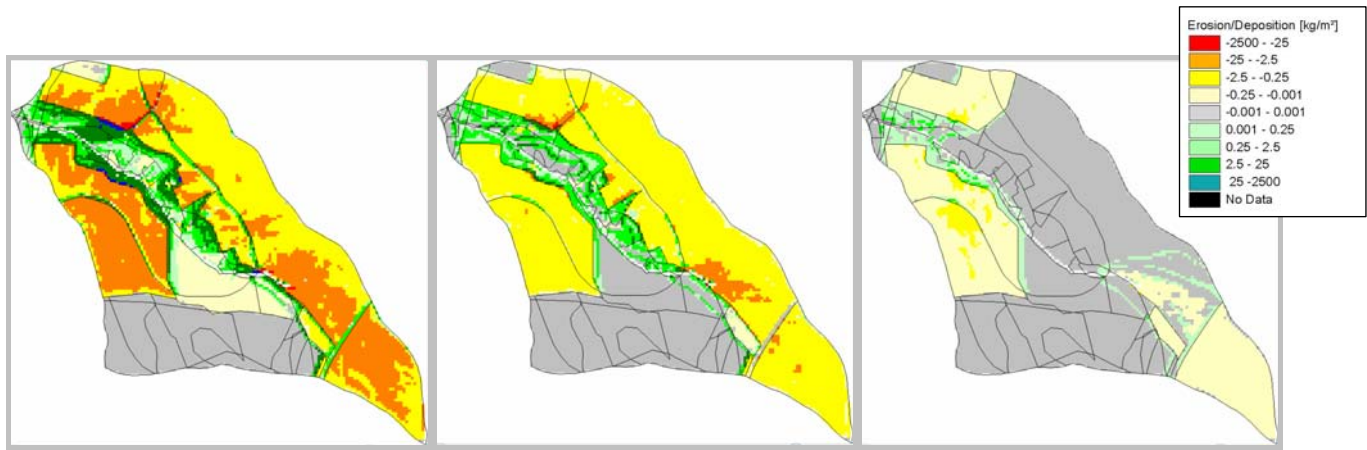
Tabelle 48: Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2041-2050, konservierende Bodenbearbeitung, MIN-Lauf

Jahr	2041 [t/ha]			2042 [t/ha]			2043 [t/ha]			2044 [t/ha]			2045 [t/ha]			2046 [t/ha]			2047 [t/ha]			2048 [t/ha]			2049 [t/ha]			2050 [t/ha]					
	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D			
Jan																																	
Feb																																	
März															0.2	0.0	0.0																
April				0.3	0.0	0.0																		0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0				
Mai																								0.4	0.0	0.0							
Juni	3.9	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0				1.8	0.0	0.0								0.9	0.0	0.0								
Juli	0.2	0.0	0.0				0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0					0.3	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0					
Aug	2.4	0.0	0.0				1.4	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	6.9	0.3	0.1	0.9	0.0	0.0				0.9	0.0	0.0	4.0	0.1	0.0	0.9	0.0	0.0	2.3	0.0	0.0
Sep																																	
Okt															4.2	1.3	0.3																
Nov				9.5	1.1	0.2																											
Dez																																	
<b>Σ [t/ha]</b>	<b>6.5</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>10.1</b>	<b>1.1</b>	<b>0.2</b>	<b>1.6</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>1.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>13.2</b>	<b>1.6</b>	<b>0.4</b>	<b>1.6</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>2.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>4.0</b>	<b>0.1</b>	<b>0.0</b>	<b>5.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>12.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.0</b>			
Σ konventionelle Bearbeitung (P): 57.6 t/ha																																	
Σ Grubberbearbeitung (G): 3.3 t/ha																																	
Σ Direktsaat (D): 0.6 t/ha																																	

Tabelle 49: Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2041-2050, konservierende Bodenbearbeitung, MAX-Lauf, Abbildung 69 bezieht sich auf die Markierung August 2043

Jahr	2041 [t/ha]			2042 [t/ha]			2043 [t/ha]			2044 [t/ha]			2045 [t/ha]			2046 [t/ha]			2047 [t/ha]			2048 [t/ha]			2049 [t/ha]			2050 [t/ha]			
	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	
Jan																															
Feb																															
März																															
April	0.1	0.0	0.0																							1.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Mai									0.4	0.0	0.0															1.5	0.0	0.0			
Juni	5.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0			0.2	0.0	0.0								9.6	1.3	0.2	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0				
Juli	0.9	0.0	0.0	3.9	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	5.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	
Aug	0.5	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	12.2	4.6	0.2	1.5	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0				3.3	0.1	0.0	10.2	2.8	1.1	4.1	0.0	0.0	
Sep	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0									0.4	0.0	0.0								0.5	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	
Okt																															
Nov																										0.4					
Dez																															
<b>Σ [t/ha]</b>	<b>6.6</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>5.7</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>12.3</b>	<b>4.6</b>	<b>0.2</b>	<b>2.4</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.3</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>4.9</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>9.8</b>	<b>1.3</b>	<b>0.2</b>	<b>8.7</b>	<b>0.1</b>	<b>0.0</b>	<b>14.6</b>	<b>2.8</b>	<b>1.1</b>	<b>5.8</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	
Σ konventionelle Bearbeitung (P): 71.0 t/ha																															
Σ Grubberbearbeitung (G): 8.8 t/ha																															
Σ Direktsaat (D): 1.5 t/ha																															

Durch eine konsequente Grubberbearbeitung wird eine Reduzierung des Gebietsaustrages um 94 % (MIN-Lauf) bzw. 88 % (MAX-Lauf) erreicht. Wird dauerhaft auf Direktsaatverfahren umgestellt, ist eine Minderung des Gebietsaustrages um 99 % möglich. Die Bodenparameter wurden so gewählt, dass sie den Bodenzustand nach langjährig angewandter Grubberbearbeitung und Direktsaat beschreiben. Abbildung 69 zeigt die simulierte Verteilung von Erosion und Deposition im Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches für August 2043 bei konventioneller Pflugbearbeitung, bei Grubberbearbeitung und bei Direktsaat unter ansonsten gleichen Bedingungen.



Pflugbearbeitung: 12.2 t/ha

Grubberbearbeitung: 4.6 t/ha

Direktsaat: 0.2 t/ha

**Abbildung 69: Verteilung von Erosion und Deposition August 2043 (MAX-Lauf); Konventionelle Bodenbearbeitung im Vergleich zur Grubberbearbeitung und Direktsaat**

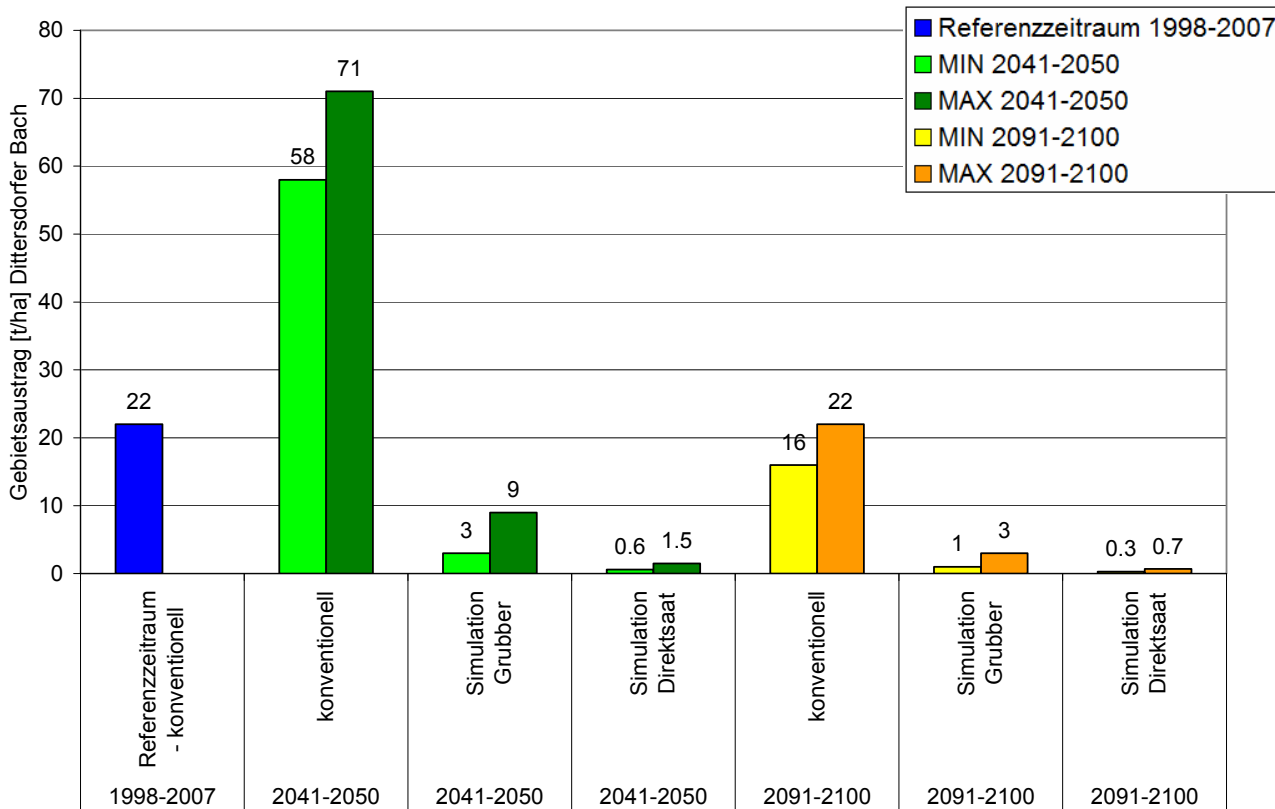
**Tabelle 50: Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2091-2100, konservierende Bodenbearbeitung, MIN-Lauf**

Jahr	2091 [t/ha]			2092 [t/ha]			2093 [t/ha]			2094 [t/ha]			2095 [t/ha]			2096 [t/ha]			2097 [t/ha]			2098 [t/ha]			2099 [t/ha]			2100 [t/ha]			
	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	
Jan																															
Feb																															
März	0.1	0.0	0.0												0.5	0.0	0.0														
April									0.3	0.0	0.0										1.1	0.0	0.0								
Mai																															
Juni																															
Juli																															
Aug																															
Sep													3.4	0.9	0.3	5.3	0.3	0.0				0.2	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	
Okt													1.4	0.0	0.0																
Nov									2.3	0.2	0.0																				
Dez																															
<b>Σ [t/ha]</b>	<b>0.1</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.3</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>2.3</b>	<b>0.2</b>	<b>0.0</b>	<b>4.8</b>	<b>0.9</b>	<b>0.3</b>	<b>5.8</b>	<b>0.3</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>1.3</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.7</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.7</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
<b>Σ konventionelle Bearbeitung (P): 16.0 t/ha</b>																															
<b>Σ Grubberbearbeitung (G): 1.4 t/ha</b>																															
<b>Σ Direktsaat (D): 0.3 t/ha</b>																															

**Tabelle 51: Gebietsausträge Dittersdorfer Bach 2091-2100, konservierende Bodenbearbeitung, MAX-Lauf**

Jahr	2091 [t/ha]			2092 [t/ha]			2093 [t/ha]			2094 [t/ha]			2095 [t/ha]			2096 [t/ha]			2097 [t/ha]			2098 [t/ha]			2099 [t/ha]			2100 [t/ha]				
	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D		
Jan																																
Feb																																
März																						1.0	0.0	0.0								
April																								0.4	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0			
Mai																																
Juni							12.3	2.2	0.5													0.2	0.0	0.0								
Juli																									1.4	0.2	0.1	0.2	0.0	0.0		
Aug							0.4	0.0	0.0											0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0				
Sep							0.4	0.0	0.0																							
Okt																0.5	0.0	0.0	1.3	0.6	0.1	0.1	0.0	0.0								
Nov																0.2	0.0	0.0								1.5	0.0	0.0				
Dez																																
<b>Σ [t/ha]</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>13.1</b>	<b>2.2</b>	<b>0.5</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.7</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>1.5</b>	<b>0.6</b>	<b>0.1</b>	<b>1.4</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>4.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.1</b>	<b>0.6</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>		
<b>Σ konventionelle Bearbeitung (P): 21.5 t/ha</b>																																
<b>Σ Grubberbearbeitung (G): 3.0 t/ha</b>																																
<b>Σ Direktsaat (D): 0.7 t/ha</b>																																

Im zweiten Simulationszeitraum wird durch den Pflugverzicht eine Reduzierung des Gebietsaustrages um 91 % (MIN-Lauf) bzw. 86 % (MAX-Lauf) bei Grubberbearbeitung erreicht. Wird Direktsaat praktiziert, gelingt eine Minderung um 98 % (MIN-Lauf) bzw. 97 % (MAX-Lauf). Der konsequente Einsatz konservierender Bodenbearbeitung wäre im Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches so wirkungsvoll, dass es aus Sicht des Erosionsschutzes nicht erforderlich ist, Ackerflächen in Grünland oder Wald umzuwandeln. Abbildung 70 stellt die Gebietsausträge für konventionelle und konservierende Bearbeitungsverfahren vergleichend dar.



**Abbildung 70: Gebietsausträge für konservierende Bodenbearbeitung im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung für die Dekaden 2041-2050 und 2091-2100 - Dittersdorfer Bach**

### 3.3.3.2 Einzugsgebiet des Rasslitzbaches (Klimastation Oschatz)

In den Tabellen 52 bis 55 sind die Gebietsausträge bei konservierender Bodenbearbeitung (G: Grubber, D: Direktsaat) im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung (P) für den MIN-Lauf und den MAX-Lauf für beide Simulationszeiträume für das Einzugsgebiet des Rasslitzbaches aufgelistet.

Tabelle 52: Gebietsausträge Rasslitzbach 2041-2050, konservierende Bodenbearbeitung, MIN-Lauf

Jahr	2041 [t/ha]			2042 [t/ha]			2043 [t/ha]			2044 [t/ha]			2045 [t/ha]			2046 [t/ha]			2047 [t/ha]			2048 [t/ha]			2049 [t/ha]			2050 [t/ha]					
Monat	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D			
Jan																																	
Feb																						0.3	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0						
März	6.9	1.1	0.3	13.4	2.2	0.7	1.1	0.0	0.0										26.2	0.1	0.1				4.9	0.1	0.0						
April							0.1	0.0	0.0				0.1	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0				5.1	0.2	0.1									
Mai	0.1	0.0	0.0																														
Juni	5.0	0.2	0.2	0.3	0.0	0.0																0.1	0.0	0.0									
Juli																0.1	0.0	0.0	0.5	0.1	0.0	0.3	0.0	0.0									
Aug							0.9	0.0	0.0	2.0	0.8	0.2										4.8	0.9	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0			
Sep	16.9	6.5	1.0				5.7	0.2	0.2				1.7	0.0	0.0							16.6	5.7	1.5									
Okt	0.4	0.0	0.0																			1.0	0.1	0.0									
Nov	0.4	0.0	0.0																0.8	0.2	0.0	0.7	0.0	0.0									
Dez							4.4	1.0	0.0							3.2	0.8	0.0	0.4	0.1	0.0							2.4	0.5	1			
<b>Σ [t/ha]</b>	<b>29.7</b>	<b>7.8</b>	<b>1.5</b>	<b>13.7</b>	<b>2.2</b>	<b>0.7</b>	<b>12.2</b>	<b>1.2</b>	<b>0.2</b>	<b>2.0</b>	<b>0.8</b>	<b>0.2</b>	<b>1.8</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>3.7</b>	<b>0.8</b>	<b>0.0</b>	<b>27.9</b>	<b>0.5</b>	<b>0.1</b>	<b>28.9</b>	<b>6.9</b>	<b>1.8</b>	<b>6.0</b>	<b>0.1</b>	<b>0.0</b>	<b>2.5</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>			
<b>Σ konventionelle Bearbeitung (P): 128.3 t/ha</b>																																	
<b>Σ Grubberbearbeitung (G): 20.8 t/ha</b>																																	
<b>Σ Direktsaat (D): 5.0 t/ha</b>																																	

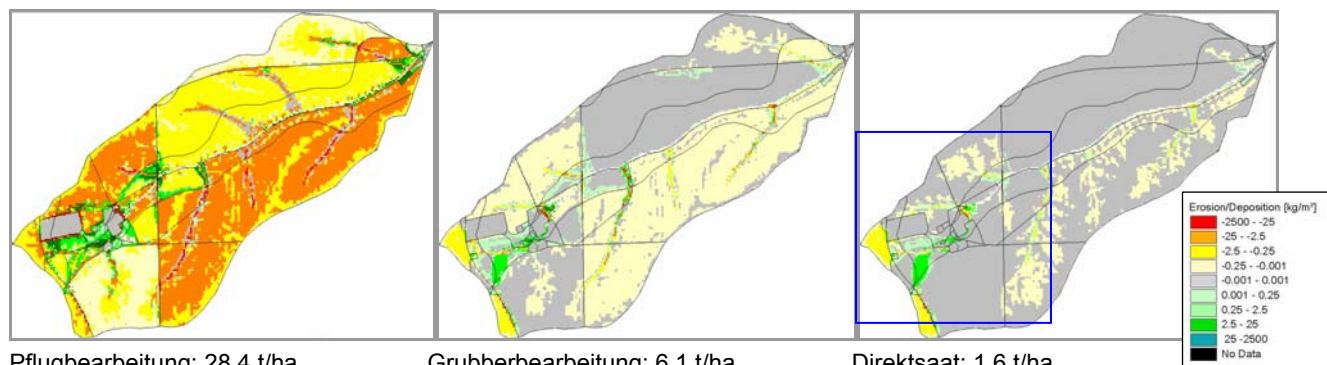
Tabelle 53: Gebietsausträge Rasslitzbach 2041-2050, konservierende Bodenbearbeitung, MAX-Lauf

Jahr	2041 [t/ha]			2042 [t/ha]			2043 [t/ha]			2044 [t/ha]			2045 [t/ha]			2046 [t/ha]			2047 [t/ha]			2048 [t/ha]			2049 [t/ha]			2050 [t/ha]					
Monat	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D			
Jan																															1.5	0.5	0.1
Feb																			0.8	0.0	0.0												
März				0.2			3.6	0.1	0.0	1.4	0.0	0.0				14.0	0.4	0.2							0.3	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0			
April													0.1	0.0	0.0	21.4	1.8	0.6	0.2	0.0	0.0												
Mai																			0.2	0.0	0.0				0.2	0.0	0.0						
Juni				0.1															0.5	0.0	0.0												
Juli	3.6	0.2	0.0							0.5	0.0	0.0										0.2	0.0	0.0									
Aug	41.5	17.4	7.9							2.9	1.5	0.7	5.1	0.8	0.2				0.1	0.0	0.0				1.9	0.8	0.3						
Sep										5.2	1.2	0.0																8.5	1.4	0.0			
Okt																																	
Nov	0.2	0.0	0.0	0.1									1.7	0.3	0.0																		
Dez													0.1	0.0	0.0				1.0	0.6	0.2				5.3	0.7	0.0						
<b>Σ [t/ha]</b>	<b>45.3</b>	<b>17.6</b>	<b>7.9</b>	<b>0.4</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>3.6</b>	<b>0.1</b>	<b>0.0</b>	<b>10.0</b>	<b>2.7</b>	<b>0.7</b>	<b>7.0</b>	<b>1.1</b>	<b>0.2</b>	<b>35.4</b>	<b>2.2</b>	<b>0.8</b>	<b>2.8</b>	<b>0.6</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>7.7</b>	<b>1.5</b>	<b>0.3</b>	<b>10.5</b>	<b>1.9</b>	<b>0.1</b>			
<b>Σ konventionelle Bearbeitung (P): 122.9 t/ha</b>																																	
<b>Σ Grubberbearbeitung (G): 27.7 t/ha</b>																																	
<b>Σ Direktsaat (D): 10.2 t/ha</b>																																	



**Tabelle 54: Gebietsausträge Rasslitzbach 2091-2100, konservierende Bodenbearbeitung, MIN-Lauf; Abbildung 71 bezieht sich auf die Markierung März 2091**

Jahr	2091 [t/ha]			2092 [t/ha]			2093 [t/ha]			2094 [t/ha]			2095 [t/ha]			2096 [t/ha]			2097 [t/ha]			2098 [t/ha]			2099 [t/ha]			2100 [t/ha]		
	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D
Jan										2.3	0.3	0.1				1.3	0.4	0.1												
Feb				4.6	0.5	0.1	6.4	0.7	0.1	0.1	0.0	0.0				0.1	0.0	0.0				0.1	0.0	0.0						
März	28.4	6.1	1.6							7.3	0.3	0.2	2.8	0.0	0.0	11.0	0.2	0.1				0.9	0.0	0.0						
April																16.0	0.3	0.2	4.3	0.1	0.0							13.6	0.5	0.0
Mai	3.7	0.0	0.0				0.1	0.0	0.0							16.1	1.7	0.4				1.3	0.5	0.0				0.2	0.0	0.0
Juni																														
Juli																														
Aug							0.1	0.0	0.0				0.1	0.0	0.0															
Sep							0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0																		
Okt	0.5	0.0	0.0				16.0	2.7	0.4																					
Nov	2.7	0.4	0.0				0.7	0.1	0.0										0.1						10.4	2.1	0.5			
Dez																									0.1	0.0	0.0			
<b>Σ [t/ha]</b>	<b>35.3</b>	<b>6.5</b>	<b>1.6</b>	<b>4.6</b>	<b>0.5</b>	<b>0.1</b>	<b>23.5</b>	<b>3.5</b>	<b>0.5</b>	<b>9.8</b>	<b>0.6</b>	<b>0.3</b>	<b>2.9</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>44.5</b>	<b>2.6</b>	<b>0.8</b>	<b>4.4</b>	<b>0.1</b>	<b>0.0</b>	<b>2.3</b>	<b>0.5</b>	<b>0.0</b>	<b>10.5</b>	<b>2.1</b>	<b>0.5</b>	<b>13.8</b>	<b>0.5</b>	<b>0.0</b>
<b>Σ konventionelle Bearbeitung (P): 151.6 t/ha</b>																														
<b>Σ Grubberbearbeitung (G): 16.9 t/ha</b>																														
<b>Σ Direktsaat (D): 3.8 t/ha</b>																														



**Abbildung 71: Verteilung von Erosion und Deposition: März 2091 (MIN-Lauf), Konventionelle Bodenbearbeitung im Vergleich zur Grubberbearbeitung und Direktsaat**

Abbildung 71 veranschaulicht die Verteilung von Erosion und Deposition bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung nach zwölf Starkniederschlägen im März 2091. Die stark von Erosion betroffenen Schläge im Südwesten des Einzugsgebietes (Polygone 33 und 66) sind als konventionell bearbeitete Sonderkultur (z. B. Erdbeeren, Gemüse) ausgewiesen. Die Verteilung von Erosion und Deposition im Südosten des Einzugsgebietes bei Direktsaat, einschließlich der Direkteinträge in den Oberlauf des Vorfluters, zeigt Abbildung 72 als Ausschnitt aus Abbildung 71. Den Polygonen können die entsprechenden Fruchtarten, aufgeführt in Tabelle 22, direkt zugeordnet werden.

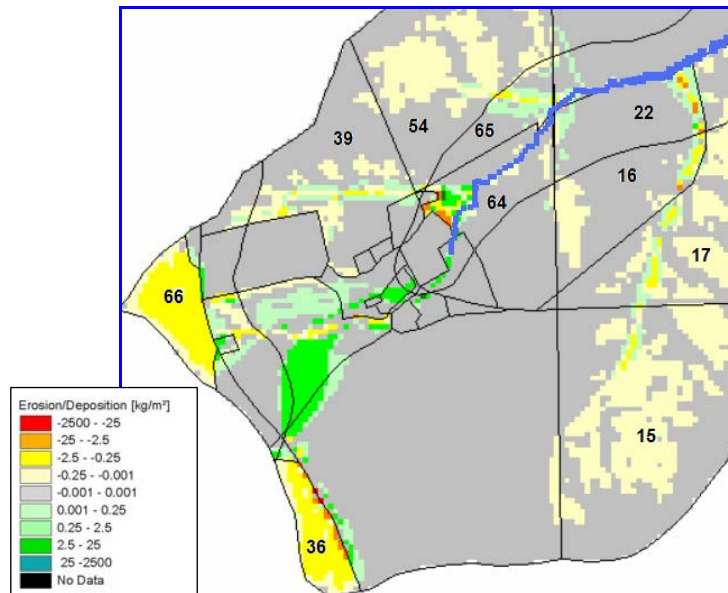


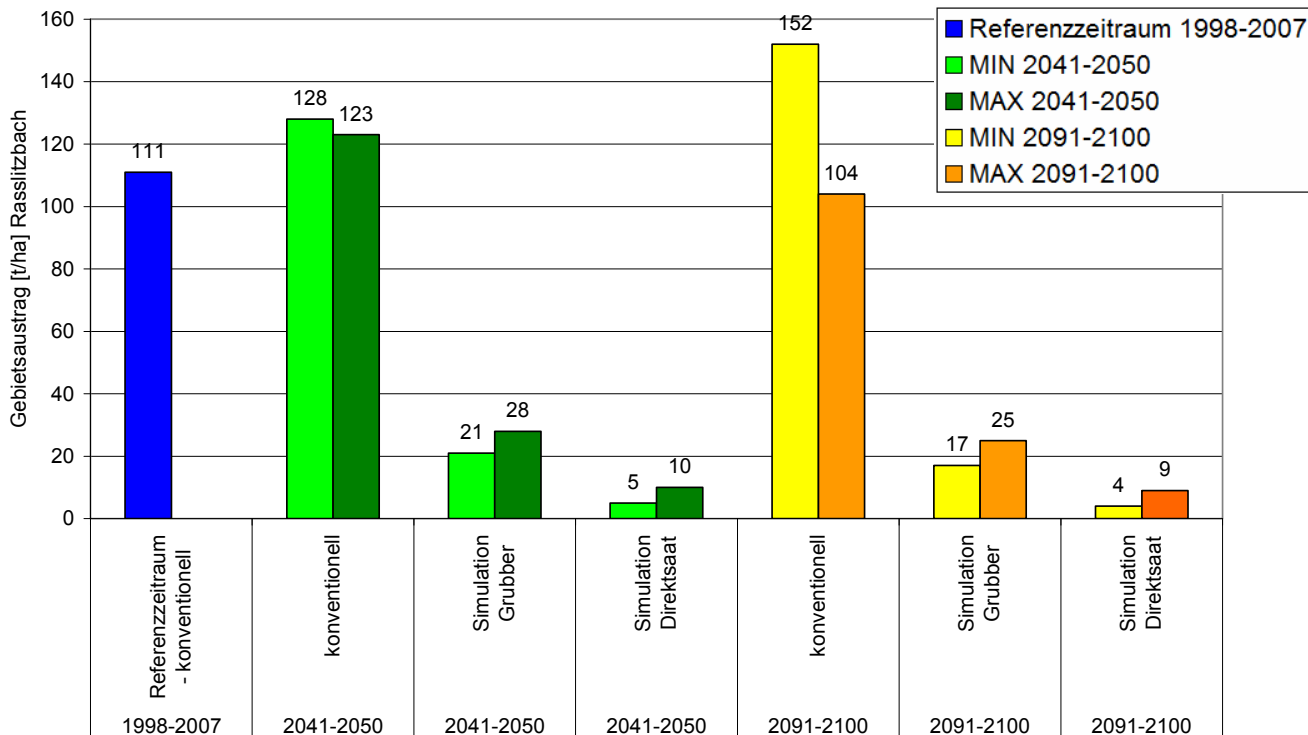
Abbildung 72: Erosion und Deposition im Südwesten des Einzugsgebietes, Ausschnitt aus Abbildung 68, Direktsaat

Tabelle 55: Gebietsausträge Rasslitzbach 2091-2100, konservierende Bodenbearbeitung, MAX-Lauf

Jahr	2091 [t/ha]			2092 [t/ha]			2093 [t/ha]			2094 [t/ha]			2095 [t/ha]			2096 [t/ha]			2097 [t/ha]			2098 [t/ha]			2099 [t/ha]			2100 [t/ha]					
	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D			
Jan	1.5	0.4	0.0	4.1	1.2	0.3																0.1	0.0	0.0									
Feb	0.2	0.0	0.0																						4.7	0.3	0.0	0.5	0.0	0.0			
März										5.8	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0				6.5	0.2	0.0	20.4	3.7	0.8	1.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0			
April				2.2	0.0	0.0	8.1	0.7	0.0	3.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0										0.3	0.0	0.0						
Mai				0.6	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0																					
Juni													0.1	0.0	0.0							1.2	0.1	0.1									
Juli																																	
Aug																																	
Sep							0.1	0.0	0.0							35.5	17.0	7.1							4.9	1.0	0.1						
Okt																																	
Nov																																	
Dez	0.6	0.1	0.0	1.3	0.4	0.1																0.1	0.0	0.0									
<b>Σ [t/ha]</b>	<b>2.3</b>	<b>0.5</b>	<b>0.0</b>	<b>8.2</b>	<b>1.6</b>	<b>0.4</b>	<b>8.9</b>	<b>0.7</b>	<b>0.0</b>	<b>9.0</b>	<b>0.2</b>	<b>0.1</b>	<b>0.4</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>35.5</b>	<b>17.0</b>	<b>7.1</b>	<b>6.5</b>	<b>0.2</b>	<b>0.0</b>	<b>21.8</b>	<b>3.8</b>	<b>0.9</b>	<b>11.0</b>	<b>1.3</b>	<b>0.2</b>	<b>0.8</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>			
<b>Σ konventionelle Bearbeitung (P): 104.4 t/ha</b>																																	
<b>Σ Grubberbearbeitung (G): 25.3 t/ha</b>																																	
<b>Σ Direktsaat (D): 8.6 t/ha</b>																																	

Durch Grubberbearbeitung können die Gebietsausträge um 76-89 % reduziert werden (MIN-Lauf 2041-2050: 84 %, MAX-Lauf 2041-2050: 77 %, MIN-Lauf 2091-2100: 89 %, MAX-Lauf 2091-2100: 76 %).

Bei Direktsaat sind die Austräge erwartungsgemäß noch geringer, sie liegen zwischen 3 und 8 % der bei konventioneller Bearbeitung simulierten Austräge (Reduktion der Gebietsausträge MIN-Lauf 2041-2050: 96 %, MAX-Lauf 2041-2050: 92 %, MIN-Lauf 2091-2100: 97 %, MAX-Lauf 2091-2100: 92 %). Abbildung 73 fasst die Ergebnisse der Simulationsrechnungen „konservierende Bodenbearbeitung“ für das Einzugsgebiet des Rasslitzbaches zusammen.



**Abbildung 73: Gebietsausträge für konservierende Bodenbearbeitung im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung für die Dekaden 2041-2050 und 2091-2100 - Rasslitzbach**

### 3.3.3.3 Einzugsgebiet des Viebigbaches (Klimastation Görlitz)

Die berechneten Gebietsausträge bei konservierender Bodenbearbeitung für das Einzugsgebiet des Viebigbaches (G: Grubber, D: Direktsaat) im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung (P) sind für beide Simulationsläufe (MIN und MAX) und für beide Simulationszeiträume monatsweise in den Tabellen 56 bis 59 eingetragen.

**Tabelle 56: Gebietsausträge Viebigbach 2041-2050, konservierende Bodenbearbeitung, MIN-Lauf**

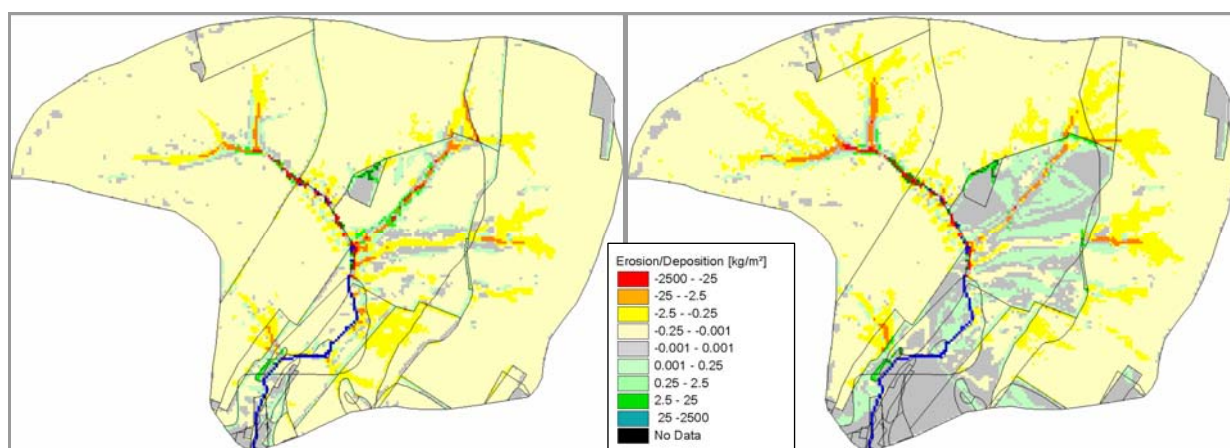
Jahr	2041 [t/ha]			2042 [t/ha]			2043 [t/ha]			2044 [t/ha]			2045 [t/ha]			2046 [t/ha]			2047 [t/ha]			2048 [t/ha]			2049 [t/ha]			2050 [t/ha]		
	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D
Jan																														
Feb																														
März									17.4	8.8	0.0			0.1	0.0	0.0	3.0	0.8	0.1											
April	4.2	0.4	0.0									6.4	0.2	0.0	0.4	0.0	0.0				1.1	0.0	0.0							
Mai																								0.5	0.0	0.0				
Juni																														
Juli																														
Aug									42.3	31.7	16.6																			
Sep									9.5	5.4	2.4																			
Okt	41.0	16.8	13.4	0.4	0.2	0.0																								
Nov				1.5	0.7	0.0																					42.2	16.8	8.8	
Dez												7.0	5.7	1.7													1.1	1.0	0.0	
<b>Σ [t/ha]</b>	45.2	17.2	13.4	1.9	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	69.2	45.9	19.0	13.4	5.9	1.7	0.5	0.0	0.0	22.2	13.0	5.1	1.1	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	43.3	17.8	8.8
<b>Σ konventionelle Bearbeitung (P): 197.3 t/ha</b>																														
<b>Σ Grubberbearbeitung (G): 100.7 t/ha</b>																														
<b>Σ Direktsaat (D): 48.0 t/ha</b>																														

**Tabelle 57: Gebietsausträge Viebigbach 2041-2050, konservierende Bodenbearbeitung, MAX-Lauf**

Jahr	2041 [t/ha]			2042 [t/ha]			2043 [t/ha]			2044 [t/ha]			2045 [t/ha]			2046 [t/ha]			2047 [t/ha]			2048 [t/ha]			2049 [t/ha]			2050 [t/ha]			
	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	
Jan																															
Feb																															
März	10.3	0.9	0.0							0.3	0.0	0.0																			
April				2.7	0.0	0.0																									
Mai										2.1	0.0	0.0				0.2	0.0	0.0													
Juni																			1.2	0.0	0.0										
Juli	0.8	0.0	0.0																												
Aug																			1.4	0.0	0.0										
Sep																															
Okt																															
Nov																															
Dez				2.3	1.0	0.0																									
<b>Σ [t/ha]</b>	<b>11.1</b>	<b>0.9</b>	<b>0.0</b>	<b>5.0</b>	<b>1.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>2.4</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>2.6</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>5.7</b>	<b>2.5</b>	<b>0.4</b>	<b>26.8</b>	<b>12.7</b>	<b>1.1</b>
<b>Σ konventionelle Bearbeitung (P): 53.7 t/ha</b>																															
<b>Σ Grubberbearbeitung (G): 17.1 t/ha</b>																															
<b>Σ Direktsaat (D): 1.5 t/ha</b>																															

Die hohen Gebietsausträge, die im MIN-Lauf im ersten Simulationszeitraum berechnet wurden, sind auch durch konservierende Bodenbearbeitung nicht befriedigend zu reduzieren. Durch Grubberbearbeitung wird eine Minimierung um lediglich 49 % erreicht. Durch Direktsaat gelingt eine Reduktion um 76 %. Ursache ist, dass die extremen Starkregenereignisse im Spätsommer unmittelbar nach der Ernte des Getreides (31. August) und im Spätherbst (Oktober und November) stattfinden. Die Anfangsbo-denfeuchte liegt immer bei Feldkapazität.

Abbildung 74 (links) zeigt die Verteilung von Erosion und Deposition im Einzugsgebiet des Viebigbaches für das Einzelereignis am 27. Oktober 2041 (MIN-Lauf) bei Direktsaat. Es wird deutlich, dass aufgrund dieses Starkniederschlages (42 mm in 45 min, Spitzenintensität 3.6 mm/min) alle unversiegelten Flächen – unabhängig ob Acker oder Grünland – etwa gleichmäßig von Erosion betroffen sind. Im Vergleich dazu ist rechts die Erosionsprognosekarte für das Ereignis am 31. August 2044 (MIN-Lauf), ebenfalls für die Direktsaatvariante, abgebildet. Die Niederschlagssumme beträgt ebenfalls 42 mm, die jedoch bei Spitzenintensitäten von 0.8 mm/min in 170 min fallen. Die Grünlandflächen in der Mitte des Einzugsgebietes sind deutlich als Depositions- und Transportbereiche abgegrenzt, nur in den vereinzelt auftretenden Tiefenlinien findet Erosion statt. Die Gebietsausträge für beide Ereignisse sind nicht miteinander vergleichbar, weil sowohl eine andere Fruchtartenverteilung als auch verschiedene Bodenzustände (Oktober/August) für die Simulationen zugrunde gelegt wurden.



27. Oktober 2041 (MIN-Lauf): 13.3 t/ha (Direktsaat)

31. August 2044 (MIN-Lauf): 16.4 t/ha (Direktsaat)

**Abbildung 74: Erosion und Deposition am 27. Oktober 2041 (MIN-Lauf) und 31. August 2044 (MIN-Lauf)**

Im Abschnitt 3.3.7 wird für das Ereignis am 27. Oktober 2041 (MIN-Lauf) untersucht, ob sich der Austrag durch eine Landnutzungsänderung signifikant minimieren ließe.

**Tabelle 58: Gebietsausträge Viebigbach 2091-2100, konservierende Bodenbearbeitung, MIN-Lauf**

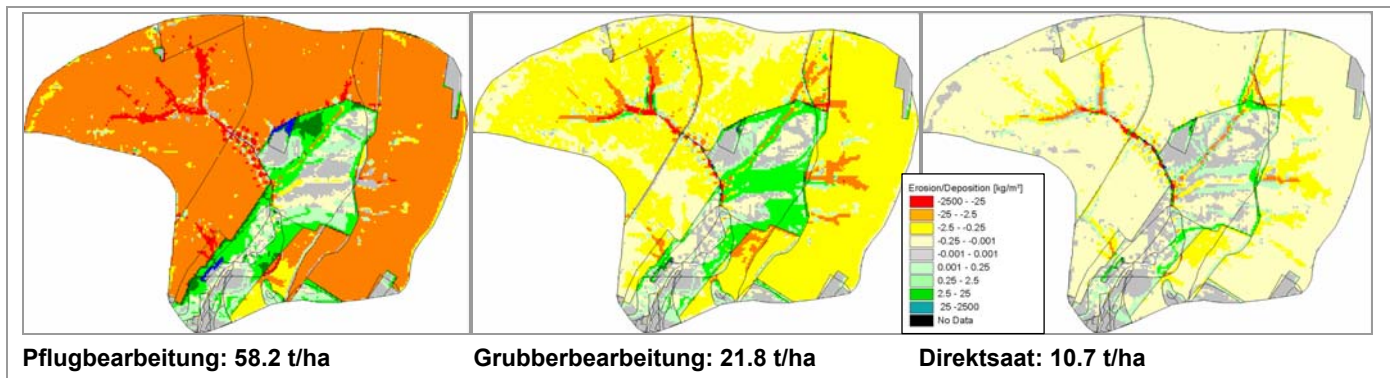
Jahr	2091 [t/ha]			2092 [t/ha]			2093 [t/ha]			2094 [t/ha]			2095 [t/ha]			2096 [t/ha]			2097 [t/ha]			2098 [t/ha]			2099 [t/ha]			2100 [t/ha]					
	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D			
Jan																																	
Feb										0.2	0.0	0.0																					
März										0.1	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0												2.5	0.2	0.0				
April															3.5	0.0	0.0								3.4	0.0	0.0						
Mai																																	
Juni															1.1	0.0	0.0																
Juli																																	
Aug																																	
Sep																																	
Okt																																	
Nov				1.6	0.9	0.0																											
Dez																																	
<b>Σ [t/ha]</b>	0.0	0.0	0.0	1.6	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	0.0	0.0	2.5	0.2	0.0
<b>Σ konventionelle Bearbeitung (P): 13.4 t/ha</b>																																	
<b>Σ Grubberbearbeitung (G): 1.1 t/ha</b>																																	
<b>Σ Direktsaat (D): 0.0 t/ha</b>																																	

**Tabelle 59: Gebietsausträge Viebigbach 2091-2100, konservierende Bodenbearbeitung, MAX-Lauf; Abbildung 75 bezieht sich auf die Markierung März 2098**

Jahr	2091 [t/ha]			2092 [t/ha]			2093 [t/ha]			2094 [t/ha]			2095 [t/ha]			2096 [t/ha]			2097 [t/ha]			2098 [t/ha]			2099 [t/ha]			2100 [t/ha]			
	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	P	G	D	
Jan																															
Feb													0.2	0.0	0.0																
März	0.1	0.0	0.0										1.8	0.0	0.0							58.2	21.8	10.7							
April																															
Mai													1.5	0.0	0.0																
Juni																															
Juli																															
Aug																															
Sep																															
Okt																															
Nov																													5.5	4.8	1.1
Dez																													0.7	0.5	0.0
<b>Σ [t/ha]</b>	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	1.7	0.3	58.2	21.8	10.7	0.0	0.0	0.0	6.2	5.3	1.1	
<b>Σ konventionelle Bearbeitung (P): 69.8 t/ha</b>																															
<b>Σ Grubberbearbeitung (G): 28.8 t/ha</b>																															
<b>Σ Direktsaat (D): 12.1 t/ha</b>																															

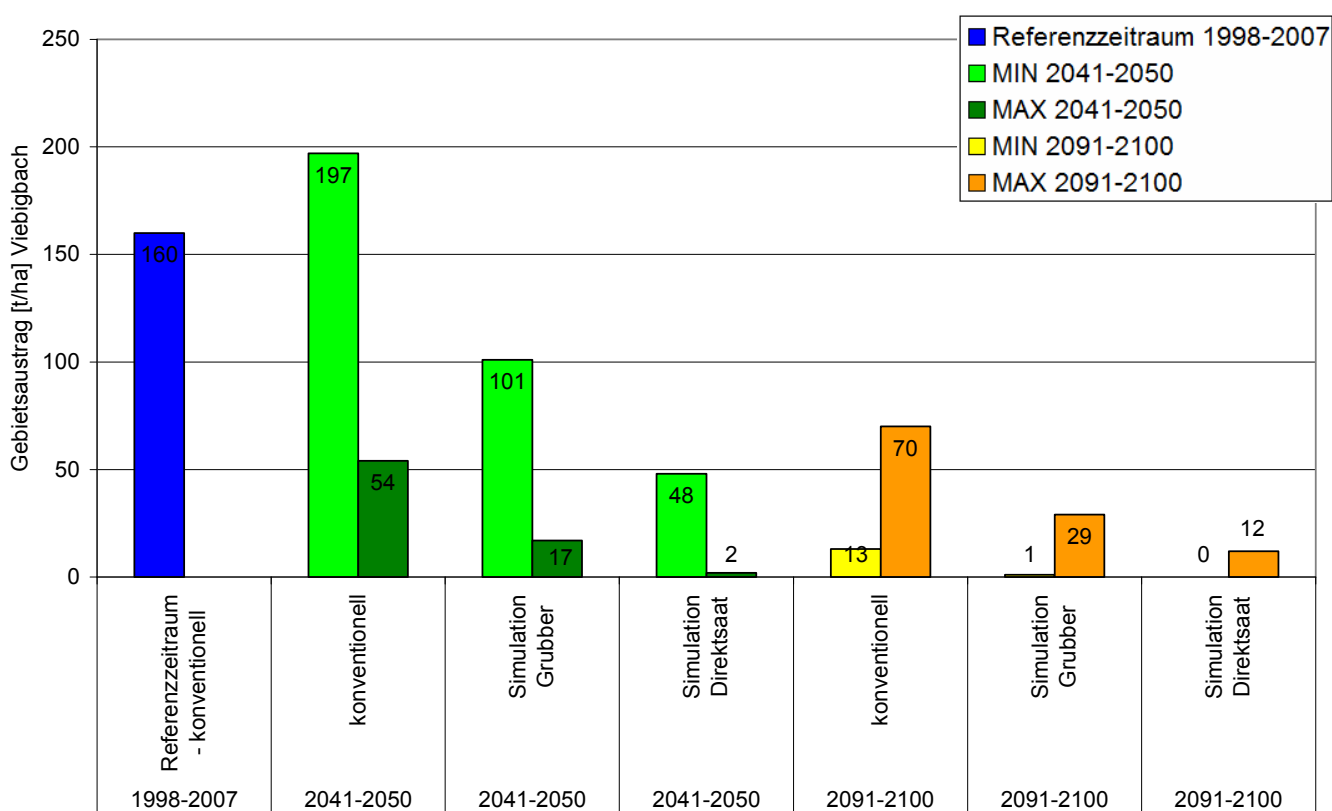
Im zweiten Simulationszeitraum wird durch Grubberbearbeitung eine Abnahme der Gebietsausträge um 92 % (MIN-Lauf) bzw. 59 % (MAX-Lauf) simuliert. Bei Direktsaat liegt die Reduzierung bei 100 % (MIN-Lauf) bzw. 83 % (MAX-Lauf).

Abbildung 75 veranschaulicht die Verteilung von Erosion und Deposition bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung nach den Starkniederschlägen, die auf März 2098 datiert sind. Sechs Starkniederschläge mit Spitzenintensitäten >2.0 mm/min fallen vom 05. bis 12. März, die Bodenfeuchte liegt bei Feldkapazität. Alle Ackerflächen sind unabhängig von der Fruchtart von Erosion betroffen. Die Grünlandbereiche sind scharf als Depositionsflächen abgegrenzt: Gelangt der mit Sediment beladene Oberflächenabfluss in die tiefer gelegenen Grünlandbereiche, die u. a. eine höhere Rauigkeit aufweisen, wird Material abgelagert.



**Abbildung 75: Verteilung von Erosion und Deposition: März 2098 (MAX-Lauf), Konventionelle Bodenbearbeitung im Vergleich zur Grubberbearbeitung und Direktsaat**

Abbildung 76 fasst die Ergebnisse der Simulationsrechnungen „konservierende Bodenbearbeitung“ für das Einzugsgebiet des Viebigbaches zusammen.



**Abbildung 76: Gebietsausträge für konservierende Bodenbearbeitung im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung für die Dekaden 2041-2050 und 2091-2100 - Viebigbach**

### 3.3.4 Gebietsausträge Zukunftsszenario „Veränderter Gehalt an organischem Kohlenstoff“ 2041-2050 und 2091-2100, Läufe MIN und MAX

#### 3.3.4.1 Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches (Klimastation Chemnitz)

Die Tabellen 60 bis 63 listen die Gebietsausträge für das Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches auf, die für das Szenario „veränderter Gehalt an organischem Kohlenstoff“ berechnet wurden. In den Monaten Januar, Februar und Dezember wurden in keiner Dekade Gebietsausträge simuliert.

**Tabelle 60: Gebietsausträge Dittersdorfer Bach, veränderter Corg-Gehalt -0.1 %, 2041-2050, MIN-Lauf**

Jahr	Monat	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
		[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]
März		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
April		0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
Mai		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
Juni		4.0	0.3	0.1	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0
Juli		0.2	0.0	0.1	0.4	0.3	0.6	0.0	0.0	0.3	1.0
August		2.5	0.0	1.4	0.9	7.0	0.9	0.9	4.0	0.9	2.3
September		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	2.5	9.2
Oktober		0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November		0.0	9.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>		<b>6.7</b>	<b>10.2</b>	<b>1.6</b>	<b>1.3</b>	<b>13.4</b>	<b>1.7</b>	<b>2.0</b>	<b>4.0</b>	<b>5.1</b>	<b>12.6</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>		<b>58.6 t/ha</b>									
Das entspricht einer Erhöhung von 1.7 % gegenüber dem Szenario ohne Erhöhung des Corg-Gehaltes.											

Tabelle 61: Gebietsausträge Dittersdorfer Bach, veränderter Corg-Gehalt -0.1 %, 2041-2050, MAX-Lauf

Jahr	Monat	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
		[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]
März		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
April		0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.1
Mai		0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0
Juni		5.0	0.9	0.0	0.2	0.0	0.0	9.7	0.3	0.1	0.0
Juli		0.9	4.0	0.1	0.2	0.2	2.8	0.2	5.2	0.2	1.3
August		0.5	0.9	12.6	1.6	0.1	1.7	0.0	3.3	10.3	4.1
September		0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.6	0.3
Oktober		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>		<b>6.6</b>	<b>6.0</b>	<b>12.7</b>	<b>2.5</b>	<b>0.3</b>	<b>5.0</b>	<b>9.9</b>	<b>8.8</b>	<b>14.8</b>	<b>5.8</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>		<b>72.5 t/ha</b>									
Das entspricht einer Erhöhung von 2.1 % gegenüber dem Szenario ohne Erhöhung des Corg-Gehaltes.											

Tabelle 62: Gebietsausträge Dittersdorfer Bach, veränderter Corg.-Gehalt -0.2 %, 2091-2100, MIN-Lauf

Jahr	Monat	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100
		[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]
März		0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
April		0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0
Mai		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Juni		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Juli		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
August		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
September		0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	5.5	0.0	0.2	0.7	0.9
Oktober		0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November		0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>		<b>0.7</b>	<b>0.0</b>	<b>0.3</b>	<b>2.4</b>	<b>5.0</b>	<b>6.0</b>	<b>0.0</b>	<b>1.4</b>	<b>0.7</b>	<b>0.9</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>		<b>17.4 t/ha</b>									
Das entspricht einer Erhöhung von 8.8 % gegenüber dem Szenario ohne Erhöhung des Corg-Gehaltes.											

Tabelle 63: Gebietsausträge Dittersdorfer Bach, veränderter Corg-Gehalt -0.2 %, 2091-2100, MAX-Lauf

Jahr \ Monat	2091 [t/ha]	2092 [t/ha]	2093 [t/ha]	2094 [t/ha]	2095 [t/ha]	2096 [t/ha]	2097 [t/ha]	2098 [t/ha]	2099 [t/ha]	2100 [t/ha]
März	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0
April	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4
Mai	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Juni	0.0	0.0	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
Juli	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.2
August	0.0	0.1	0.3	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	1.0	0.0
September	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.6	1.4	0.2	0.0	0.0
Oktober	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1.6	0.0
November	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>	0.0	0.1	13.3	0.0	0.0	0.8	1.6	1.7	4.5	0.6
<b>Gesamtaustrag: 22.6 t/ha</b>										
Das entspricht einer Erhöhung von 5.1 % gegenüber dem Szenario ohne Erhöhung des Corg-Gehaltes.										

Erwartungsgemäß erhöhen sich die simulierten Gebietsausträge, wenn der Gehalt an organischem Kohlenstoff abnimmt. Der Anstieg des Austrages bei Verringerung des organischen Kohlenstoffs um 0.1 % beträgt im ersten Simulationszeitraum nur etwa 2 %, im zweiten Simulationszeitraum bei einer Reduzierung des Corg-Gehaltes um 0.2 % circa 5 bis 9 % (Abbildung 77). Die Tabellen 60 bis 63 stehen im direkten Vergleich zu Tabelle 36 bis Tabelle 39. Abbildung 77 fasst die Ergebnisse für das Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach zusammen.

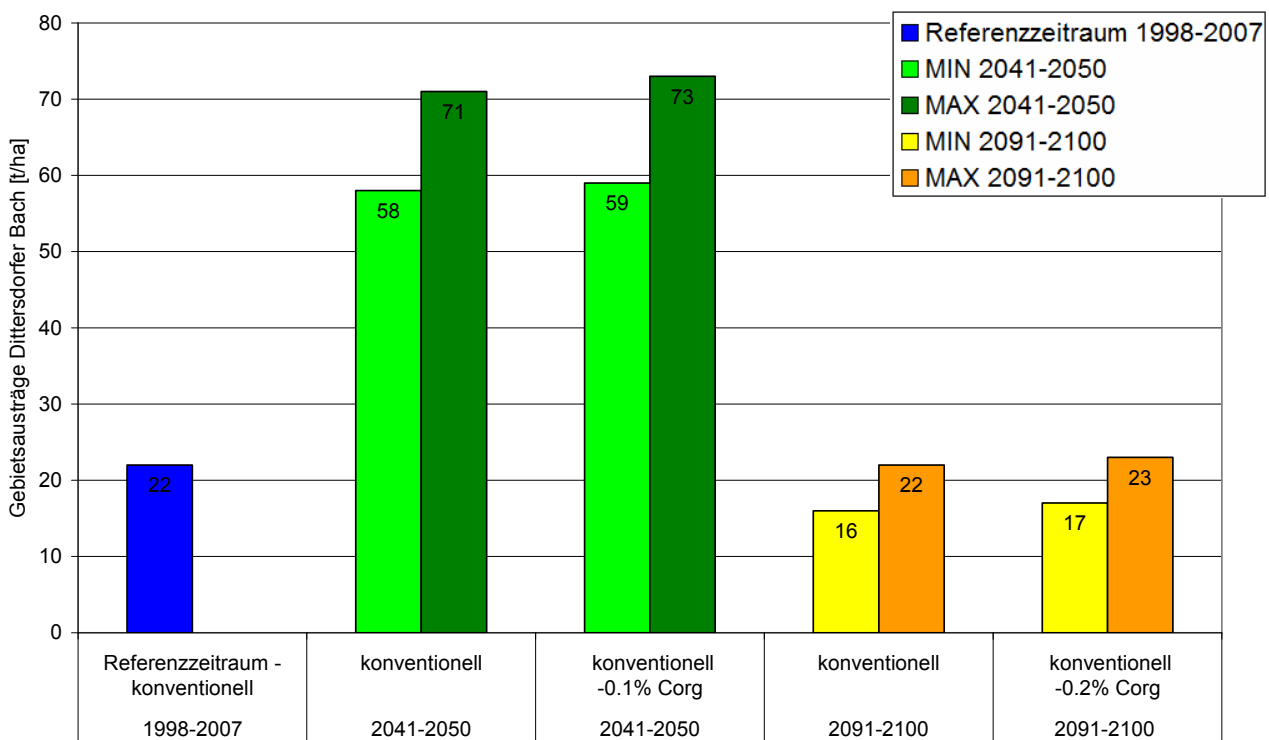


Abbildung 77: Auswirkungen veränderter Gehalte an organischem Kohlenstoff auf den Gebietsaustrag – Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches



### 3.3.4.2 Einzugsgebiet des Rasslitzbaches (Klimastation Oschatz)

Die Tabellen 64 bis 67 enthalten die simulierten Gebietsausträge für das Einzugsgebiet des Rasslitzbaches für das Szenario „veränderter Gehalt an organischem Kohlenstoff“.

**Tabelle 64: Gebietsausträge Rasslitzbach, veränderter Corg-Gehalt -0.1 %, 2041-2050, MIN-Lauf**

Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.9	0.0
März	7.0	13.7	1.2	0.0	0.0	0.0	27.0	0.0	5.1	0.0
April	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.5	0.0	5.2	0.0	0.1
Mai	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Juni	5.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Juli	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.5	0.3	0.0	0.0
August	0.0	0.0	0.9	2.0	0.0	0.0	0.0	5.1	0.3	0.1
September	17.2	0.0	6.0	0.0	1.7	0.0	0.0	16.6	0.0	0.0
Oktober	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
November	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.7	0.0	0.0
Dezember	0.0	0.0	4.7	0.0	0.0	3.2	0.4	0.0	0.0	2.4
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>	<b>30.7</b>	<b>14.1</b>	<b>13.0</b>	<b>2.0</b>	<b>1.8</b>	<b>3.8</b>	<b>28.7</b>	<b>29.3</b>	<b>6.3</b>	<b>2.6</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>						<b>132.3 t/ha</b>				
<b>Das entspricht einer Erhöhung von 3.1 % gegenüber dem Szenario ohne Erhöhung des Corg-Gehaltes.</b>										

**Tabelle 65: Gebietsausträge Rasslitzbach, veränderter Corg-Gehalt -0.1 %, 2041-2050, MAX-Lauf**

Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0
März	0.0	0.2	3.7	1.8	0.0	14.3	0.0	0.0	0.3	0.5
April	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	21.4	0.3	0.0	0.0	0.1
Mai	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
Juni	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0
Juli	3.9	0.1	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0
August	42.9	0.0	0.0	3.0	5.1	0.0	0.2	0.0	1.9	0.0
September	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.8
Oktober	0.0	0.0	0.0	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November	0.2	0.1	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	1.2	0.0	5.3	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>	<b>47.0</b>	<b>0.5</b>	<b>3.9</b>	<b>10.5</b>	<b>7.0</b>	<b>35.7</b>	<b>3.3</b>	<b>0.3</b>	<b>7.7</b>	<b>11.2</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>						<b>127.1 t/ha</b>				
<b>Das entspricht einer Erhöhung von 3.4 % gegenüber dem Szenario ohne Erhöhung des Corg-Gehaltes.</b>										

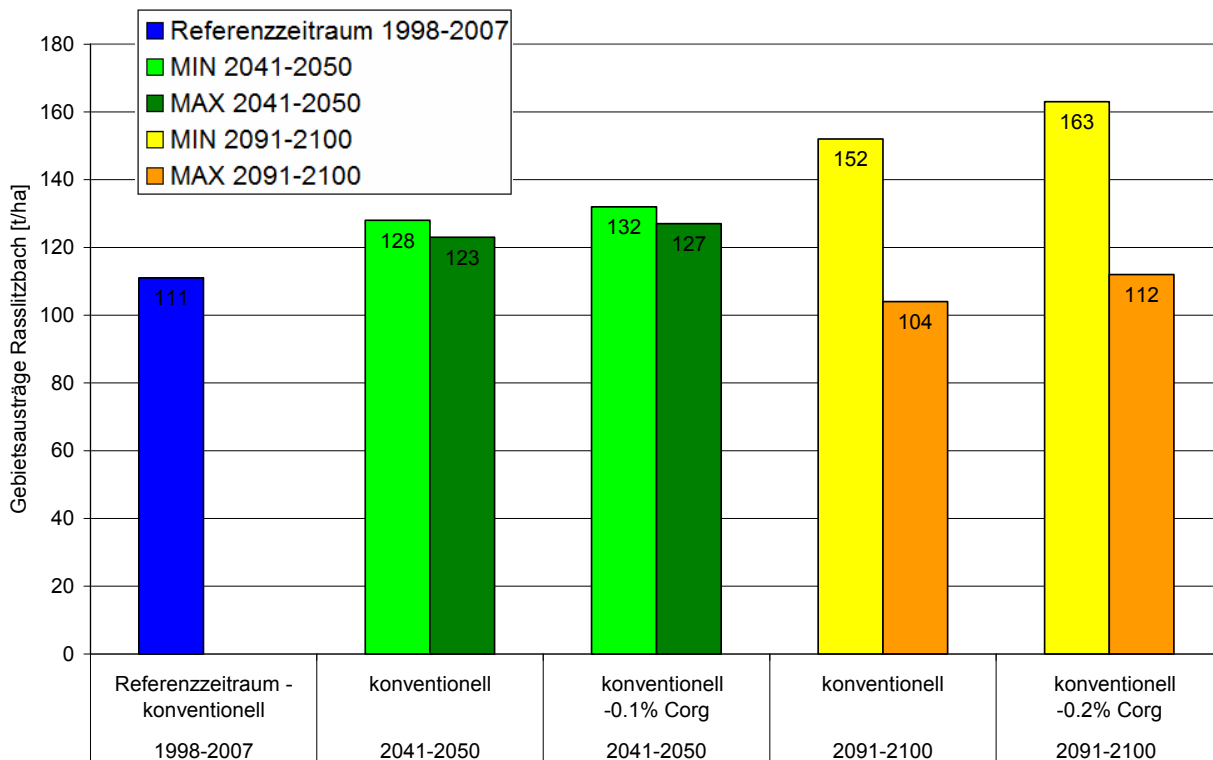
**Tabelle 66: Gebietsausträge Rasslitzbach, veränderter Corg-Gehalt -0.2 %, 2091-2100, MIN-Lauf**

Jahr \ Monat	2091 [t/ha]	2092 [t/ha]	2093 [t/ha]	2094 [t/ha]	2095 [t/ha]	2096 [t/ha]	2097 [t/ha]	2098 [t/ha]	2099 [t/ha]	2100 [t/ha]
Januar	0.0	0.0	0.0	2.7	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Februar	0.0	4.9	6.8	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
März	29.8	0.0	0.0	7.7	3.2	11.5	0.0	1.3	0.0	0.0
April	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	17.1	4.7	0.0	0.0	14.3
Mai	4.5	0.0	0.2	0.0	0.0	16.6	0.0	1.6	0.0	0.3
Juni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Juli	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
August	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
September	0.0	0.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oktober	0.6	0.0	16.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November	2.7	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	11.3	0.0
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>	<b>37.6</b>	<b>4.9</b>	<b>25.1</b>	<b>10.8</b>	<b>3.3</b>	<b>46.9</b>	<b>4.9</b>	<b>3.0</b>	<b>11.4</b>	<b>14.6</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>						<b>162.5 t/ha</b>				
Das entspricht einer Erhöhung von 7.0 % gegenüber dem Szenario ohne Erhöhung des Corg-Gehaltes.										

**Tabelle 67: Gebietsausträge Rasslitzbach, veränderter Corg-Gehalt -0.2 %, 2091-2100, MAX-Lauf**

Jahr \ Monat	2091 [t/ha]	2092 [t/ha]	2093 [t/ha]	2094 [t/ha]	2095 [t/ha]	2096 [t/ha]	2097 [t/ha]	2098 [t/ha]	2099 [t/ha]	2100 [t/ha]
Januar	1.7	4.5	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.5
März	0.5	0.0	0.0	6.1	0.4	0.0	7.0	21.2	1.4	0.4
April	0.0	2.3	8.8	3.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0
Mai	0.0	0.8	0.9	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Juni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0
Juli	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
August	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
September	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	36.7	0.0	0.0	5.4	0.0
Oktober	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
Dezember	0.6	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>	<b>2.8</b>	<b>8.9</b>	<b>9.8</b>	<b>9.3</b>	<b>0.9</b>	<b>36.7</b>	<b>7.0</b>	<b>23.2</b>	<b>12.3</b>	<b>0.9</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>						<b>111.8 t/ha</b>				
Das entspricht einer Erhöhung von 7.1% gegenüber dem Szenario ohne Erhöhung des Corg-Gehaltes.										

Verringert sich der Gehalt an organischem Kohlenstoff bis zum Jahre 2050 um 0.1 %, dann erhöht sich der Gebietsaustrag zusätzlich um 3 bis 4 %. Wird eine Reduzierung des Corg-Gehaltes um 0.2 % für den zweiten Simulationszeitraum angenommen, dann ist mit einer Erhöhung des Gebietsaustrages um etwa 7 % zu rechnen. Abbildung 78 fasst die Ergebnisse der Simulationsrechnungen „veränderter Gehalt an organischem Kohlenstoff“ im Vergleich zum Referenzzeitraum zusammen.



**Abbildung 78: Auswirkungen veränderter Gehalte an organischem Kohlenstoff auf den Gebietsaustrag – Einzugsgebiet des Rasslitzbaches**

### 3.3.4.3 Einzugsgebiet des Viebigbaches (Klimastation Görlitz)

Die simulierten Gebietsausträge für das Einzugsgebiet des Viebigbaches für das Szenario „veränderter Gehalt an organischem Kohlenstoff“ wurden in den Tabellen 68 bis 71 zusammengestellt.

Infolge der geringeren Gehalte an organischem Kohlenstoff um 0.1 bzw. 0.2 % wurden um etwa 2-3 % erhöhte Gebietsausträge bis zum Jahre 2050 berechnet. Im zweiten Simulationszeitraum erhöhen sich die Gebietsausträge um 3-13 %. Die Tabellen 68 bis 71 können direkt mit Tabelle 44 bis Tabelle 47 verglichen werden.

**Tabelle 68: Gebietsausträge Viebigbach, veränderter Corg-Gehalt -0.1 %, 2041-2050, MIN-Lauf**

Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
März	0.0	0.0	0.0	17.5	0.0	0.1	3.1	0.0	0.0	0.0
April	4.3	0.0	0.0	0.0	6.6	0.5	0.0	1.2	0.0	0.0
Mai	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0
Juni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Juli	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
August	0.0	0.0	0.0	42.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
September	0.0	0.0	0.0	9.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oktober	41.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	19.6	0.0	0.0	43.4
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>	<b>45.8</b>	<b>1.9</b>	<b>0.0</b>	<b>69.6</b>	<b>13.6</b>	<b>0.6</b>	<b>22.7</b>	<b>1.2</b>	<b>0.6</b>	<b>44.5</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>	<b>200.5 t/ha</b>									
Das entspricht einer Erhöhung von 1.6 % gegenüber dem Szenario ohne Erhöhung des Corg-Gehaltes.										

**Tabelle 69: Gebietsausträge Viebigbach, veränderter Corg-Gehalt -0.1%, 2041-2050, MAX-Lauf**

Jahr	Monat	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
		[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]
Januar		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Februar		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.7	0.0
März		10.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	27.2
April		0.0	2.8	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mai		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Juni		0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0
Juli		0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
August		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.1	0.0
September		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oktober		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dezember		0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>		<b>11.5</b>	<b>5.1</b>	<b>0.0</b>	<b>2.7</b>	<b>0.0</b>	<b>0.3</b>	<b>2.9</b>	<b>0.0</b>	<b>5.9</b>	<b>27.2</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>		<b>55.6 t/ha</b>									
Das entspricht einer Erhöhung von 3.5 % gegenüber dem Szenario ohne Erhöhung des Corg-Gehaltes.											

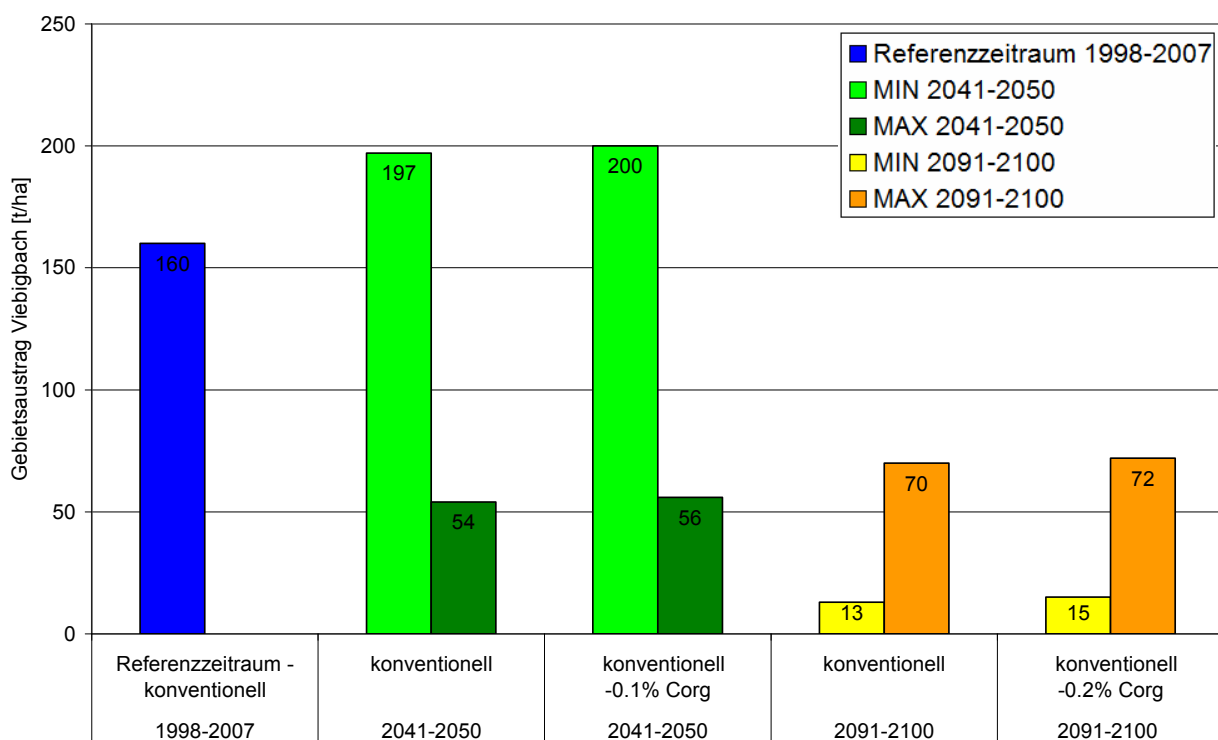
Tabelle 70: Gebietsausträge Viebigbach, veränderter Corg.-Gehalt -0.2 %, 2091-2100, MIN-Lauf

Jahr	Monat	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100
		[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]
Januar		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Februar		0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
März		0.0	0.0	0.0	0.2	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7
April		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	3.6	0.0
Mai		0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Juni		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Juli		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
August		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
September		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oktober		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November		0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dezember		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>		<b>0.0</b>	<b>1.8</b>	<b>0.0</b>	<b>0.5</b>	<b>1.1</b>	<b>5.6</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>3.6</b>	<b>2.7</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>		<b>15.3 t/ha</b>									
Das entspricht einer Erhöhung von 14.1 % gegenüber dem Szenario ohne Erhöhung des Corg-Gehaltes.											

Tabelle 71: Gebietsausträge Viebigbach, veränderter Corg.-Gehalt -0.2 %, 2091-2100, MAX-Lauf

Jahr	Monat	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100
		[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]
Januar		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Februar		0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
März		0.1	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	59.4	0.0	0.0
April		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mai		0.1	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Juni		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Juli		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
August		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
September		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oktober		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	5.7
Dezember		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>		<b>0.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>4.0</b>	<b>0.0</b>	<b>2.0</b>	<b>59.4</b>	<b>0.0</b>	<b>6.4</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>		<b>72.0 t/ha</b>									
Das entspricht einer Erhöhung von 3.1 % gegenüber dem Szenario ohne Erhöhung des Corg-Gehaltes.											

Abbildung 79 stellt die Ergebnisse der Simulationsrechnungen „veränderter Gehalt an organischem Kohlenstoff“ im Vergleich zum Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet des Viebigbaches dar.



**Abbildung 79: Auswirkungen veränderter Gehalte an organischem Kohlenstoff auf den Gebietsaustrag – Einzugsgebiet des Viebigbaches**

### 3.3.5 Gebietsausträge Zukunftsszenario „Veränderte Phänologie“

Zur Untersuchung der Auswirkungen einer veränderten Phänologie auf den Bodenaustrag durch Wasser soll, wie in Abschnitt 2.3.3 diskutiert, der Einfluss verfrühter Erntetermine beispielhaft betrachtet werden. Dieses Thema ist von Interesse, wenn damit die Ernte, die zumeist eine radikale Veränderung von Bodenbedeckung und Bodenstruktur zur Folge hat, in eine Zeit mit einer höheren Starkregenaktivität rückt.

Die Auswertung der simulierten Starkniederschläge hat zwar ergeben, dass die relative Starkregenhäufigkeit in den Monaten Mai bis September ab- und in den Monaten Februar bis April und Oktober bis Dezember zunimmt (Abschnitt 3.1), jedoch bleibt die absolute Starkregenhäufigkeit in den Erntemonaten Juli, August und September auch zukünftig hoch.

Ausgangspunkt für die bisher durchgeführten Simulationen sind die Erntetermine nach PÖHLER et al. (2007). Mit Ausnahme von Winterraps werden sich die Erntetermine deutlich verfrühen. Die spätere Ernte des Winterrapses geht mit der Zielsetzung einher, den Ölertrag zu erhöhen. Das Rapsöl bildet sich erst in der Reifephase, wobei aus den Assimilaten der Schoten Triglyceride gebildet werden. Der Ertrag ist am höchsten, wenn auch die unteren, beschatteten Schoten voll ausgereift und trocken sind. Nach ESTRELLA (2007) lassen sich die veränderten Erntetermine für die einzelnen Feldfrüchte für die beiden Simulationszeiträume ableiten (siehe Tabelle 14, neu zusammengestellt in

Tabelle 72).

**Tabelle 72: Veränderte Erntetermine für die Hauptfruchtarten in den 3 Referenzeinzugsgebieten nach PÖHLER et al. (2007) und ESTRELLA et al. (2007)**

Fruchtart	Erntetermin Referenzzeitraum (PÖHLER et al. 2007)	Erntetermin 2041-2050 (nach Estrella 2007)	+/- [d]	Erntetermin 2091-2100 (nach ESTRELLA 2007)	+/- [d]
Winterweizen	09.08.	31.07.	-9	20.07.	-20
Wintergerste	15.07.	10.07.	-5	04.07.	-11
Winterraps	28.07.	10.08.	+13	27.08.	+30
Sommergerste	10.08.	31.07.	-10	20.07.	-21
Mais	20.09.	07.09.	-13	21.08.	-30
Zuckerrüben	10.10.	08.10.	-2	05.10.	-5

Um den Einfluss der veränderten Erntetermine zu untersuchen, wurde wie folgt vorgegangen:

Zunächst wurden alle Monate im Erntezeitraum Juli bis Oktober markiert, in denen die simulierten Gebietsausträge mehr als 5.0 t/ha betragen. Im nächsten Schritt war festzustellen, auf welche Tage die Starkniederschläge im betroffenen Monat datiert sind. Im Abgleich mit der jeweils aktuellen Fruchtartenverteilung (Tabellen 20 bis 22) wurde geprüft, ob die Starkniederschläge, die ursprünglich vor der Ernte auftraten, nach der Verschiebung des Erntetermins nun nach der Ernte fallen. Diese Bedingungen trafen in allen drei Referenzeinzugsgebieten und beiden Simulationszeiträumen auf insgesamt nur vier Zeitabschnitte zu (Dittersdorfer Bach: August 2043 [MAX-Lauf], Rasslitzbach: September 2041 [MIN-Lauf], September 2043 [MIN-Lauf], September 2050 [MAX-Lauf]).

Für zwei Zeitabschnitte wurden die Auswirkungen eines veränderten Erntetermins auf den Bodenabtrag unter zukünftigen Klimabedingungen bei konventioneller Bodenbearbeitung untersucht:

- Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach (Chemnitz): August 2043 (MAX-Lauf)
- Einzugsgebiet Rasslitzbach (Oschatz): September 2043 (MIN-Lauf)

Den Schlägen mit Fruchtarten, die zum Zeitpunkt des Starkregens nach

Tabelle 72 schon geerntet waren, wurden neue Bodenparameter zugewiesen. Es wurden zwei Varianten simuliert: In der ersten Variante wurden Stoppeln (wie bei den bisherigen Simulationsrechnungen) nach der verfrühten Ernte bis zur Neueinsaat der nachfolgenden Frucht belassen, in der zweiten Variante wurde angenommen, dass bis zur Neueinsaat eine feinkrümelige Brachfläche hergestellt wurde.

### Beispiel 1: Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches: August 2043 (MAX-Lauf)

Für das Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches wurde für August 2043 (MAX-Lauf) ein Gebietsaustrag von 12.2 t/ha simuliert. Diese Erosionssimulation wurde unter der Annahme durchgeführt, dass der Winterweizen am 09. August geerntet und nach der Ernte Stoppeln auf dem Feld belassen wurden. Infolge des Klimawandels wird der mittlere Erntetermin für Winterweizen auf den 31. Juli vorverlegt, der von Winterraps verschiebt sich vom 28. Juli auf den 10. August (siehe Tabelle 73). Die Starkniederschläge für August 2043 (MAX-Lauf) werden auf den 1., 2., 3., 11., 12., 13., 16., 21., 24. und 31. August datiert. Wird nun die Verschiebung der Erntetermine berücksichtigt, müssen die Schläge, denen im Jahre 2043 die Fruchtarten Winterweizen und Winterraps zugewiesen sind (siehe Tabelle 20, Flächen-ID 7, 10, 28, 34, 39, 45, 58) zur Beschreibung des jeweiligen Bodenzustandes zum Zeitpunkt der Starkniederschläge am 1., 2. und 3. August neu parametrisiert werden. Zum einen wird angenommen, dass Stoppeln auf den Schlägen belassen werden (Abbildung 80), zum anderen wird simuliert, dass die Schläge vollständig bräunert und feinkrümelige Brachflächen hinterlassen werden (Abbildung 81). Es wurden entsprechende Vergleichssimulationen mit und ohne Verschiebung der Erntetermine durchgeführt.

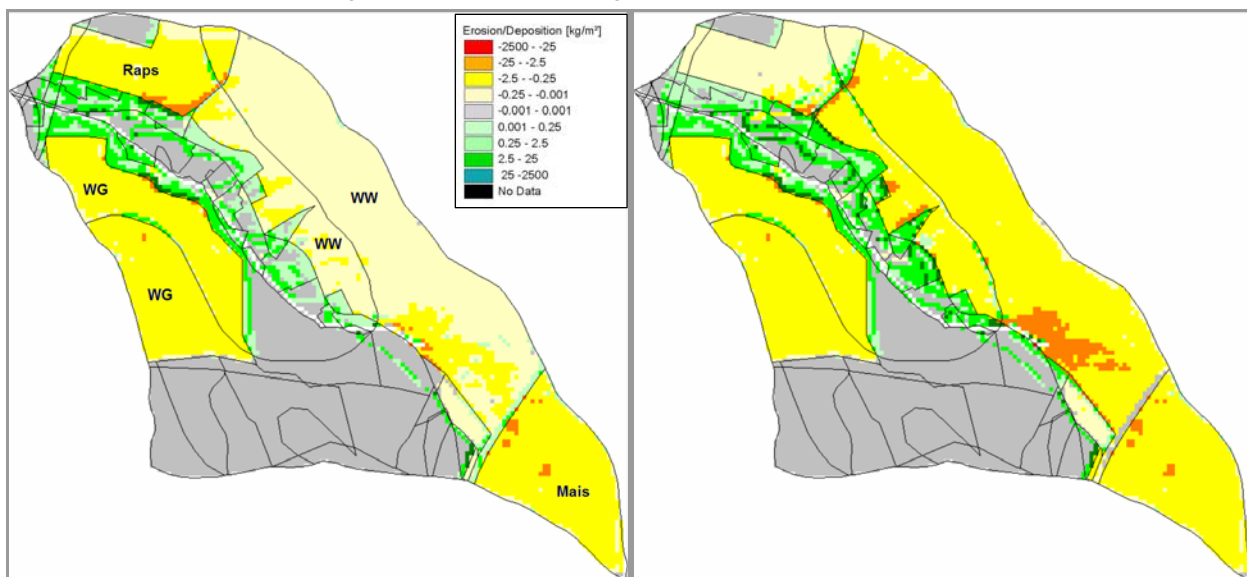
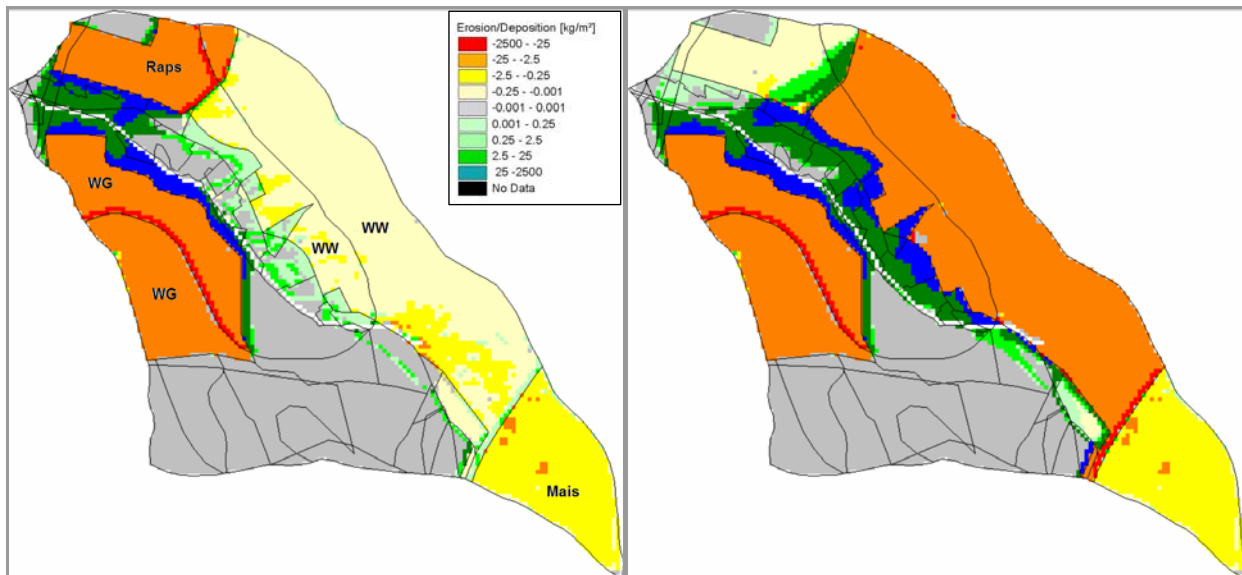


Abbildung 80: Erosion und Deposition vom 01.-03. August 2043 (MAX-Lauf), Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach: links: ohne Verschiebung der Erntetermine, Stoppeln – Austrag 2.4 t/ha; rechts: mit Verschiebung der Erntetermine bis 2050, Stoppeln – Austrag 4.1 t/ha





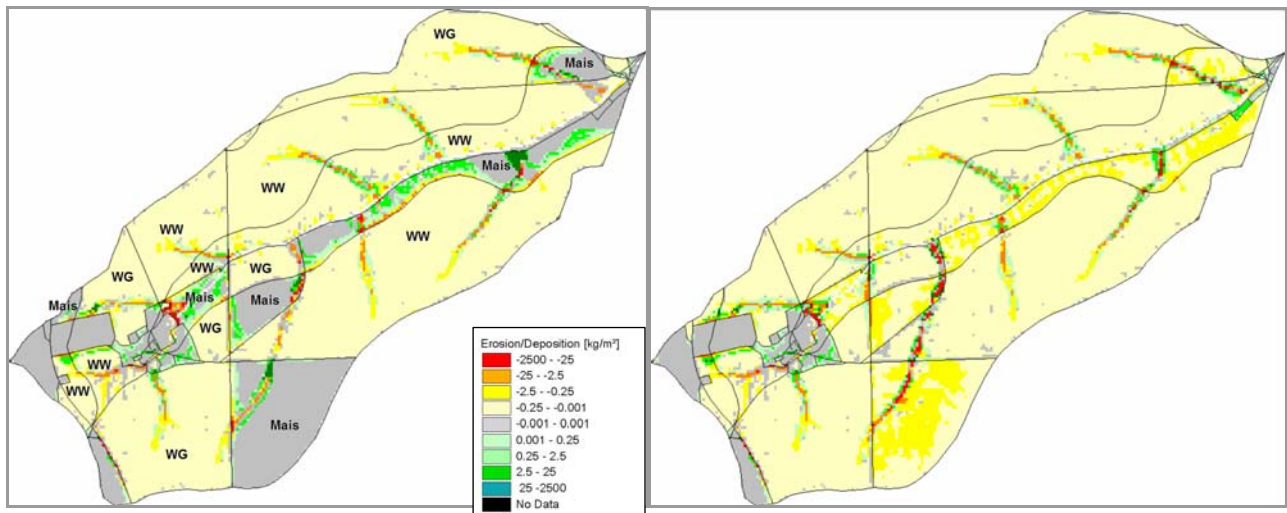
**Abbildung 81: Erosion und Deposition vom 01.-03. August 2043 (MAX-Lauf), Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach: links: ohne Verschiebung der Erntetermine, Brache – Austrag 9.0 t/ha; rechts: mit Verschiebung der Erntetermine bis 2050, Brache – Austrag 28.6 t/ha**

Abbildung 80 und Abbildung 81 verdeutlichen, dass von den abgeernteten Flächen stets mehr Boden abgetragen wird als vor der Ernte, selbst wenn eine Mulchauflage den Boden bedeckt. Die vorgezogene Ernte von Winterweizen erhöht den Gebietsaustrag von 2.4 t/ha auf 4.4 t/ha, durch die spätere Ernte von Winterweizen verringert sich der Gebietsaustrag um 0.3 t/ha (Stoppelpvariante), sodass insgesamt 4.1 t/ha abgetragen werden. Verbleiben Stoppeln nach der Ernte, so steigt das Erosionsrisiko also nur moderat. Die Simulation „feinkrümelige Brache“ nach der Ernte stellt ein „worst case-Szenario“ dar und führt im Beispiel 1 zu extrem hohen Gebietsausträgen von 28.6 t/ha.

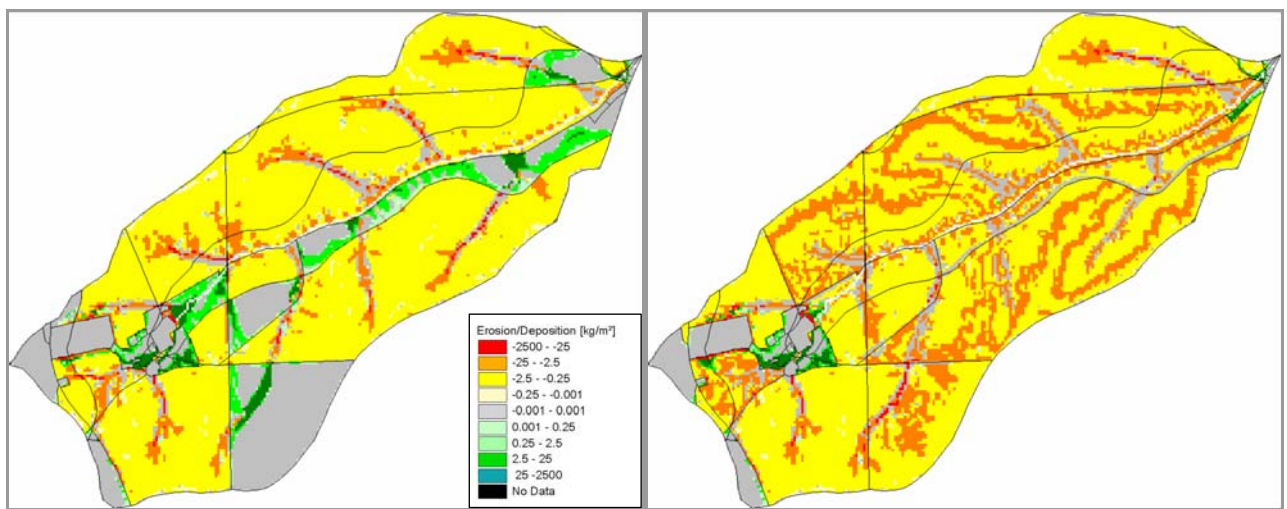
Die in Abbildung 81 zwischen den Polygongrenzen auftretenden roten Linien sind hauptsächlich auf die linear verlaufenden Bodenartengrenzen der digitalen BÜK 200 zurückzuführen.

### Beispiel 2: Einzugsgebiet des Rasslitzbaches: September 2043 (MIN-Lauf)

Im September 2043 (MIN-Lauf) werden fünf Starkniederschläge (am 06., 10., 13., 15. und 18. September) simuliert. Diese verursachen einen Gebietsaustrag von 5.7 t/ha. Alle Wintergetreidesorten sind bereits geerntet, es verbleiben Stoppeln auf den Feldern bis zur Einsaat der Folgefrucht. Die Maisernte wird derzeit auf den 20. September datiert, im Jahre 2043 wird voraussichtlich im Mittel bereits 13 Tage früher geerntet (07. September). Gleichzeitig kann unterstellt werden, dass die Einsaat von Wintergerste (als Folgefrucht auf den Winterweizen) auch etwas eher erfolgt (derzeit im Mittel am 18. September, zukünftig etwa 2 Tage früher) (ESTRELLA 2007). Die Simulationen erfolgen analog zu Beispiel 1 im Vergleich zwischen Stoppelfeld (Abbildung 82) und Brache (Abbildung 83) mit und ohne Verschiebung von Ernte- und Einsaatterminen.



**Abbildung 82: Erosion und Deposition vom 06.-18. September 2043 (MIN-Lauf), Einzugsgebiet Rasslitzbach: links: ohne Verschiebung der Erntetermine, Stoppeln – Austrag 5.7 t/ha; rechts: mit Verschiebung der Erntetermine bis 2050, Stoppeln – Austrag 7.1 t/ha**



**Abbildung 83: Erosion und Deposition vom 06.-18. September 2043 (MIN-Lauf), Einzugsgebiet Rasslitzbach: links: ohne Verschiebung der Erntetermine, Brache – Austrag 13.3 t/ha; rechts: mit Verschiebung der Erntetermine bis 2050, Brache – Austrag 22.1 t/ha**

In Abbildung 82 und Abbildung 83 (jeweils links) ist erkennbar, dass Mais im Reifestadium einen gewissen Erosionsschutz bietet. Die abgeernteten Getreideflächen werden gleichmäßig flächig erodiert, der Oberflächenabfluss konzentriert sich in den Tiefenlinien und verursacht dort stärkere Erosion. Tabelle 73 fasst die Ergebnisse der beiden Beispielsimulationen zusammen. Werden die Schläge nach der Ernte vollständig beräumt und umgebrochen, sodass die schützende Bodenbedeckung entfernt und die Bodenstruktur gestört wird, werden um bis zu 66-218 %, im Vergleich zur Stoppelvariante um bis zu 600 % höhere Gebietsausträge simuliert.

**Tabelle 73: Auswirkung zukünftig veränderter Erntetermine auf den Gebietsaustrag**

Einzugsgebiet	Phänologie 1998-2007 Stoppeln Austrag [t/ha]	Phänologie 2041-2050 Stoppeln Austrag [t/ha]	+/- [%] (Stoppel/ Stoppel)	Phänologie 1998-2007 Brache Austrag [t/ha]	Phänologie 2041-2050 Brache Austrag [t/ha]	+/- [%] (Brache/ Brache)	+/- [%] (Stoppel/ Brache)
Dittersdorfer Bach: 01.-03. Aug 2043 (MAX)	2.4	4.1	+70	9.0	28.6	+218	+598%
Rasslitzbach: 06.-18. Sep 2043 (MIN)	5.7	7.1	+25	13.3	22.1	+66	+211%

### 3.3.6 Gebietsausträge Zukunftsszenarios „Monokultur Winterweizen“ und „Monokultur Mais“ 2041-2050, Lauf MAX

Die Auswirkungen veränderter Fruchtfolgen werden exemplarisch für die Einzugsgebiete Dittersdorfer Bach und Rasslitzbach (Klimastationen Chemnitz und Oschatz: Monokultur Winterweizen, Monokultur Mais) für den ersten Simulationszeitraum 2041-2050 für den Lauf mit der höchsten mittleren Starkregenintensität (MAX) beschrieben.

#### Monokultur Winterweizen

Der mittlere Aussaattermin für Winterweizen ist der 5. Oktober, der Aufgang wird auf den 20. Oktober datiert (PÖHLER et al. 2007). Der Boden ist erst Ende Mai nahezu vollständig bedeckt. Die Ernte erfolgt Anfang August (09. August). Weil aus Sicht des Erosionsschutzes der Boden möglichst lange bedeckt sein sollte, wurde für die Simulation „Monokultur Winterweizen“ angenommen, dass nach der Ernte von Winterweizen die Stoppeln bis zur Neueinsaat auf dem Schlag verbleiben. Die Pflugbearbeitung und die Saatbettbereitung erfolgen in einem Arbeitsgang oder kurz hintereinander.

Tabelle 74 und Tabelle 75 zeigen die Gebietsausträge für die Einzugsgebiete Dittersdorfer Bach (Chemnitz) und Rasslitzbach (Oschatz) für den MAX-Lauf 2041-2050.

**Tabelle 74: Gebietsaustrag Dittersdorfer Bach „Monokultur Winterweizen“ 2041-2050, MAX-Lauf**

Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
März	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
April	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0
Mai	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0
Juni	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0
Juli	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
August	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	0.1
September	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
Oktober	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>	<b>1.3</b>	<b>0.1</b>	<b>0.7</b>	<b>0.9</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>5.0</b>	<b>0.0</b>	<b>8.0</b>	<b>0.1</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>						<b>16.1 t/ha</b>				
<b>Vergleichswert bei gemischter Fruchtfolge:</b>						<b>71.0 t/ha</b>				

**Tabelle 75: Gebietsaustrag Rasslitzbach „Monokultur Winterweizen“ 2041-2050, MAX-Lauf**

Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
März	0.0	1.3	4.7	2.3	0.0	17.2	0.0	0.0	0.0	1.2
April	0.0	0.0	2.6	0.0	0.1	26.3	0.4	0.0	0.0	0.0
Mai	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0
Juni	0.0	0.2	0.0	0.4	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
Juli	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
August	31.2	0.0	0.0	4.4	3.4	0.0	0.1	0.0	2.8	0.0
September	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1
Oktober	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	12.8	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>	<b>31.4</b>	<b>1.6</b>	<b>7.3</b>	<b>7.4</b>	<b>3.5</b>	<b>43.5</b>	<b>1.4</b>	<b>0.0</b>	<b>15.8</b>	<b>6.1</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>	<b>118.0 t/ha</b>									
<b>Vergleichswert bei gemischter Fruchtfolge:</b>	<b>122.9 t/ha</b>									

Der bei „Monokultur Winterweizen“ simulierte Gebietsaustrag ist im Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches im Vergleich zum Referenzwert (gemischte Fruchtfolge) deutlich geringer (- 83 %). Im Einzugsgebiet Rasslitzbach ist der Unterschied aber nur marginal. Hohe Bodenabträge werden in den Monaten März/April und im August berechnet. Im Frühjahr ist der Boden durch den Winterweizen noch unzureichend bedeckt, Anfang August wird der Weizen geerntet. Für den August 2041 wurden hohe Gebietsausträge von 31.2 t/ha simuliert, die Starkregen mit besonders extremen Intensitäten sind auf den 10. und 11. August und damit unmittelbar nach der Ernte datiert.

**Monokultur Mais**

**Variante Stoppel**

Mais wird spät im April (mittleres Datum: 27. April) ausgesät. In den Folgemonaten ist der Boden nur unzureichend bedeckt. Die Bodenoberfläche verschlämmt und behält die infiltrationshemmenden Eigenschaften auch nach Bestandsschluss im Juli. Allerdings bietet das dichte Blattwerk dann bis zur Ernte Ende September (mittlerer Erntetermin: 20. September) einen zuverlässigen Schutz vor der Splashwirkung der Regentropfen. Das Niederschlagswasser gelangt hauptsächlich entlang der Stängel auf die Bodenoberfläche, sodass die Transportkapazität des Oberflächenabflusses durch den fehlenden Tropfenimpuls stark verringert wird. Die Simulationen „Monokultur Mais“ wurden zunächst ebenfalls unter der Annahme durchgeführt, dass die Maisstoppeln und etwas Maisstroh (Mulchbedeckung 30 %) nach der Ernte auf den Schlägen verbleiben und erst bei der Neueinsaat im April des darauf folgenden Jahres ein Umbruch und die Saatbettbereitung erfolgen (Tabelle 76 und Tabelle 77).

**Tabelle 76: Gebietsaustrag Dittersdorfer Bach „Monokultur Mais“ 2041-2050, MAX-Lauf - Stoppel**

Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
März	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
April	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mai	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
Juni	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.7	0.0	0.0	0.0
Juli	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
August	0.0	0.0	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	0.0
September	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oktober	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>	<b>7.2</b>	<b>0.5</b>	<b>6.4</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>25.7</b>	<b>0.0</b>	<b>6.6</b>	<b>0.0</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>	<b>46.4 t/ha</b>									
<b>Vergleichswert bei gemischter Fruchtfolge:</b>	<b>71.0 t/ha</b>									

Im Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches wird für das Szenario „Monokultur Mais“ für die ausgewählte Dekade 2041-2050 ein geringerer Bodenaustrag als bei gemischter Fruchtfolge simuliert (-35 %). Das Ergebnis überrascht nicht angesichts der Verteilung der Starkniederschläge. Im Vergleich mit den Bodenausträgen bei gemischter Fruchtfolge (Tabelle 37) wird deutlich, dass die Erosionsereignisse hauptsächlich im Juli und August stattfinden. In diesen Monaten bietet Mais im Gegensatz zu den meist schon abgeernteten Sommer- und Wintergetreideschlägen einen hinreichenden Erosionsschutz. Nur im Juni erhöht sich der simulierte Bodenabtrag im Vergleich zur gemischten Fruchtfolge deutlich.

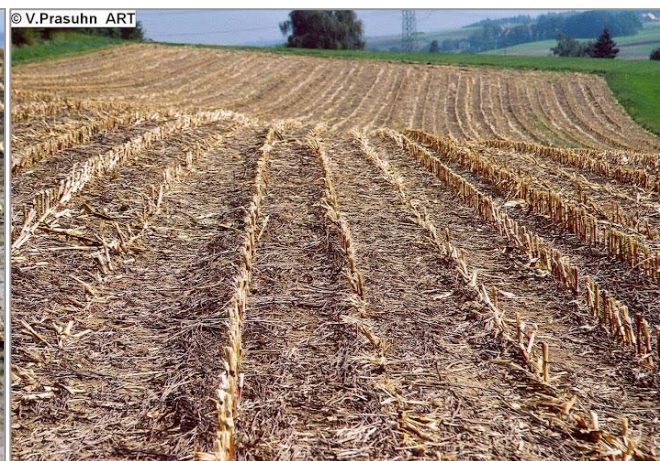
**Tabelle 77: Gebietsaustrag Rasslitzbach „Monokultur Mais“ 2041-2050, MAX-Lauf - Stoppel**

Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.3
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0
März	0.0	4.0	3.1	8.2	0.0	22.1	0.0	0.0	2.6	2.1
April	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	36.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Mai	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
Juni	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
Juli	0.5	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
August	0.6	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
September	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Oktober	0.0	0.0	0.0	19.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November	2.6	6.2	0.0	0.0	9.4	0.0	0.0	10.0	0.3	0.0
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	4.7	0.0	31.5	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>	<b>3.7</b>	<b>10.6</b>	<b>3.3</b>	<b>28.1</b>	<b>11.3</b>	<b>58.6</b>	<b>8.6</b>	<b>10.1</b>	<b>34.6</b>	<b>12.5</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>	<b>181.4 t/ha</b>									
<b>Vergleichswert bei gemischter Fruchtfolge:</b>	<b>122.9 t/ha</b>									

Aufgrund der häufigeren Starkniederschläge in der Region Oschatz im Winterhalbjahr (Oktober bis März) kommt es im Einzugsgebiet des Rasslitzbaches zu stark erhöhten Gebietsausträgen beim Szenario „Monokultur Mais - Stoppel“ im Vergleich zur gemischten Fruchtfolge (+47 %). Der Boden ist durch die Maisstoppeln und wenigen Strohreste nur spärlich bedeckt, zudem durch die Ernte verdichtet und oft verschlämmt. Den Extremfall eines verschlämmten Maisstoppelfeldes nach konventioneller Bodenbearbeitung zeigt Abb. 84.

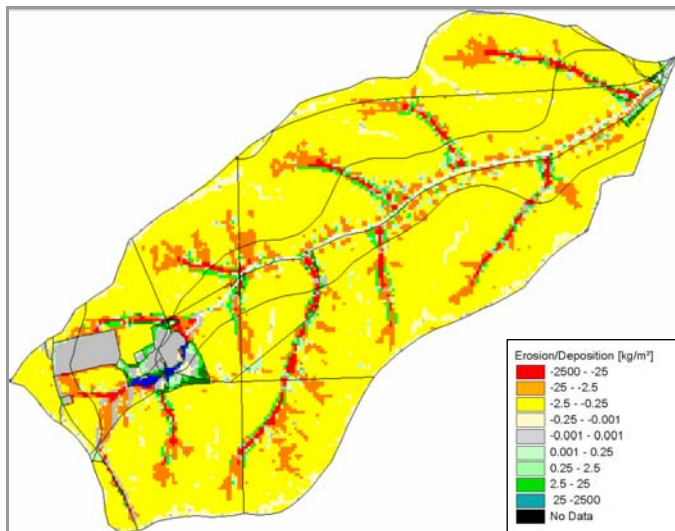


**Abb. 84: Maisstoppeln - verschlämmt**  
Foto: Prasuhn, V. (2006)

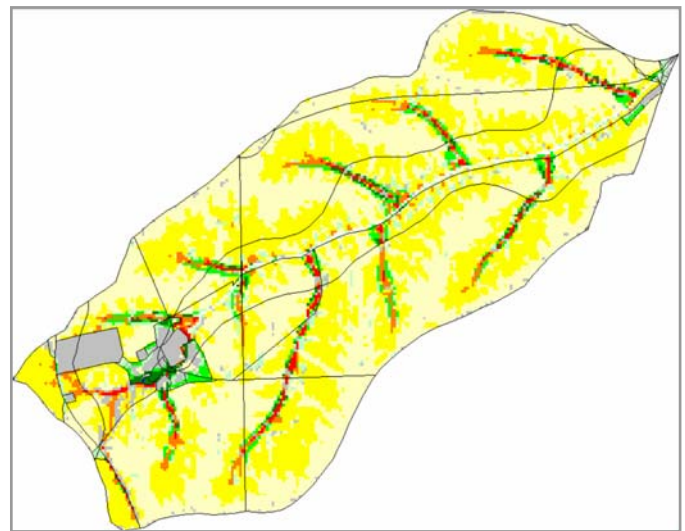


**Abb. 85: Maisstoppeln mit hoher Mulchbedeckung**  
Foto: Prasuhn, V. (2006)

Durch eine Erhöhung der Mulchbedeckung wird der Boden zuverlässig vor Verschlämmung geschützt (Abbildungen 85 und 87). Beispielhaft wurde eine vergleichende Erosionssimulation für den Monat Dezember 2049 (MAX-Lauf) durchgeführt. Bei einer Mulchbedeckung von nur 20 % und angenommener Verschlämmung wurde ein Bodenaustrag von 31.5 t/ha berechnet (Abb. 86). Wird von einer Mulchbedeckung von 90 % und einer unverschlämmten Bodenoberfläche ausgegangen, verringert sich der Bodenaustrag unter sonst gleichen Bedingungen auf 13.6 t/ha (Abbildung 87).



**Abb. 86: Erosion und Deposition im Dezember 2049**  
**Szenario „Monokultur Mais“ 20% Mulch,**  
**verschlämmt: 31.5 t/ha**



**Abb. 87: Erosion und Deposition im Dezember 2049**  
**Szenario „Monokultur Mais“ 90% Mulch,**  
**nicht verschlämmt: 13.6 t/ha**

### Variante Schwarzbrache

Durch fachgerechtes Strohmanagement kann der bedeutendste Maisschädling, der Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*), wirkungsvoll bekämpft werden. Unter dem Aspekt der konventionellen Bodenbearbeitung gelten jedoch eine frühe Maisernte, ein tiefer Schnitt, die Beräumung des Maisstrohs und ein sauberes Pflügen unmittelbar nach der Ernte als präventive Maßnahmen gegen die Ausbreitung des Schädling. Für das Szenario „Monokultur Mais - Schwarzbrache“ verbleibt der Schlag bis zur Neueinsaat im April des Folgejahres im Zustand der Schwarzbrache. Die Ergebnisse der Erosionssimulation „Monokultur Mais - Schwarzbrache“ für das Einzugsgebiet des Rasslitzbaches, Dekade 2041-2050 (MAX), sind in Tabelle 78 zusammengestellt.

**Tabelle 78: Gebietsaustrag Rasslitzbach „Monokultur Mais“ 2041-2050, MAX-Lauf – Schwarzbrache; Abbildung 89 bezieht sich auf die Markierung März 2046**

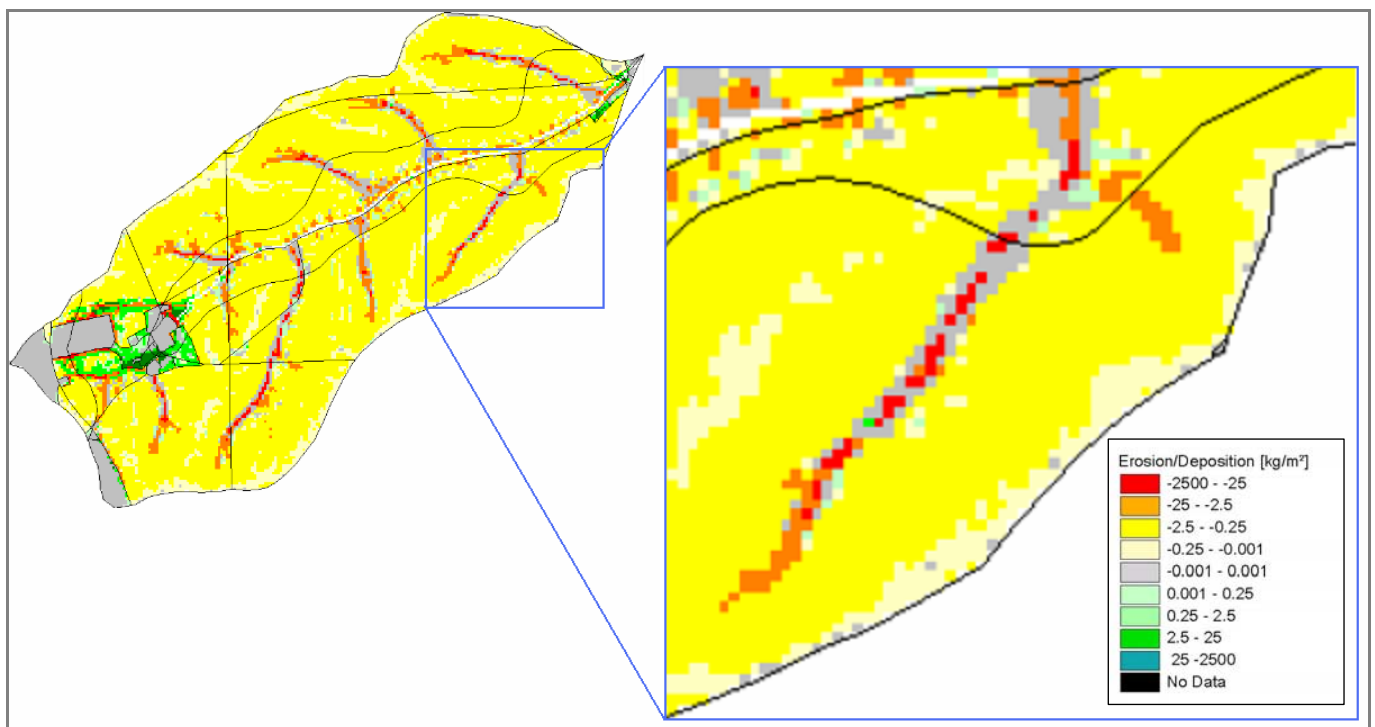
Jahr \ Monat	2041 [t/ha]	2042 [t/ha]	2043 [t/ha]	2044 [t/ha]	2045 [t/ha]	2046 [t/ha]	2047 [t/ha]	2048 [t/ha]	2049 [t/ha]	2050 [t/ha]
Januar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6
Februar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
März	0.0	0.3	3.2	0.4	0.0	14.5	0.0	0.0	0.2	0.3
April	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	25.6	0.0	0.0	0.0	0.0
Mai	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
Juni	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
Juli	0.5	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
August	0.6	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
September	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Oktober	0.0	0.0	0.0	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
November	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Dezember	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	0.0	24.0	0.0
<b>Austrag/Jahr [t/ha]</b>	<b>1.1</b>	<b>0.8</b>	<b>3.4</b>	<b>6.4</b>	<b>0.2</b>	<b>40.1</b>	<b>3.2</b>	<b>0.2</b>	<b>24.4</b>	<b>4.0</b>
<b>Gesamtaustrag:</b>						<b>83.8 t/ha</b>				
<b>Vergleichswert bei Monokultur Mais, Stoppel/verschlämmt:</b>						<b>181.4 t/ha</b>				
<b>Vergleichswert bei gemischter Fruchtfolge:</b>						<b>123.0 t/ha</b>				

Aufgrund der hohen Rauigkeit der Schwarzbrache geht der Gebietsaustrag im Winterhalbjahr deutlich zurück. Insgesamt ist der Bodenaustrag geringer als bei Stoppeln mit geringer Mulchbedeckung und bei gemischter Fruchtfolge. Im Verlauf der Monate Oktober bis April nimmt die Rauigkeit durch zunehmende Verschlämmung und Schneelast allerdings ab. Infolge von Starkregen oder/und Schneeschmelze kann es durch konzentrierten Oberflächenabfluss zu Rinnen- und im Extremfall zu Grabenerosion kommen.



**Abbildung 88: Grabenerosion bei Schwarzbrache Ende Februar nach der Schneeschmelze**  
Foto: Prasuhn (2006)

Solche Rinnenstrukturen lassen sich auf den Erosionsprognosekarten wiederfinden. Abbildung 89 zeigt die Erosion und Deposition für März 2046 (Gebietsaustrag 14.5 t/ha) mit Zoom auf eine Tiefenlinie, in der es durch konzentrierten Oberflächenabfluss lokal zu Abträgen >25 kg/m<sup>2</sup> kommt.



**Abbildung 89: Erosionsrinnen März 2046 (MAX) bei verschlammter und nivellierter Schwarzbrache**

In Abbildung 90 sind die Gebietsausträge für die Szenarien „konventionelle Bodenbearbeitung“ (gemischte Fruchtfolge), „Monokultur Mais - Stoppeln“ und „Monokultur Mais – Schwarzbrache“ nach Monaten (2041-2050 [MAX], Summen) vergleichend dargestellt. Deutlich wird das erhöhte Erosionsrisiko beim Szenario „konventionelle Bodenbearbeitung“ (gemischte Fruchtfolge) in den Monaten März und April sowie in den Erntemonaten August und September. Im Szenario „Monokultur Mais“ sind die Monate außerhalb der Vegetationsperiode besonders von Erosion betroffen. Das Erosionsrisiko steigt mit zunehmender Verschlammung. Im Vergleich „Monokultur Mais – Stoppel“ und „Monokultur Mais - Schwarzbrache“ fällt die Bilanz für die Schwarzbrache etwas günstiger aus. Aus Sicht des Bodenschutzes ist - wie Abbildung 87 zeigt - auch im Rahmen einer konventionellen Bodenbearbeitung eine dichte Mulchauflage anzustreben.

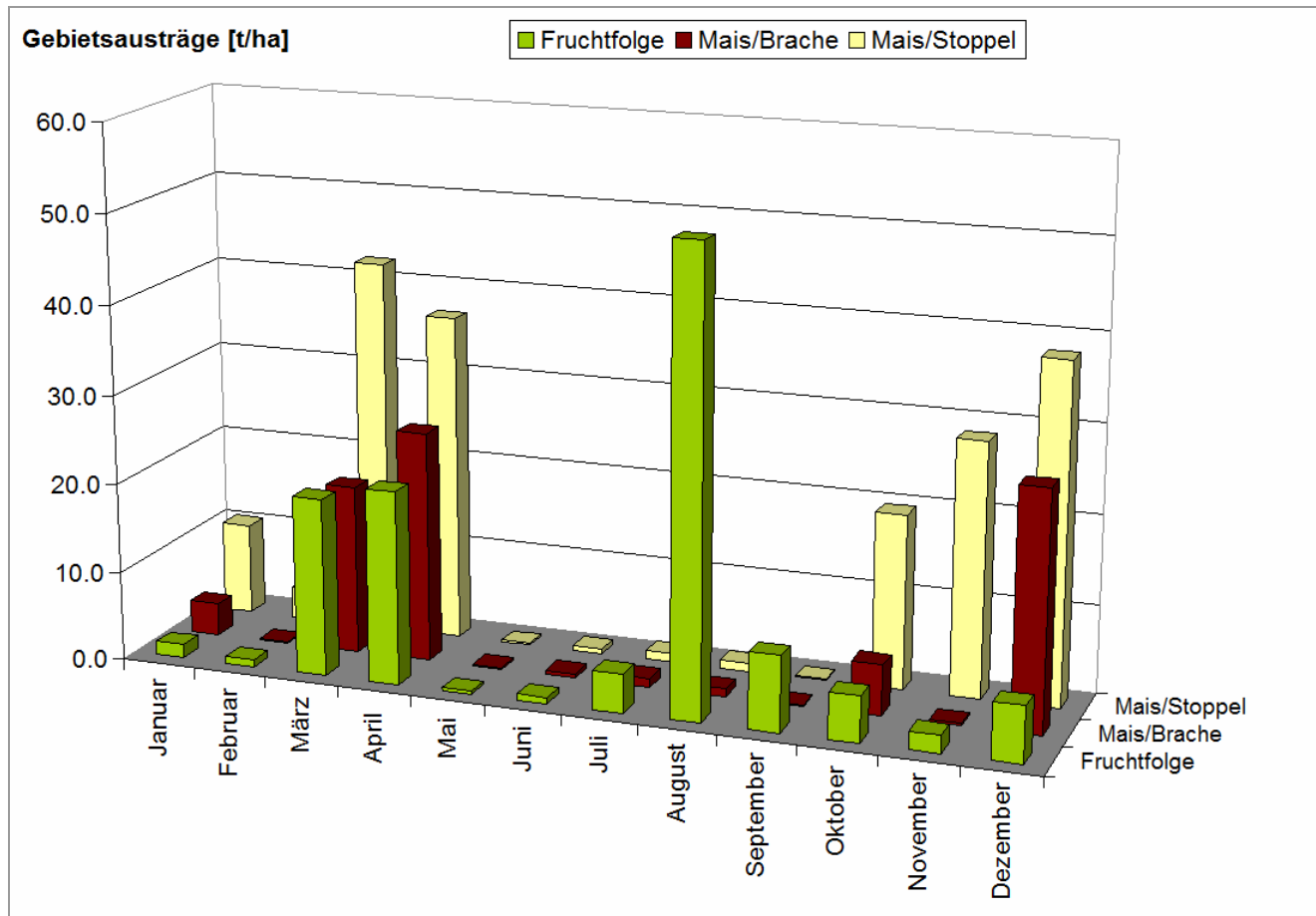


Abbildung 90: Gebietsausträge [t/ha] für die Dekade 2041-2050 (MAX) nach Monaten, vergleichend für die Szenarien „Fruchtfolge“, „Monokultur Mais – Schwarzbrache“ und „Monokultur Mais - Stoppeln“

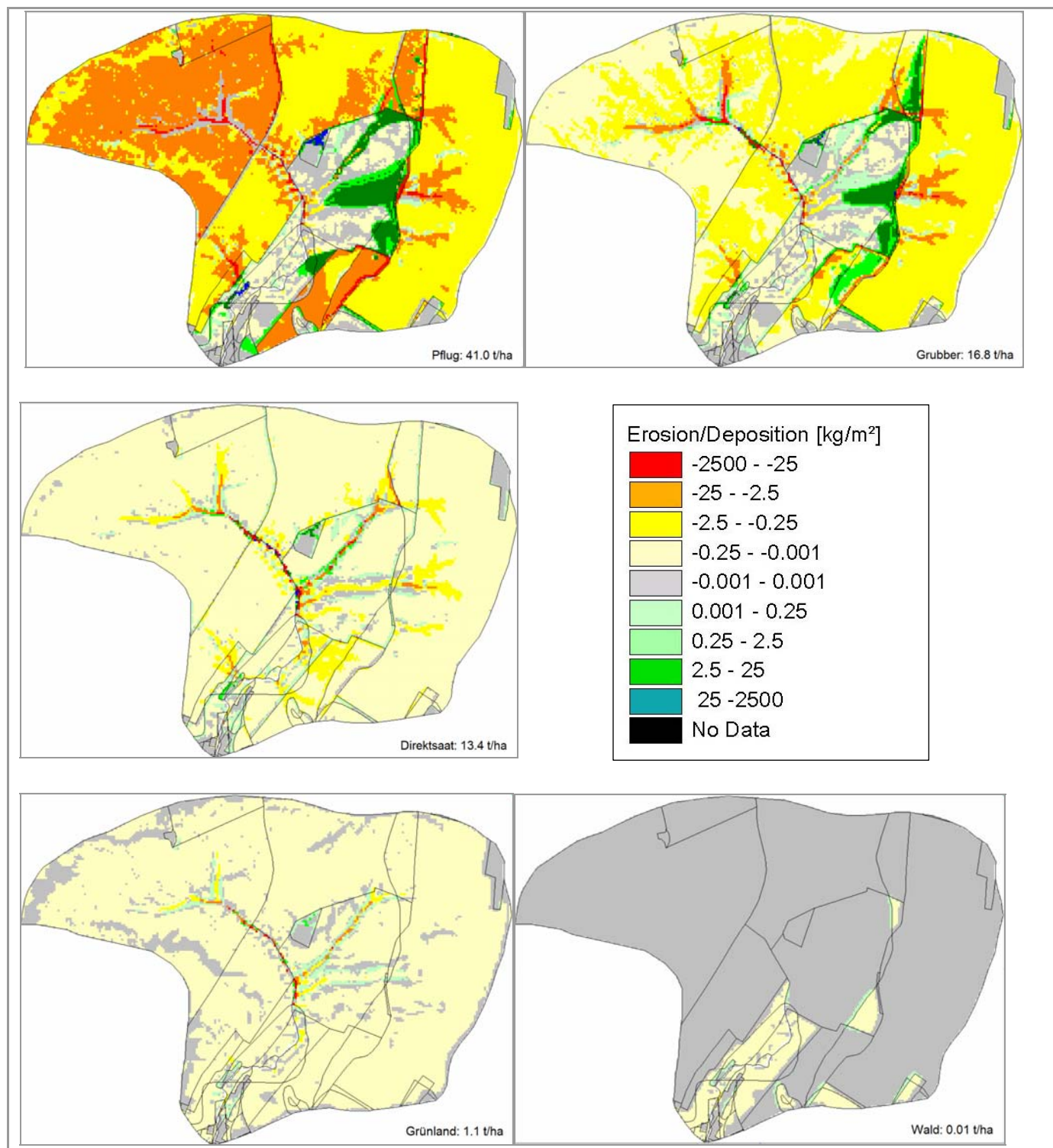
### 3.3.7 Gebietsausträge Zukunftsszenario „Veränderte Landnutzung“

Wie im Kapitel 2 beschrieben sind Landnutzungsänderungen wie beispielsweise die Umwandlung von Ackerland in Grünland oder Wald mit dem Ziel des Erosionsschutzes aufgrund der wachsenden Ansprüche an den Anbau von Nahrungsmitteln und Energiepflanzen wenig realistisch. Landnutzungsänderungen werden deshalb nur exemplarisch anhand eines Beispiels diskutiert.

Ausgewählt wurde eine Abfolge von mehreren kurzen Starkniederschlägen mit Spitzenintensitäten von 3.6 mm/min am 27. Oktober im Einzugsgebiet des Viebigbaches (Klimastation Görlitz). Bei konventioneller Bodenbearbeitung wurde ein Gebietsaustrag von 41 t/ha simuliert. Durch konservierende Bodenbearbeitung ist lediglich eine Reduzierung auf 17 t/ha durch Grubberbearbeitung bzw. 13 t/ha mittels Direktsaat möglich (Tabelle 52). Um zu prüfen, ob eine Landnutzungsänderung in Grünland oder Wald den Bodenaustrag weiter entscheidend vermindern kann, wurden in einer ersten Simulation alle Ackerflächen in Grünland umgewandelt, in einer zweiten Simulation in Wald.



Abbildung 91 zeigt die Erosionsprognosekarten für beide Landnutzungsänderungen im Vergleich zur konventionellen und konservierenden Bodenbearbeitung. Durch eine Umwandlung in Grünland geht der Gebietsaustrag auf 1.1 t/ha zurück (das entspricht nur noch 3 % des Austrages bei konventioneller Bodenbearbeitung). Wird Wald (Mischwald im Alter von mindestens 15 Jahren) auf allen Schlägen angenommen, wird kein Boden mehr von diesen Flächen abgetragen. Erosion findet nur noch auf den verbliebenen Grünlandflächen in geringem Umfang statt. Durch eine Landnutzungsänderung in Grünland oder Wald wird somit ein sehr guter Erosionsschutz erreicht.



**Abbildung 91: Erosionsprognosekarten Oktober 2041 (MIN-Lauf): Erosion und Deposition bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung (Grubber und Direktsaat) und nach Landnutzungsänderung (Umwandlung in Grünland und Wald) – Einzugsgebiet Viebigbach**

### 3.3.8 Gebietsausträge Zukunftsszenario „Luftpolstereffekt“

Wird eine Trockenperiode, die eine stärkere Austrocknung der obersten Bodenschicht zur Folge hat, durch einen konvektiven Starkregen beendet, kann ein Luftpolster - wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben - die Infiltration vermindern oder auch zeitweise ganz verhindern. Der Luftpolstereffekt wird bisher von keinem Erosionsmodell erfasst. Im Bereich Boden- und Gewässerschutz der TU Bergakademie Freiberg wird derzeit experimentell untersucht, welche Bodeneigenschaften zu einem Luftpolstereffekt führen können, in welchem Maße sich die Infiltration durch den Luftpolstereffekt verringert und wie lange das infiltrationshemmende Luftpolster aufrechterhalten wird.

Das Phänomen wurde in den bisherigen Simulationen nicht berücksichtigt. Weil die Projektionen der Klimadaten eindeutig auf eine Zunahme von Trockenperioden im Frühjahr und Sommer vor allem in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts hinweisen, soll das Ausmaß eines Luftpolstereffektes zumindest exemplarisch abgeschätzt werden.

Seit Februar 2012 liegt ein Prototyp des Moduls „Luftpolstereffekt“ für EROSION 3D vor, welches im Rahmen dieser Studie erstmalig angewendet wird. Der Luftpolstereffekt wird mittels des Parameters „Ftrap“, der von der Bodenart und vom Anfangswassergehalt abhängig ist, beschrieben.

Als Beispiel wurde der 20. Juli 2042 (Lauf MIN) ausgewählt. Im Einzugsgebiet des Viebigbaches (Klimastation Görlitz) fällt ein Starkniederschlag von nur 15 Minuten Dauer, einer Niederschlagssumme von 6.4 mm und einer hohen Anfangsintensität von 0.78 mm/min auf einen trockenen Boden (Anfangswassergehalt  $\varnothing$  22 Vol-%). In den bisherigen Simulationen wurde für Juli 2042 (MIN) kein Gebietsaustrag berechnet (siehe Abschnitte 3.3.2 bis 3.3.4). Um den Effekt eines Luftpolsters im Boden abzuschätzen, wurde der Luftpolsterfaktor Ftrap von 0 (kein Luftpolstereffekt) bis 1 (das Luftpolster verhindert die Infiltration vollständig) variiert.

Abbildung 92 und Abbildung 93 stellen die Abflüsse, die infolge des Starkregenereignisses zusätzlich zum Basisabfluss berechnet wurden, und die Bodenausträge bei konventioneller Bodenbearbeitung im Vergleich zu Grubberbearbeitung und Direktsaat dar.

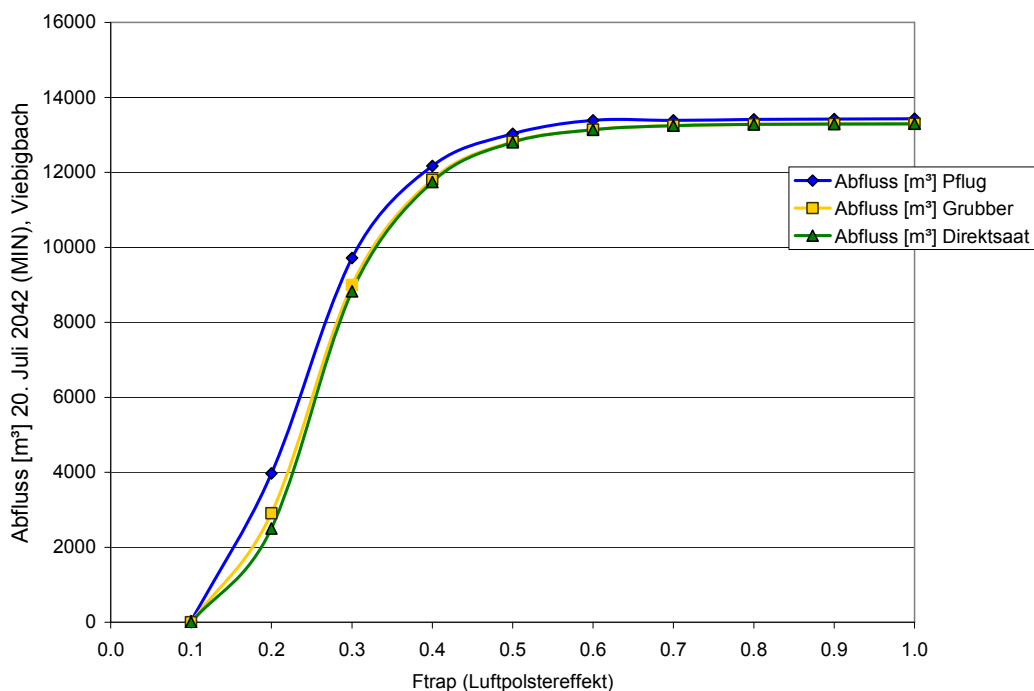
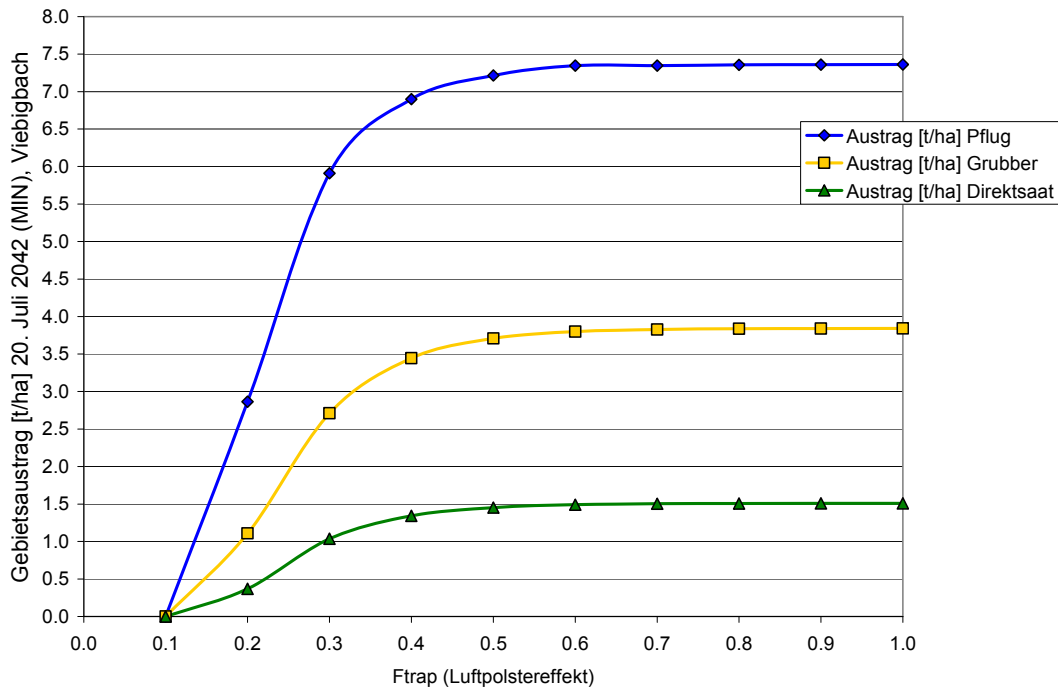


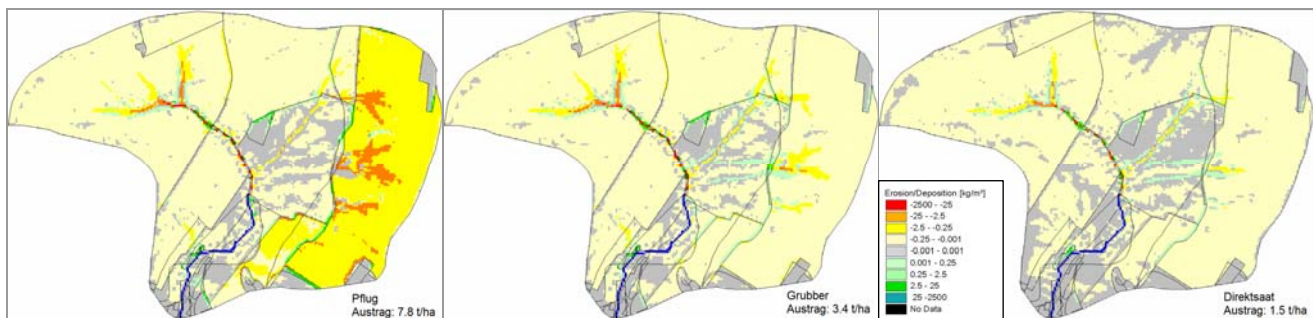
Abbildung 92: Abflüsse [m³] für den 20. Juli 2042 (MIN) bei unterschiedlich ausgeprägtem Luftpolstereffekt



**Abbildung 93: Gebietsausträge [t/ha] für den 20. Juli 2042 (MIN) bei unterschiedlich ausgeprägtem Luftpolstereffekt**

Bei  $F_{trap} < 0.1$  wird kein Abfluss simuliert, ab diesem Schwellenwert steigen Abfluss und Bodenaustrag degressiv an. Ab  $F_{trap}=0.5$  verändert sich Abfluss und Bodenaustrag nur noch unwesentlich. Der Abfluss ist erwartungsgemäß nahezu unabhängig von der Bearbeitungsvariante. Der Bodenaustrag nähert sich bei konventioneller Bodenbearbeitung einem Wert von 7.4 t/ha, bei Grubberbearbeitung einem Wert von 3.8 t/ha (das entspricht 51 % im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung) und bei Direktsaat einem Wert von 1.5 t/ha (das entspricht 20 % im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung).

Abbildung 94 zeigt die Erosionsprognosekarten bei  $F_{trap}=0.5$  für die drei Bearbeitungsvarianten.



**Abbildung 94: Erosionsprognosekarten bei Luftpolstereffekt ( $F_{trap}=0.5$ ) – 20. Juli 2042 (MIN), Viebigbach**

Bei  $F_{trap}=0.5$  wird im dargestellten Beispiel nahezu das Maximum des Bodenaustrages infolge des Luftpolstereffektes erreicht. Bei konventioneller Bodenbearbeitung (links) wird der Maisschlag (Flächen-ID 9, rechts im Einzugsgebiet) besonders stark erodiert, während bei den konservierend bearbeiteten Varianten keine Unterschiede zwischen den angebauten Fruchtarten erkennbar sind. Die Grünlandflächen sind weniger stark betroffen als die Ackerschläge.

Die Ergebnisse der Simulation des Einflusses eines Luftpolstereffektes erscheinen realistisch, sie sind jedoch aufgrund der noch unzureichenden Datenlage nur als erste Abschätzung für ein Einzelbeispiel zu werten.

# 4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel des Forschungsvorhabens war es, das durch den Klima- und Landnutzungswandel bedingte zukünftige Erosionsrisiko in Referenzeinzugsgebieten in Sachsen räumlich differenziert darzustellen und zu quantifizieren. Die zukünftigen Verhältnisse wurden in Form von plausiblen Modellszenarien abgebildet. Mit dem Ziel, die Bodenerosion durch Wasser unter zukünftigen Verhältnissen zu minimieren, wurden einzelne Risikofaktoren isoliert ausgewiesen und gewichtet. Die Modellierungen erfolgten in einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung auf Basis individueller Starkniederschläge.

Die vorliegende Arbeit enthält eine Übersicht über die in und für Deutschland entwickelten regionalen Klimamodelle. Aus dem Vergleich dieser Modelle geht hervor, dass die Projektionen des statistischen regionalen Klimamodells WETTREG derzeit am plausibelsten und damit am besten geeignet sind, um regionale Aussagen zur Entwicklung der Niederschlagsänderungen in Sachsen abzuleiten. Es ist zudem bisher das einzige regionale Klimamodell, das Niederschlagsdaten in der erforderlichen hohen Auflösung ausgeben kann.

Weil sich die Unterschiede zwischen den Prognosen der verschiedenen Emissionsszenarien erst ab Mitte des Jahrhunderts deutlich ausprägen, wurden für die Modellierungen zwei Zukunftszeiträume ausgewählt: ein naher von 2041-2050 und ein ferner Zeitraum von 2091-2100. Als Referenzzeitraum dienten die Jahre 1998-2007.

Die Niederschlagsdaten für den Referenzzeitraum lagen in Form gemessener 5-min-Summen für die ausgewählten Klimastationen Chemnitz, Oschatz und Görlitz ganzjährig vor (DWD 2009). Auf der Grundlage dieser Niederschlagsdaten wurden mit WETTREG mit dem Antrieb des im Jahre 2010 neu berechneten A1B-Szenarios hoch aufgelöste Niederschlagsdaten für die beiden Zukunftszeiträume generiert (KREIENKAMP et al. 2011; Firma CEC Potsdam). Aus den zehn für jede Klimastation berechneten Zeitreihen bis 2100 mit alternativen, gleich wahrscheinlichen Klimaentwicklungen wurden der Lauf mit der geringsten und der Lauf mit der höchsten mittleren Starkregenintensität (MIN und MAX) über alle Ereignisse ausgewählt. Alle Niederschläge mit einer Intensität  $\geq 0.1$  mm/min (+/- 60 min) wurden als Starkniederschläge definiert und aus den Zeitreihen unter Bewahrung ihres statistisch wahrscheinlichen Datums herausgefiltert.

Die Niederschlagsparameter für die Erosionsmodellierung in den Zukunftszeiträumen bildeten somit die mit WETTREG generierten Einzelniederschläge der Läufe MIN und MAX ab einer Intensität  $\geq 0.1$  mm/min. Die gemessenen und erzeugten Starkniederschläge wurden hinsichtlich ihrer Anzahl, der durchschnittlichen Niederschlagssummen und der Niederschlagsintensitäten ausgewertet. Niederschläge bei Temperaturen unter 0 °C wurden bei der Erosionssimulation nicht berücksichtigt.

Die Erosionssimulationen wurden mit dem physikalisch begründeten Erosionsmodell EROSION 3D in einer räumlichen Auflösung von 10x10 m auf der Grundlage des DGM25 in drei Referenzeinzugsgebieten durchgeführt. Das Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches südlich der Klimastation Görlitz repräsentiert den flächenmäßig großen Naturraum „Untere und mittlere Lagen des Erzgebirges“, das Einzugsgebiet des Rasslitzbaches südöstlich der Klimastation Oschatz den Naturraum „Mittelsächsisches Lösshügelland“ und das Einzugsgebiet des Viebigbaches südwestlich der Klimastation Görlitz das „Oberlausitzer Lösshügelland“. Die Gebietsausträge aus den drei Einzugsgebieten wurden für die zwei Zukunftszeiträume simuliert und mit den Gebietsausträgen im Referenzzeitraum verglichen.

Datenbasis für die Parametrisierung des Bodens und der Landnutzung für das Erosionsmodell stellten die Verschneidung der BÜK200 mit dem ATKIS-DLM25 und der Parameterkatalog EROSION 2D/3D (MICHAEL, A. 2001; SCHINDEWOLF 2009) dar. Die in das Erosionsmodell eingehenden zeitlich veränderlichen Boden- und Landnutzungsparameter beschreiben die für die Einzugsgebiete typischen Fruchtfolgen und berücksichtigen deren Phänologie sowie entsprechende Bodenbearbeitungsmaßnahmen. Die Boden- und Landnutzungsparameter wurden für jedes einzelne Starkregenereignis neu zusammengestellt, sodass sie den jeweiligen Bodenzustand schlaggenau zum Zeitpunkt des Starkregenereignisses wiedergeben. Die in das Modell EROSION 3D eingehenden Anfangsbodenfeuchten wurden mit dem Modell METVER für den Referenzzeitraum und die Simulationszeiträume für alle in den Einzugsgebieten vorkommenden Boden- und Fruchtarten taggenau berechnet (PILZ 2011). Die Änderung klimasensitiver Boden- und Landnutzungsparameter wurde aus aktuellen Forschungsbeiträgen zur Klimafolgenforschung abgeleitet.

Zunächst wurde ein Zukunftsszenario berechnet, das den Einfluss des veränderten Starkniederschlagsgeschehens sowie veränderter Bodenfeuchten bei Bodenbearbeitung und Fruchtfolge wie im Referenzzeitraum für die drei Einzugsgebiete abbildet. Ein weiteres Szenario beschreibt die Möglichkeiten und Grenzen der Erosionsminderung durch konservierende Bodenbearbeitung (Grubber und Direktsaat) unter zukünftigen Klimabedingungen. Die Einflüsse von Klimafolgewirkungen wie die eines verringerten Gehaltes an organischem Kohlenstoff und einer früheren Ernte durch eine veränderte Phänologie wurden anhand von Beispielszenarien demonstriert. Zwei weitere Szenarien dokumentieren die Auswirkungen veränderter Fruchtfolgen durch Monokulturanbau (Szenarien „Monokultur Mais“ und „Monokultur Winterweizen“) und veränderter Landnutzung auf den Bodenaustrag durch Wasser unter zukünftigen Klimabedingungen.

Die Ergebnisse der Arbeit hinsichtlich des veränderten Starkniederschlagsgeschehens, veränderter Bodeneigenschaften und des daraus resultierenden zukünftigen Erosionsrisikos werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

## 4.1 Starkniederschlagsgeschehen

Die Auswertung der mit WETTREG auf der Grundlage des A1B-Szenarios generierten Starkniederschläge weist auf ein zukünftig verändertes Starkniederschlagsgeschehen im Freistaat Sachsen hin: Häufigkeit, Zeitpunkt und Intensität der Starkregen verändern sich.

Die absolute Anzahl der Starkniederschläge mit Intensitäten  $\geq 0.1$  mm/min nimmt an den drei betrachteten Klimastationen in beiden Simulationszeiträumen - mit Ausnahme der Klimastation Oschatz im zweiten Simulationszeitraum – zukünftig ab. Die Differenzierung von West nach Ost (höhere Anzahl von Starkniederschlägen im Westen Sachsen, geringere Anzahl im Osten) bleibt erhalten. Die Abnahme der Anzahl der Starkniederschläge ist jedoch in Chemnitz am größten (-17 % bzw. -18 %), gefolgt von Görlitz (-7 bzw. -19 %). In der Region Oschatz nimmt die Anzahl der Starkniederschläge zunächst ab (-9 % im ersten Simulationszeitraum) und erreicht zum Ende des Jahrhunderts in etwa wieder das heutige Niveau (+5 %). Es ist in allen drei Regionen jedoch von einer deutlich veränderten Verteilung der zukünftigen Starkniederschläge auszugehen: Die Anzahl der Starkniederschläge nimmt besonders stark in den Monaten Mai bis September ab, in den Monaten Oktober bis April dagegen zu. Dieser Trend ist im zweiten Simulationszeitraum deutlicher ausgeprägt als im ersten.

Die durchschnittlichen Niederschlagssummen, die durch Starkregen verursacht werden, steigen nur in der Region Chemnitz um 18 % an, in den anderen beiden Regionen ist der Anstieg gering (3 % bzw. 2 %) und liegt im Fehlerbereich der Modellierung.

Die Anzahl der Starkniederschläge mit geringen Intensitäten ( $> 0.15$  mm und  $< 0.5$  mm/min) sinkt in den Regionen Chemnitz und Görlitz im Vergleich zum Referenzzeitraum. Im Gegensatz dazu steigt die Anzahl der Starkniederschläge mit hohen und sehr hohen Intensitäten ( $> 1.0$  mm/min), insbesondere in der Region Chemnitz. Dieser Unterschied prägt sich bis zum zweiten Simulationszeitraum noch stärker aus.

Im Raum Oschatz nehmen Starkregen aller Intensitätsklassen mit wenigen Ausnahmen zu. Das trifft insbesondere auf die Niederschläge mit Intensitäten zwischen 0.15 mm/min bis 1.0 mm/min zu. Starkniederschläge mit hohen und sehr hohen Intensitäten  $> 1.0$  mm/min kommen in allen drei Untersuchungsregionen häufiger vor, besonders in Chemnitz und Görlitz. Für die Einzugsgebiete Rasslitzbach (Klimastation Oschatz) und Viebigbach (Klimastation Görlitz) werden für jeden Simulationszeitraum ein bis zwei Extremniederschläge prognostiziert, die ähnlich hohe Gebietsausträge wie das Hochwasserereignis im August 2002 zur Folge haben.

Die Differenzierung im Jahresverlauf ist nicht einheitlich: Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Starkniederschlägen mit hohen und sehr hohen Intensitäten nimmt in der Region Chemnitz mit Ausnahme der Monate Februar und Mai in fast allen Simulationsläufen zu. Extreme Intensitäten treten in der 2. Jahreshälfte ab Juni zukünftig häufiger auf.

Für Oschatz werden solche Extreme vor allem für die Monate März, April, Juni, August und September prognostiziert. In den Wintermonaten werden Starkniederschläge mit mittleren Intensitäten etwas öfter vorkommen. In den Monaten Februar, Mai und Oktober nimmt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Starkniederschlägen mit mittleren und hohen Intensitäten dagegen ab.

In Ostsachsen (Klimastation Görlitz) nehmen Starkregen mit mittleren und hohen Intensitäten von Oktober bis April (mit Ausnahme des Januars) zu, von Mai bis September jedoch ab.

## 4.2 Einfluss des Klimas auf Bodeneigenschaften, die die Bodenerosion durch Wasser beeinflussen

Insbesondere die Bodenfeuchte, der Gehalt an organischem Kohlenstoff und der Bedeckungsgrad - Bodeneigenschaften, die die Bodenerosion durch Wasser beeinflussen - verändern sich infolge des Klima- und Landnutzungswandels. Diese Arbeit enthält eine Übersicht aus aktuellen Veröffentlichungen der Klimafolgenforschung über das erwartete Ausmaß dieser Veränderungen.

### 4.2.1 Bodenfeuchte

Eine geringere Bodenfeuchte führt, sofern keine Hydrophobizitäts- und Luftpolstereffekte auftreten, zu einer verringerten Erosionsrate.

Die Bodenfeuchten wurden auf der Grundlage der gemessenen und mit WETTREG simulierten Klimadaten (Tagesmittel Temperatur, Niederschlag und Globalstrahlung) taggenau berechnet (PILZ 2011). Weil die durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssummen in allen drei Regionen abnehmen und die Sonnenscheindauer dagegen zunimmt, nimmt auch die durchschnittliche Bodenfeuchte ab. Die Anzahl der Tage, an denen die Böden Feldkapazität erreichen, sinkt. Das betrifft besonders die Regionen Chemnitz und Görlitz, weil hier die Abnahme der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssumme stärker ausfällt als in Oschatz. Der Zeitraum zwischen dem Beginn der Ausschöpfung des Bodenwasserspeichers ab Feldkapazität im Frühjahr bis zur Wiederbefüllung im Herbst verlängert sich. Damit verlängert sich die sommerliche Trockenperiode. Diese Tendenz tritt im zweiten Simulationszeitraum (2091-2100) besonders deutlich hervor. Die Anzahl der Tage mit „sehr feuchten“ Werten ( $pF \leq 2.1$ ) nimmt in allen drei Regionen stark ab, die Anzahl der Tage mit „feuchten“ und „schwach feuchten“ Werten ( $pF 2.7-4.0$ ) nimmt zu. In der Region Oschatz kommen Tage mit „trockenen“ Werten ( $pF > 4.0$ ) hinzu, die im Referenzzeitraum nicht aufgetreten sind (Einteilung nach KA5).

### 4.2.2 Gehalt an organischem Kohlenstoff

Die Veränderung des Gehaltes an organischem Kohlenstoff bewirkt eine gleichgerichtete lineare Veränderung des Bodenabtrages.

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden hängt von einer Vielzahl biologischer, chemischer, physikalischer und anthropogener Faktoren (z. B. Zusammensetzung des Edaphons, Nährstoffverfügbarkeit, Wasser- und Luftgehalt, Bodenart, Fruchtfolge) ab. Steigt die Temperatur, wird Kohlenstoff durch eine erhöhte mikrobielle Aktivität abgebaut. Weil die Angaben über die Abbauraten des organischen Kohlenstoffs in Böden infolge des Klimawandels in der Literatur eine große Streuung aufweisen, wurde für das Szenario „Veränderter Gehalt an organischem Kohlenstoff“ eine durchschnittliche Abnahme von 0.1 % bis 2050 und 0.2 % bis 2100 angenommen.

Durch konservierende Bodenbearbeitung mit hoher Mulchbedeckung erhöht sich der Corg-Gehalt in den oberen Zentimetern des Bodens langfristig. Beim Szenario „konservierende Bodenbearbeitung“ wurde der Anteil des organischen Kohlenstoffes bei der Direktsaatvariante (70 % Mulch) um 1 % erhöht. Der bei der Grubberbearbeitung hinterlassene Mulchanteil von oft nur 20 % wird als zu gering erachtet, um eine Anreicherung von organischem Kohlenstoff unter den Bedingungen des Klimawandels zu erreichen.

### 4.2.3 Bedeckungsgrad

Der Bedeckungsgrad des Bodens wird durch eine veränderte Phänologie, andere Fruchtfolgen, Landnutzungen und Ertragsänderungen beeinflusst. Eine geringere Bodenbedeckung führt in der Regel zu erhöhtem Bodenabtrag.

Prozesse wie die Abnahme des Bedeckungsgrades durch Trockenstress und Zunahme durch CO<sub>2</sub>-Düngung (zumindest bei C3-Pflanzen) scheinen sich nach MIRSCHEL et al. (2009b) in etwa auszugleichen. Bei Winterkulturen sind die für die Bodenbedeckung bedeutenden Phasen des Schossbeginns und des Ährenschiebens im Frühjahr unabhängig vom Termin der Aussaat im

Herbst. In diesen Zeiträumen werden die Temperaturänderungen gering sein, auch unterliegt das Auftreten von Spätfrösten kaum einer Veränderung (KÜCHLER & SOMMER 2005). Demzufolge werden sich auch die Aussattermine der Sommerfrüchte kaum verändern. Eine Änderung der Bodenbedeckung um beispielsweise 5-10 % aufgrund eines schnelleren Wachstums hat nur eine sehr geringe Abnahme des Bodenabtrages zur Folge. Ein radikaler Schritt ist jedoch die Ernte, die mit einer abrupten Änderung der Bodenbedeckung und der Bodenstruktur einhergeht. Mit Ausnahme von Raps verfrühen sich die Erntetermine (ESTRELLA 2007).

## 4.3 Bodenerosion durch Wasser

### Einzugsgebiet Dittersdorfer Bach

Das Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches südlich der Klimastation Chemnitz repräsentiert die flächenmäßig große Region „Untere und mittlere Lagen des Erzgebirges“. Die Erosionsgefährdung der sandig- und schluffig-lehmigen Böden ist mittel bis gering (SCHINDEWOLF 2009). Im gesamten Referenzzeitraum wurde bei Annahme einer typischen Fruchtfolge und konventioneller Bodenbearbeitung ein Bodenaustrag von 22 t/ha berechnet.

Die Simulationen mit EROSION 3D ergeben, dass sich der Bodenaustrag durch Wasser im Zeitraum 2041-2050 im Vergleich zum Referenzzeitraum bei gleichbleibender Bodenbearbeitung und Fruchtfolge verdreifacht. Bis zum Ende des Jahrhunderts (zweiter Simulationszeitraum 2091-2100) nimmt der Bodenaustrag wieder ab und erreicht in etwa wieder das heutige Niveau. Erosionsereignisse kommen am häufigsten in den Monaten Juni bis September vor, die Monate Juli und August sind besonders stark betroffen. Aufgrund der veränderten Verteilung der Starkniederschläge kommt es im zweiten Simulationszeitraum zu einer Verschiebung der Erosionsereignisse in die Frühjahrs- und Herbstmonate.

Durch dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung ist es im Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches auch unter zukünftigen Klimabedingungen ohne zusätzliche Bodenschutzmaßnahmen möglich, die Bodenerosion durch Wasser um ca. 90 % (Grubberbearbeitung) bis 97 % (Direktsaat) zu reduzieren.

### Einzugsgebiet Rasslitzbach

Das Einzugsgebiet des Rasslitzbaches südöstlich der Klimastation Oschatz repräsentiert den Naturraum des „Mittelsächsischen Lösshügellandes“. Die intensiv ackerbaulich genutzten Lössböden dieses Naturraums sind stark erosionsgefährdet (SCHINDEWOLF 2009).

Für das Einzugsgebiet Rasslitzbach wurde im Referenzzeitraum ein Gesamtaustrag von 111 t/ha berechnet. Der Austrag ist damit trotz einer deutlich geringeren Anzahl von Starkniederschlägen mit durchschnittlich niedrigeren Intensitäten etwa fünfmal höher als im Einzugsgebiet des Dittersdorfer Baches.

Für den ersten Simulationszeitraum (2041-2050) wird eine leichte Erhöhung des Bodenaustrages um etwa 13 % simuliert. Auch im zweiten Simulationszeitraum bleibt der Bodenaustrag auf einem sehr hohen Niveau, erhöht sich aber im Vergleich zum Referenzzeitraum nicht signifikant. Der Trend zur Verlagerung der Erosionsereignisse von den Sommermonaten Juli und August in das zeitige Frühjahr (März, April) und in den Spätherbst (November) wird auch in diesem Einzugsgebiet deutlich.

Der berechnete Bodenaustrag unter zukünftigen Klimabedingungen bei Grubberbearbeitung beträgt zwar nur noch 76-89 % des bei konventioneller Bodenbearbeitung simulierten Bodenaustrages, doch entspricht das noch immer einem Gebietsaustrag von 17-28 t/ha in der Dekade. Durch Direktsaat ließe sich der Bodenaustrag weiter deutlich um 92-97 % auf 4-10 t/ha pro Dekade reduzieren.

### Einzugsgebiet Viebigbach

Das Einzugsgebiet des Viebigbaches befindet sich südwestlich der Klimastation Görlitz im „Oberlausitzer Lösshügelland“. Wie im Einzugsgebiet des Rasslitzbaches ist die vorherrschende Bodenart mittel-toniger Schluff (Ut3), die bei intensiver landwirtschaftlicher Nutzung stark erosionsgefährdet ist.

Durch eine höhere Anzahl von Starkniederschlägen mit extremen Spitzenintensitäten ( $> 1.0$  mm/min) wurde im Referenzzeitraum bei ähnlicher Fruchtfolge wie im Einzugsgebiet des Rasslitzbaches ein Bodenaustrag von 160 t/ha berechnet.

Für den ersten Simulationszeitraum wurden für den MIN-Lauf um 23 % höhere Bodenausträge (197 t/ha) als im Referenzzeitraum simuliert. Ursache sind mehrere in dieser Dekade auftretende extreme Starkregen mit Intensitäten  $> 2.0$  mm/min, die auf Zeitpunkte datiert sind, an denen der Boden eine sehr geringe Bodenbedeckung und eine sehr hohe Bodenfeuchte aufweist (direkt nach der Ernte, März, Oktober, November). Bei drei dieser Ereignisse ist der Bodenaustrag nur unwesentlich niedriger, als der für August 2002 berechnete. Im MAX-Lauf kommt nur ein solch extremes Starkregenereignis vor. Der in der gesamten Dekade im MAX-Lauf simulierte Bodenaustrag ist mit 54 t/ha um 66 % geringer als im Referenzzeitraum. Trotz dieser Prognoseunsicherheit, die auf eine stärkere Heterogenität des zukünftigen Starkniederschlagsgeschehens in dieser Region zurückzuführen sein könnte, bleibt das zukünftige Erosionsrisiko bis Mitte des Jahrhunderts auf einem hohen Niveau, es steigt aber nicht eindeutig an.

Im Vergleich zum Referenzzeitraum wurden für den zweiten Simulationszeitraum bis zum Ende des Jahrhunderts bei beiden Läufen geringere Bodenausträge (14 t/ha und 70 t/ha) berechnet. Die prognostizierte Anzahl der Starkniederschläge mit extremen Intensitäten ist zwar doppelt so hoch wie im Referenzzeitraum, jedoch wird aufgrund der niedrigeren Bodenfeuchten ein geringerer Bodenaustrag simuliert. Das Erosionsrisiko nimmt bis zum Ende des Jahrhunderts ab, jedoch können sehr selten auftretende Starkregen mit hohen Intensitäten zu extrem hohen Gebietsausträgen führen. Dabei steigt das Risiko für das Auftreten solcher Erosionsereignisse in den Herbst- und Frühjahrsmonaten und nimmt in den Sommermonaten ab.

Die hohen Bodenausträge, die für den MIN-Lauf im ersten Simulationszeitraum berechnet wurden, sind auch durch konservierende Bodenbearbeitung nicht zufriedenstellend reduzierbar. Durch Grubberbearbeitung würde sich der Bodenaustrag lediglich um 46 % vermindern (101 t/ha), durch Direktsaat um 76 % auf 48 t/ha. Für eine Abfolge von Extremereignissen in diesem Lauf, die auf Oktober 2041 datiert sind, wurde demonstriert, dass eine Umwandlung in Grünland oder Wald den Bodenaustrag durch Wasser deutlich minimieren würde.

Für alle drei Einzugsgebiete gilt:

Durch die erwartete Verringerung des Anteils an organischem Kohlenstoff in den Böden ist bei konventioneller Bodenbearbeitung mit einer zusätzlichen Erhöhung der Gebietsausträge um 2-4 % bis 2050 und um 5-13 % bis zum Ende des Jahrhunderts zu rechnen. Es wird davon ausgegangen, dass eine dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung mit hoher Mulchbedeckung zu einer Anreicherung von organischem Kohlenstoff im Oberboden führt, die die temperaturbedingte Abnahme zumindest ausgleichen kann.

Infolge einer früheren Ernte kann es in selten auftretenden Fällen zu erhöhten Bodenausträgen durch Wasser kommen. Entscheidend ist hierbei der Bodenzustand der Felder nach der Ernte. Je minimaler der Eingriff in die Bodenstruktur erfolgt und je höher die auf der Bodenoberfläche verbliebene Mulchbedeckung ist, desto weniger Boden wird abgetragen. Die schützende Mulchbedeckung sollte möglichst bis zur Saatbettbereitung für die Folgefrucht erhalten bleiben, der Umbruch erst unmittelbar vor der Einsaat erfolgen.

Weil Starkregen zukünftig häufiger in den Herbst- und Frühjahrsmonaten auftreten werden, besteht beim Anbau von Winterung in Folge ein hohes Erosionsrisiko im Zeitraum zwischen Einsaat im Herbst bis zum Erreichen einer vollständigen Bodenbedeckung im Frühjahr. In dieser Zeit weisen die Böden in der Regel auch eine höhere Bodenfeuchte als in den Sommermonaten auf. Bei einem z. B. unmittelbar nach der Einsaat auftretenden Starkniederschlag kann es zu sehr hohen Gebietsausträgen kommen, wenn nicht nur einzelne Schläge im Einzugsgebiet Saatbettzustand aufweisen, sondern alle Schläge. Durch eine diverse Fruchtfolge ist das Risiko auf wenige Schläge begrenzt.

Bei konventioneller Bodenbearbeitung verschlammten mit Mais bestellte Böden aufgrund der sehr späten Bodenbedeckung und des großen Reihenabstandes. Die verschlammte Oberfläche behält ihre infiltrationshemmenden Eigenschaften auch nach dem Erreichen einer vollständigen Bodenbedeckung. Durch die im Vergleich zu anderen Kulturen späte Ernte ist der Boden durch das dichte Blattwerk bis Mitte September relativ gut geschützt. Verbleiben nach der Ernte nur geringe Maisstrohanteile auf der Bodenoberfläche, beeinträchtigen die erntebedingte Verdichtung und die verschlammte Oberfläche die Infiltration. Durch den erhöhten Oberflächenabfluss wird mehr Boden in den Herbst- und Frühjahrsmonaten abgetragen. Der Bodenabtrag erhöht sich



in der simulierten Dekade 2041-2050 (MAX-Lauf) bei einem Monokulturanbau von Mais um 86 % gegenüber der gemischten Fruchtfolge. Auch hier gilt: je höher die Mulchbedeckung, desto geringer der Bodenabtrag.

Aus Sicht des Pflanzenschutzes ist ein Belassen von Maisstroh zunehmend problematisch, weil der bedeutendste Maisschädling, der Maiszünsler, im Stroh überwintert. Im Zuge der konventionellen Bodenbearbeitung sind die vollständige Beräumung des Strohs und ein Pflügen unmittelbar nach der Ernte notwendig. Folgt Mais auf Mais, verbleibt der Boden bis zur Neueinsaat dann im Zustand der Schwarzbrache. Durch die starke Belüftung des Bodens wird der Abbau von organischem Kohlenstoff allerdings beschleunigt. Die Simulationen ergaben, dass die Schwarzbrache aufgrund der hohen Rauigkeit starke Bodenabträge im Herbst verringern kann. Im Verlauf der Zeit nimmt die Rauigkeit durch zunehmende Verschlammung und Schneelast jedoch ab. Starkregen oder/und Schneeschmelze können zu Rinnen- und im Extremfall zu Grabenerosion führen.

Die Projektionen von WETTREG weisen eindeutig auf eine Zunahme von Trockenperioden im Frühjahr und Sommer vor allem in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts hin. In diesen Phasen trocknen die obersten Bodenschichten aus. In der Regel werden solche Trockenphasen durch konvektive Gewitterregen beendet oder unterbrochen, die Luft in diesen obersten Bodenschichten wird durch den nahezu sofort einsetzenden Oberflächenabfluss eingeschlossen und kann nicht entweichen. Infolge des Luftpolstereffektes werden Oberflächenabfluss und damit der Bodenabtrag durch Wasser stark erhöht. Die Bodenbearbeitung hat in diesem Falle zwar keinen entscheidenden Einfluss auf die Abflussmenge, jedoch lässt der Bodenabtrag sich durch konservierende Bodenbearbeitung deutlich reduzieren. In dieser Studie ist zunächst nur eine Abschätzung der Folgen des Luftpolstereffektes für ein Einzelbeispiel möglich. Es besteht Forschungsbedarf darüber, in welchem Maße sich die Infiltration durch Luftpolster und hydrophobe Bodenzustände verringert, wie lange ein Luftpolster aufrechterhalten wird und darüber, welche Bodeneigenschaften dazu führen können.

Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass die Landnutzung, die Bodenbearbeitung und die Bodeneigenschaften einen sehr viel größeren Einfluss auf das Ausmaß der Bodenerosion durch Wasser haben als das erwartete veränderte Starkniederschlagsgeschehen. Die absolute Anzahl der Starkniederschläge nimmt ab, die Niederschlagsintensitäten steigen und Risikozeiträume – wie in dieser Arbeit explizit ausgewiesen - verlagern sich. Somit können eine unangepasste Landnutzung und Bodenbearbeitung zu stark erhöhten Bodenausträgen führen. Die gegenwärtig eingesetzten präventiven Maßnahmen sind auch unter zukünftigen Klimabedingungen geeignet, Bodenabträge durch Wassererosion wirkungsvoll zu reduzieren. Weil die Flächenkonkurrenz von Nahrungs- und Energiepflanzenanbau zunehmen wird, sind Flächenstilllegung und Flächenumwandlung in Grünland oder Wald im großen Maßstab unwahrscheinlich.

Im nachhaltigen Ackerbau sind eine dauerhaft angewendete konservierende Bodenbearbeitung bis zur Direktsaat mit einem möglichst minimalen Eingriff in die gewachsene Bodenstruktur und einer hohen Mulchbedeckung die effektivsten Maßnahmen gegen Bodenerosion. In geringen Flächenumfängen kann ergänzend auf besonders erosionsgefährdeten Teilflächen eine dauerhafte Begrünung hohe Bodenabträge verhindern.

## 4.4 Diskussion

Die Ergebnisse dieser Studie beruhen auf den Projektionen des regionalen Klimamodells WETTREG mit Antrieb des Emissionsszenarios A1B auf der Grundlage des globalen Klimamodells ECHAM5-MPI/OM. Sie beschreiben lediglich einen realistischen Trend auf großmaßstäblicher Ebene, denn sowohl das globale und das regionale Klimamodell, als auch das zugrunde liegende Emissionsszenario ist jeweils eines von vielen, die durchaus unterschiedliche Entwicklungsmöglichkeiten aufzeigen. Um die Bandbreite dieser Entwicklungen abzuschätzen, wäre es wünschenswert, die hier aufgezeigte Methodik auch auf der Basis der Ausgabeparameter anderer Klimamodelle und verschiedener Emissionsszenarien anzuwenden. WETTREG ist zwar derzeit das einzige regionale Klimamodell, das die Niederschlagsdaten in der erforderlichen hohen Auflösung zur Verfügung stellt, aber die rasante Entwicklung der Klimaforschung und auch die Nachfrage seitens der Klimafolgenforschung lassen erwarten, dass bald auch andere Modelle in dieser Auflösung arbeiten werden.

Anhand der Heterogenität der ausgewerteten Niederschlags-Messreihen und der mit WETTREG abgeleiteten Aussagen über die Entwicklung des Starkniederschlagsgeschehens für die einzelnen Niederschlagsstationen ist ersichtlich, dass sich die Er-

gebnisse nicht auf große Regionen übertragen lassen. Sie gelten für den Raum, für welchen die jeweilige Niederschlagsstation repräsentative Daten liefert.

Die Bodenabtragsrechnungen beruhen auf Modellergebnissen des physikalisch begründeten Modells EROSION 3D. Das Modell wurde umfangreich validiert, jedoch basieren die Bodenparameter auf experimentell bestimmten Mittelwerten, die für die entsprechende Bodenart, Bodenbearbeitung, Fruchtart und deren Entwicklungszustand typisch sind. Der Anfangswassergehalt als Eingabeparameter für EROSION 3D ist selbst wiederum Modellergebnis des Modells METVER. So können durch eventuelle systematische Fehler verursachte zu hohe oder zu geringe Ausgabewerte von Modell zu Modell übertragen werden. Weil METVER Bodenwassergehalte, die die Feldkapazität übersteigen, nicht berücksichtigen kann, werden Extremsituationen wie beispielsweise das Hochwasserereignis im August 2002 nicht adäquat wiedergespiegelt.

Der mit der Datenmenge wachsende Arbeitsaufwand muss bei Erweiterung um verschiedene Emissionsszenarien automatisiert werden, um die Verarbeitung zu beschleunigen und um Fehler bei der manuellen Eingabe zu reduzieren. Allein in diesem Projekt wurden anhand von 1.915 gemessenen und 6.763 simulierten einzelnen Starkniederschlägen Parametersätze für die Erosionssimulationen erzeugt. Die Bodenfeuchten wurden für insgesamt 1.500 Jahre taggenau berechnet (zehn Jahre Referenzzeitraum, zwei Zukunftszeiträume á zehn Jahre, jeweils zwei Läufe MIN und MAX, fünf Fruchtarten, zwei Bodenarten, drei Einzugsgebiete).

Sinnvoll wäre die Entwicklung eines Softwaretools zur Übernahme der mit METVER berechneten Bodenfeuchten in die Eingabeparameterdateien von EROSION 3D.

Entscheidend für die Bewertung der Ergebnisse sind jedoch nicht die absoluten Gebietsausträge, sondern vielmehr die Relationen zwischen den Bodenausträgen im Referenzzeitraum und in den Zukunftszeiträumen. Die Fragestellungen nach den Auswirkungen der zu erwartenden veränderten Intensität und Verteilung von Starkniederschlägen, nach dem Einfluss sich verändernder Bodeneigenschaften, der veränderten Phänologie, anderer Fruchtfolgen und der Wirksamkeit von Bodenschutzmaßnahmen auf die Bodenerosion durch Wasser konnten nach dem gegenwärtigen Stand der Technik beantwortet werden. Ohne diese Modelle, so diskussionswürdig sie auch sein mögen, wäre das nicht möglich gewesen.

# Literaturverzeichnis

Das Literaturverzeichnis enthält zusätzlich zu den zitierten Veröffentlichungen Referenzen, die weiterführende Informationen zur Thematik „Folgewirkungen des Klimawandels“, zum Verständnis der verwendeten Modelle oder der Parametrisierung enthalten. Diese Quellen sind kursiv gedruckt.

- ABOTT, M. B., BATHERS, J. C., LUNGE, J. A., O'CONNEL, P. F., RASMUSSEN, J. (1986): An introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Européen, „SHE“. 2. Structure of physically based, distributed modelling systems.- J. of Hydrology, 87 (1), S. 61-77.
- BATHURST, J. C.; WICKS, J. M.; O'CONNEL, P. E. (1995): The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system. – In: SINGH, V. P. (ed.): Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publication, Colorado, S. 563-594.
- BEASLEY, D. B., HUGGINS, L. F. (1982): ANSWERS – Users Manual. – United States Environment Protection Agency, Report EPA-905/9-82-001.
- BERNHOFER, C., GOLDBERG, V. (2001): *CLISAX – Statistische Untersuchungen regionaler Klimatrends in Sachsen. Abschlussbericht des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (AKZ: 13-8802.3521/48), Dresden.*
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2005): *Glowa – Globaler Wandel des Wasserkreislaufes.* Red. Jens Schönlau, Bonn, Berlin 2005.
- BÖHM, U. (2000): *Eine Methode zur Validierung von Klimamodellen für die Klimawirkungsforschung hinsichtlich der Wiedergabe extremer Ereignisse. PIK-Report No. 63.*
- BÖTTCHER, F. (2007): *Klimawandel Grundlagen und mögliche Auswirkungen für die Landwirtschaft. Landwirtschaftliche Fachtagung der Initiative Weißeritz-Regio 06 12 2007 in Röhrsdorf.*
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (Hrsg.) (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung, KA5, 5.Auflage, Hannover.*
- Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (2005): FAL Jahresbericht.*
- Bundesministerium für Naturschutz, Umwelt und Reaktorsicherheit 2008: *Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.* [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf).
- BURKART, S., MANDERSCHIED, R., WEIGEL, H.-J. (2004): Interactive effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations and plant available soil water content on canopy evapotranspiration and conductance of spring wheat. *European Journal of Agronomy*, 21, 401-417.
- CHMIELEWSKI, F.-M., MÜLLER, A., BRUNS, E. (2004): Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany 1961\_2000. *Agriculture and Forest Meteorology* 121, 69-78.
- CHMIELEWSKI, F.-M.; RÖTZER, T. (2002): Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. *Clim-Res.* 19(1), 257-264.
- CHRISTENSEN, J. H. (Co-ordinator) (2005): *Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risk and Effects. PRUDENCE EVK2-CT2001-00132. Final report.*
- DEINLEIN, R., SCHOGER, H. (1997): *Concept Erosion damages assessment.* IBW Umwelttechnik, Wolf-Blumenthal-Ingenieurbüro, Nürnberg.
- DE ROO, A. P. J.; WESSLING, C. G.; CREMERS, N. H. D. T.; OFFERMANS, R. J. E.; RITSEMA, C. J.; VAN OOSTINDIE, K. (1994): *LISEM: A new physically based hydrological and soil erosion model in a GIS-environment, theory and implementation. – IAHS Publ. No. 224, S. 439-448.*
- DIETZER, B. (2000): *Langzeitverhalten extremer Niederschlagsereignisse – Ergebnisse KLIWA. In: Arbeitskreis KLIWA: Klima-veränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. KLIWA-Berichte 1, 46-67.*
- DWA (2009): *Arbeitsblatt DWA-A 530 Beobachteranleitung für nebenamtliche Niederschlagsstationen Nst (A) und Nst (K) (BAN).* Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Hennef.
- DWD (2005): *Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen.* Offenbach/Hannover, Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie.
- ENKE, W. (2003a): *Abschlussbericht: Anpassung der Sachsen - Wetterlagenklassifikation für Thüringen und Anwendung auf das Szenario ECHAM4 OPYC3 des Klimasimulationslaufes B2 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für Thüringen - REWA Thüringen. Forschungsbericht.*

- ENKE, W. (2003b): Anwendung einer Wetterlagenklassifikation für Süddeutschland auf Kontrolllauf und Szenario eines transienten ECHAM4 Klimasimulationslaufes (Szenario B2) zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für Süddeutschland. (Werkvertrag B. Nr. 50000099 KLIWA). Forschungsbericht.
- ENKE, W. (2003c): Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM OPYC3 Klimasimulationslaufes, bis 2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen/Landesamt für Umwelt und Geologie Hessen, Wiesbaden. (Werkvertrag 2003/00082). Forschungsbericht.
- ENKE, W. (2003d): Anwendung eines Verfahrens zur wetterlagenkonsistenten Projektion von Zeitreihen und deren Extreme mit Hilfe globaler Klimasimulationen/Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Forschungsbericht.
- ENKE, W. (2003e): Regionaler Wandel im Freistaat Sachsen. AZ. 13-8802.3521/51, Im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie.
- ENKE, W. (2002): Abschätzung der zukünftigen Klimatischen Entwicklung in Süddeutschland. (Werkvertrag B. - Nr. 10029524/43 KLIWA). – Forschungsbericht.
- ENKE, W. (2001): Regionalisierung von Klimamodell – Ergebnissen des statistischen Verfahrens der Wetterlagenklassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse für Sachsen. Abschlussbericht, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Dresden.
- ENKE, W., DEUTSCHLÄNDER, TH., SCHNEIDER, F., KÜCHLER, W. (2005): *Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. Meteorologische Zeitschrift 14, 247–257.*
- ENKE, W. (2001): *Regionalisierung von Klimamodell – Ergebnissen des statistischen Verfahrens der Wetterlagenklassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse für Sachsen, Abschlussbericht, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Januar 2001.*
- ENKE, W. (2003): Regionaler Wandel im Freistaat Sachsen. AZ. 13-8802.3521/51, Im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie.
- ENKE, W., SPEKAT, A. (1997): *Downscaling Climate Model Outputs into Local and Regional Weather Elements by Classification and Regression. Climate Research, 8, 195-207.*
- ERBS, M., FRANZARING, J., HÖGY, P., FANGMEIER, A. (2008): Free-air CO<sub>2</sub> enrichment in a wheat-weed assembly – effects on water relations. *Basic and Applied Ecology 10, 358-367.*
- ESTRELLA, N. (2007): Räumliche und zeitliche Variabilität von phänologischen Phasen und Reaktionen im Zuge von Klimaveränderungen. (*Spatial and temporal variability of phenological events and responses due to climate change*). Dissertation, TU München.
- ESTRELLA, N., SPARKS, T.H., MENZEL, A. (2007): Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology 13, 1737-1747.*
- EULENSTEIN, F., GLEMNITZ, M. (2007): Einfluss des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt, Erträge landwirtschaftlicher Kulturen und Biozönosen auf Ackerflächen. 15. Landschaftstag Auswirkungen des Klimawandels auf Natur und Landschaft, Magdeburg 15.09.2007.
- FERREIRA, A. G., SMITH, R. E. (1992): Opus: An integrated simulation model for transport of nonpoint-source pollutants at the field scale. In: User manual. USDA-ARS ARS-98 Vol. II (1992), 200.
- FESKE, N. (2009): Globale Klimasimulationen - Vergleichende Analyse globaler Klimamodellsimulationen für Mitteleuropa und umliegende Gebiete. LfULG Heft 25/2009.
- FISSORE, C., GIARDINA, C. P., KOLKA, R. K., TRETTIN, C. C., KING, G. M., JURGENSEN, M.F., BARTON C. D., McDOWELL S. D. (2008): Temperature and vegetation effects on soil organic carbon quality along a forested mean annual temperature gradient in North America. *Global Change Biology 14, 193-205.*
- FLACKE, W., AUERSWALD, K., NEUFANG, L. (1990): Combining a modified USLE with a digital terrain model for computing resolution maps of soil loss resulting from rain wash. *Catena, 17, 383-397.*
- FRITZ, J. (2009): Praktikumsbericht. Büro für Angewandte Hydrologie München.
- GERLINGER, K., 1997: Erosionsprozesse auf Lössböden. Dissertation am Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe.
- GERSTENGARBE, F.-W., BADECK, F., HATTERMANN, F., KRYSANOVA, V., LAHMER, W., LASCH, P., STOCK, M., SUCKOW, F., WECHSUNG, F., WERNER, P.C. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven – PIK-Report No. 83. Potsdam.
- GERSTENGARBE, F.-W., WERNER, P. C. (1997): Eine objektive Klimaklassifikation für Deutschland. *Ann. Meteor., 34, 73-74.*

- GREEN, W. H.; AMPT, G. A. (1911): Studies on soil physics. I: The flow of air and water through soils. J. Agr. Sci. 4, S. 1-24.
- GROSCH, J. (2007): In-situ Untersuchung zur Infiltrationsleistung von Löß-Ackerböden unter Direktsaat mit Berücksichtigung typischer Fruchtfolgen. Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg.
- HAFERKORN, U. (2000): *Größen des Wasserhaushaltes verschiedener Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung im klimatischen Grenzraum des Mitteldeutschen Trockengebietes – Ergebnisse der Lysimeterstation Brandis. Dissertation. Georg-August Universität Göttingen.*
- HÄNSEL, S., KÜCHLER, W., MATSCHULLAT, J. (2004): Regionaler Klimawandel Sachsen. Extreme Niederschlagsereignisse und Trockenperioden 1934-2000. *UWSF – Z Umweltchem Ökotox*, 17/3, 159-165.
- HARTGE, K. H. (1978): Die physikalische Untersuchung von Böden. 2. Auflage, Stuttgart.
- HEBEL, B. (2003): Validierung numerischer Erosionsmodelle in Einzelhang- und Einzugsgebiet-Dimension. Dissertation Universität Basel, *Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie.*
- HENSEL, H., BORK, H.-R. (1988): EDV-gestützte Bilanzierung von Erosion und Akkumulation in kleinen Einzugsgebieten unter Verwendung der modifizierten Universal Soil Loss Equation. *Landschaftsökologisches Messen und Auswerten*, 2.2/3, 106-136, TU Braunschweig.
- HOLY, M., VASKA, J., VRANA, K. (1988): Technical Papers – Water Engineering Management. University Prague, Serie V, No. 8.
- HU Berlin (2003): *KLIVEG – Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen. Abschlussbericht des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Berlin.*
- HÜLSBERGEN, K. J., KÜSTERMANN, B. (2007): Überzogene Erwartungen. DLG-Mitteilungen Nr. 11, 58–61.
- IPCC (2007): Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).
- JACOB, D., GÖTTEL, H., KOTLARSKI, S., LORENZ, P., SIECK, K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Abschlussbericht. Umweltbundesamt. UBA-Bericht 11/2008: UBA-FB 000969.
- JACOB, D. (2001): A note to simulation of the annual and inter annual water budget of Baltic Sea drainage. *Meteorology and Atmospheric Physics* 77, pp. 61–73.
- JONAS, M., STAEGER, T., SCHÖNWIESE, C.D. (2005): *Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaveränderungen – Schwerpunkt Deutschland. Abschlussbericht zum UBA-Forschungsvorhaben Nr. 20141254.*
- JONES, M.H., CURTIS, P.S. (2000): Bibliographie on C=2 Effects on Vegetation and Ecosystems 1990-1999 Literature. ORNL/CDIAC-129. <http://cdiac.esd.ornl.gov/epubs/cdiac/cdiac129/cdiac129.html>.
- JUNGCLAUS, J. H., BOTZET, M., HAAK, H., KEENLYSIDE, N., LUO, J.-J., LATIF, M., MAROTZKE, J., MIKOLAJEWICZ, U., ROECKNER, E. (2006): Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM. *Journal of Climate* 19, 3952-3972.
- JUNGHÄNEL, T. (2010): Vergleich verschiedener Wasserhaushaltsmodelle mit gemessenen Parametern an Bodendauerbeobachtungsflächen in Sachsen. Bachelorarbeit Fakultät für Physik und Geowissenschaften der Universität Leipzig.
- KELLER, T. (2006): Vergleich unterschiedlicher, landwirtschaftlicher Bearbeitungsmethoden hinsichtlich der Akkumulation von Humus, organischem Kohlenstoff und Gesamtstickstoff innerhalb der Ackerkrume, nach langjährig differenzierter Bewirtschaftung. Diplomarbeit. Universität Leipzig.
- KERN, B. (2009): Hochaufgelöste Modellsimulationen mit dem COSMO Modell zur Konvektionsauslösung im Schwarzwald im Rahmen des COPS Feldexperimentes - Eine Fallstudie. Diplomarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- KIRSCHBAUM, M. U. F. (1995): The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biol. Biochem.* 27, 753–760.
- KLIWA-Monitoringbericht 2011: Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA.
- KLIWA-Berichte Heft 10, 2006: 3. KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 – Fachvorträge: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.
- KLIWA-Berichte Heft 9, 2006: 2. Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt.
- KLIWA-Berichte Heft 4, 2004: 2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg – Fachvorträge: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.
- KLÖCKING, B., HAFERKORN, U., BRÄUNING, A. (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt in Sachsen - Modellierung und Lysimeterbeobachtungen. 13. Gumpensteiner Lysimetertagung 2009, 127 – 130.
- KLÖCKING, B., MEY, S., FERBER, F., WESSOLEK, G., TRINKS, S. (2008): *Bodenatlas Sachsen – Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Bodenwasserhaushalt – Endbericht. Berlin/München. LfULG, Az. 13-0345.46/340.*

- KNISEL, W. D. (ed.) (1980): CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural managed systems. – USDA, Conservation Research Report 26.
- KOLBE, H. (2009): Klimawandel und C-Sequestrierung - Auswirkungen differenzierter Land- und Bodenbewirtschaftung auf den C- und N-Haushalt der Böden unter Berücksichtigung konkreter Szenarien der prognostizierten Klimaänderung im Freistaat Sachsen. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 23/2009.
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., LAHMER, W., ORLOWSKI, B., GERSTENGARBE F.-W., SCHALLER, E., JACOB, D., GÖTTET, H. (2008): Evaluierung und Synopse beobachteter und projizierter Klimate für Sachsen und Umgebung auf der Basis deutscher statistischer und dynamischer Regionalmodelle (REGKLIM). Abschlussbericht Im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie AZ 13-8802.26/10/3.
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., ENKE, W. (2009): *Abschätzung zukünftiger Starkregeneignisse im Rahmen von Klimamodellen. Präsentation Bodenschutz und Klima II – Workshop, Dresden 27. – 28.04.2009.*
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., ENKE, W. (2010): Erstellung von zeitlich hoch aufgelösten Szenarien. Im Auftrag der TU Bergakademie Freiberg, Bereich Boden- und Gewässerschutz, Auftragsnummer 1260-10.
- KÜCHLER, W. (2009): Evaluierung des Forschungsvorhabens REGKLIM. Persönliche Mitteilung, unveröffentlicht.
- KÜCHLER, W. (2007): Klimawandel in Sachsen, Sachstand und Ausblick. Präsentation auf dem Kongress der Grünen-Fraktion „Klimawandel in Sachsen“ in Dresden 01.12.2007.
- KÜCHLER, W., FESKE, N. (2009): Evaluierung und Synopse beobachteter und projizierter Klimate für Sachsen und Umgebung auf der Basis deutscher statistischer und dynamischer Regionalmodelle (REGKLIM). Dresden-Pillnitz.
- KÜCHLER, W., SOMMER, W. (2005): Klimawandel in Sachsen – Sachstand und Ausblick 2005. Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft.
- LANE, L. J., NEARING, M. A. (1989): USDA – Water Erosion Prediction Project: hillslope profile model documentation. – National Soil Research Laboratory, USDA – Agric. Research Service Report 2.
- LATIF, M. (2003): Simulation und Vorhersage von ENSO-Extremen. PROMET 29, 1-4.
- LEHNHART, K. (2008): The effects of long-term Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) on soil aggregation, soil carbon input, and ecosystem CO<sub>2</sub> dynamics in a temperate grassland ecosystem. Dissertation, JLU Gießen.
- LEONARD, R. A., KNISEL, W. G., STILL, D. A. (1987): GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems. Trans., Amer. Soc. of Agric. Engrs. 30, 1403-1418.
- LINDNER, M. (1998): *Wirkung von Klimaveränderungen in mitteleuropäischen Wirtschaftswäldern. PIK-Report No. 46.*
- LORENZ, M. (2009): Phänologische Daten 1981-2009 für Winterweizen am Standort Nossen. persönliche Mitteilung, aus: Workshop Land- und Forstwirtschaft – TP 3.3.1, 15./16.10.2009 Radebeul.
- LOTZE-CAMPEN, H., CLAUSSEN, L., DOSCH, A., NOLEPPA, S., ROCK, J., SCHULER, J., UCKERT, G. (2009): *Klimawandel und Kulturlandschaft Berlin. PIK-Report No. 113.*
- MCCUEN, R. H.; SNYDER, W. M. (1986): Hydrologic modeling: statistical methods and applications. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- MEIßNER, C. (2008): High-resolution sensitivity studies with the regional climate model COSMO-CLM. Dissertation. Universität (TH) Karlsruhe.
- MENZEL, A., SPARKS, T.H., ESTRELLA, N., KOCH, E., AASA, A., AHAS, R., ALM-KÜBLER, K., BISSOLLI, P., BRASLAVSKA, O., BRIEDE, A., CHMIELEWSKI, F.-M., CREPINSEK, Z., CURNEL, Y., DAHL, A., DEFILA, C., DONNELLY, A., FILELLA, Y., JATCZAK, K., MAGE, F., MESTRE, A., NORDLI, O., PENUELAS, J., PIRINEN, P., REMISOVA, V., SCHEIFINGER, H., STRIZ, M., SUSNIK, A., VAN VLIET, A.J.H., WIELGOLASKI, F.-E., ZACH, S., ZUST, A. (2006): European phenological response to climate change matches the warming pattern. Glob. Change Biol. 12, 1-8.
- MICHAEL, A. (2000): Anwendung des physikalisch begründeten Erosionsprognosemodells EROSION 2D/3D Empirische Ansätze zur Ableitung der Modellparameter. Dissertation TU Bergakademie Freiberg, Freiburger Forschungshefte, Reihe Geowissenschaften.
- MICHAEL, A. (1994): *Anwendung des Bodenerosionsmodells EROSION 2D unter Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Variabilität bodenphysikalischer, meteorologischer und nutzungsbezogener Modellparameter im Einzugsgebiet der Talsperre Saidenbach/Ostertzegebirge. Teilleistung zum Endbericht zum BMFT-Vorhaben 0339233B, Freiberg.*
- MICHAEL, A. (1992-1996): *Bodenerosionsmessprogramm. Zwischenberichte 1 – 12 im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie und der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Freiberg und Leipzig.*
- MICHAEL, A., SCHMIDT, J., ENKE, W. (2006): *Climate Change and Soil Erosion - Results of Comparative Simulations for a catchment in Saxony/Germany. The 14th International Soil Conservation Organisation Conference, May 14-19, 2006, Marrakech, Morocco.*

- MICHAEL, A., SCHMIDT, J., ENKE, W., DEUTSCHLÄNDER, T. & MALITZ, G. (2005): Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss – results of comparative model simulations. *Catena* 61, 155-164.
- MICHAEL, A., VON WERNER, M., SCHMIDT, J. (2003): Abschätzung des Sediment- und Nährstoffeintrages in Oberflächengewässer mit dem Erosionsprognosemodell EROSION 3D (Beispiel Mehltheuerbach). in S. W. DECH et al. (Hrsg.): Tagungsband 20. DFD-Nutzerseminar, 6.-8. Oktober 2003.
- MICHAEL, A., SCHMIDT, J., SCHMIDT, W. A. (2000a): Handbuch EROSION 2D/3D, Band 2, Parameterkatalog. Im Auftrag der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft und des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Leipzig und Freiberg.
- MICHAEL, A., VON WERNER, M., SCHMIDT, J. (2000b): Abschätzung des Sediment- und Nährstoffeintrages in Oberflächengewässer mit dem Erosionsprognosemodell EROSION 3D. In: *Materialien zur Wasserwirtschaft: Ökologische Studie - Beiträge zur Entwicklung eines ökologischen Leitbildes für Flusslandschaften am Beispiel der Jahna, einem bedeutenden Nebenfluss der Elbe in Sachsen. EXPO-Projekt 2000*, Hrsg.: Freistaat Sachsen, S. 16-25, Dresden.
- MICHAEL, G., 2012: Auswirkungen des Klimawandels auf die Entwicklung von Starkniederschlägen. Wissenschaftliches Schülerprojekt am Martin-Anderson-Nexö-Gymnasium, betreut von der TU Bergakademie Freiberg, unveröffentlicht.
- MIRSCHER, W., WENKEL, K.-O., WIELAND, R., KÖSTNER, B. (2009a): Klimawandel und Landwirtschaft. LfULG. Fachliche Grundlage für die Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel.
- MIRSCHER, W., WENKEL, K.-O., WIELAND, R., LUZI, K., ALBERT, E., KÖSTNER, B. (2009b): Klimawandel und Ertragsleistung - Auswirkungen des Klimawandels auf die Ertragsleistung ausgewählter landwirtschaftlicher Fruchtarten im Freistaat Sachsen - eine landesweite regionaldifferenzierte Abschätzung. LfULG Heft 28/2009.
- MORGAN, R. P. C., QUINTON, J. N., RICKSON, R. J. (1993): EUROSEM: a user guide. – Silsoe College, Cranfield University, UK.
- MOSS, R. H., EDMONDS, J. A., HIBBARD, K. A., MANNING, M. R., ROSE, S. K., VAN VUUREN, D. P., CARTER, T. R., EMORI, S., KAINUMA, M., KRAM, T., MEEHL, G. A., MITCHELL, J. F. B., NAKICENOVIC, N., RIAHI, K., SMITH, S. J., STOUFFER, R. J., THOMSON, A. M., WEYANT, J. P. & THOMAS J. WILBANKSET (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature* 463, 747-756, 2010.
- MÜLLER, J. (1987): Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete in ausgewählten Vegetationsabschnitten und deren statistische, modellmäßige und kulturbezogene Bewertung. Dissertation Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- NEARING, M. A.; DEER-ASCOUGH, L.; LAFFLEN, J. M. (1990): Sensitivity analyses of the WEPP hillslope profile erosion model. *Transactions of the ASAE* 33 (3).
- NITZSCHE, O. (2009): Bodenbearbeitung und Humushaushalt von Ackerflächen im Hinblick auf den Klimawandel. Vortrag Workshop Bodenschutz und Klimawandel II, 27.04.2009, Dresden.
- NITZSCHE, O. (2007): Entwicklung der C-Masse und C-Verteilung in der Ackerkrume in Abhängigkeit einer langjährig differenzierten Bodenbearbeitung. VDLUFA-Schriftenreihe, Kongressband 2006, 62, 128-135.
- PARMESAN, C., YOHE, G. (2003): A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421, 37-42.
- PIK - Potsdam Institute for Climate Impact Research (2004): ATEAM: Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling. Final report 2004.
- PILZ, C. I. (2011): Einfluss des Klimawandels auf die Bodenfeuchte im Oberboden – vergleichende Modellsimulationen mit dem Modell METVER auf der Grundlage von WETTREG-Klimaszenarien. Bachelorarbeit TU Bergakademie Freiberg.
- PÖHLER, H., CHMIELEWSKI, F.-M., JASPER, K., HENNIGES, Y., SCHERZER, J. (2007): *KliWEP* - Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe Weiterentwicklung von WaSiM-ETH: Implikation dynamischer Vegetationszeiten und Durchführung von Testsimulationen für sächsische Klimaregionen. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft vertreten durch das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie, Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Nr. 13-8802.3529/39-2.
- PONGRATZ, J., (2009): *A model estimate on the effect of anthropogenic land cover change on the climate of the last millennium. Reports on Earth System Science* 68, MPI.
- RANDALL, D.A., WOOD, R.A., BONY, S., COLMAN, R., FICHEFET, T., FYFE, J., KATTSOV, V., PITMAN, A., SHUKLA, J., SRINIVASAN, J., STOUFFER, R.J., SUMI, A., TAYLOR, K.E. (2007): *Climate Models and Their Evaluation. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M.TIGNOR & H.L. MILLER (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.*

- RASMUSEN, P. E., COLLINS, H. P. (1991): Long-term impacts of tillage, fertilizer and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Adv. Agron.* 45, 93-134.
- RENARD, K. G., FERREIRA, V. A. (1993): RUSLE model description and database sensitivity. *J. of Environ-Mental Quality*, 22 (3).
- RESGAARD, J. C., STORM, B. (1995): MIKE SHE - In: SINGH, V. P. (ed.): *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publication, Colorado, 809-847.
- ROCKEL, B. (2008): Themenheft über COSMO-CLM in Meteorologischer Zeitschrift erschienen - Übersetzter Auszug aus dem Editorial "The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM)" in *Meteorologische Zeitschrift* 2008, volume 17/4. GKSS Forschungszentrum, Tuesday, 11-Nov-2008.
- ROECKNER, E., RUEDY, R., SCHMIDT, G., TAYLOR, K.E. (2003): Behavior of Tropopause Height and Atmospheric Temperature in Models, Reanalyses and Observations: Decadal Changes. *Journal of Geophysical Research* , 108 (D1), DOI: 10.1029/2002JD002258.
- RÖHRICHT, C., FREYDANK, S., SCHRÖDER, S. (2009): Energiefruchtfolgen für D-Südstandorte. Schriftenreihe des LfULG, Heft 26/2009.
- ROUNSWELL, M.D.A., EWERT, F., REGINSTER, I., LEEMANS, R., CARTER, T.R. (2005): *Future scenarios of European agricultural land use: II. Projecting changes in cropland and grassland. Agricultural Ecosystems & Environment* 107 (2-3): 117-135. ISSN 0167-8809. <http://www.sciencedirect.com> [cited 12.4.2005].
- SCHÄDLER, G., FELDMANN, H., PANITZ, H.-J., FRÜH, B., KOHLHEPP, R., KOTTMEIER, C. (2008): *Hochauflösende Simulation künftiger Starkniederschlagsereignisse (ReSiPrec)*. Präsentation Statusseminar Herausforderung Klimawandel.
- SCHALLER, M., WEIGEL, H.-J. (2007): Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. *Landbauforschung Völknerode – FAL Agricultural Research*, Sonderheft 316.
- SCHERZER, J., PÖHLER, H., JASPER, K., SAMES, D. (2006a): *KliWEP – Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe - Teil 2: Weiterentwicklung von WaSiM-ETH sowie Durchführung von Testsimulationen*. LfULG Abschlussbericht.
- SCHERZER, J., WRIEDT, G., SAMES, D., MÜLLER, M., HESSER, F., JASPER, K., PÖHLER, H. (2006b): *KliWEP – Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe - Teil 3: Vorstudie zur Simulation der Stoffflüsse von Stickstoff und Kohlenstoff im Parthe-Einzugsgebiet*. LfULG Abschlussbericht.
- SCHINDEWOLF, M. (2009): Flächendeckende Abbildung der Bodenerosion durch Wasser für Sachsen unter Anwendung des Modells Erosion 3D. Abschlussbericht im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Förderkennzeichen: 060113.
- SCHMIDT, J. (2000a): *Oberflächenabfluss und Erosion - Möglichkeiten und Grenzen der mathematischen Prozessbeschreibung*. *Zeitschrift f. Geomorphologie N.F., Suppl.-Bd. 123*, S. 1-12, Berlin, Stuttgart.
- SCHMIDT, J. (Ed.) (2000b): *Soil Erosion - Application of Physically Based Models*. Berlin, Heidelberg, New York.
- SCHMIDT, J. (1998): *Modellbildung und Prognose zur Wassererosion*. In: RICHTER, G. (Hrsg.): *Bodenerosion und Bodenschutz*, Darmstadt.
- SCHMIDT, J. (1997): *EROSION 2D/3D. International Workshop "Experiences with Soil Erosion Models", 06.-08.10.1997, Prague*.
- SCHMIDT, J. (1996): Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geeigneter landwirtschaftlicher Nutzflächen. In: *Berliner Geographische Abhandlungen*, Heft 61.
- SCHMIDT, J. (1992): *Modelling long-term soil loss and landform change*. In: ABRAHAM, A.J., PARSONS, A.D. (Eds.), *Overland Flow—Hydraulics and Erosion Mechanics*. University College London Press, London.
- SCHMIDT, J. (1990): A mathematical model to simulate rainfall erosion. *Catena* (Suppl. 19).
- SCHMIDT, J., v. WERNER, M. (2000): Modelling Sediment and Heavy Metal Yields of Drinking Water Reservoirs in the Osterzgebirge Region of Saxony (Germany). In: SCHMIDT, J. (Ed.): *Soil Erosion - Application of Physically Based Models*. Berlin, Heidelberg, New York.
- SCHMIDT, J., v. WERNER, M., MICHAEL, A. (1999a): *Application of the EROSION 3D Model to the Catsop Watershed, The Netherlands*. *Catena* 418.
- SCHMIDT, J., v. WERNER, M., MICHAEL, A., SCHMIDT, W. (1999c): *Planung und Bemessung von Erosionsschutzmassnahmen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen*. *Wasser und Boden*, H. 12/99.
- SCHMIDT, J., MICHAEL, A., SCHMIDT, W., v. WERNER, M. (1997a): *EROSION 2D/3D - Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser*. Hrsg.: *Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft*.



- SCHMIDT, W., MICHAEL, A., SCHMIDT, J. (1997b): *Ergebnisse von Bodenabtragsmessungen auf konservierend bestellten Ackerflächen als Beratungsgrundlage für wassererosionsmindernde Anbauverfahren in Sachsen. VDLUFA-Schriftenreihe 46, 675-679.*
- SCHOB, A., SCHMIDT, J., TENHOLTERN, R. (2004): *Derivation of site-related measures to minimise soil erosion on the catchment scale in the Saxonian loess belt using the model EROSION 3D. In: WÖHRLE, N. & SCHEURER, M.: EUROSOIL 2004 Abstracts and Full Papers September, 04 – 12 Freiburg/Germany.*
- SCHRAMM, M. (1994): Ein Erosionsmodell mit räumlich und zeitlich veränderlicher Rillenmorphologie. Dissertation am Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe.
- SCHWERTMANN, W., VOGL, W., KAINZ, M. (1987): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrages und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Stuttgart.
- SPEKAT, A., ENKE, W., KREIENKAMP, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRESS-Szenarios B1, A1B und A2. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 204 41 138.
- STOCK, M. (2005): KLARA - Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung, Summary PIK Report No. 99.
- STOCK, M. (2003): *Klimafolgenforschung - Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Gesellschaft. In: Climate Impact Research: 1. State of the art, 2. Case studies. Z. Umweltchem. Ökotox., 251-261, UWSF 15 (4), 2003.*
- STREITFERT, A., GRÜNHAGE, L. (2009): *Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen INKLIM 2012 Baustein II plus., Gießen.*
- TREBER, M. (2008): Neue IPCC-Szenarien für den Fünften Sachstandsbericht. <http://www.germanwatch.org/klima/mt08szen.pdf>.
- Umweltbundesamt (2008): Klimawirkungen und Anpassung in Deutschland. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungsbericht 204 41 138, UBA-FB 000969.
- Umweltbundesamt, 2006: *Klimaänderungen – Herausforderungen für den Bodenschutz. Workshop am 28. und 29. September 2005. Dessau.*
- VANHALA, P., KARHU, K., TUOMI, M., SONNINEN, E., JUNGER, H., FRITZE, H., LISKI, J. (2007): Old soil carbon is more temperature sensitive than the young in an agricultural field. *Soil Biology & Biochemistry* 39, 2967–2970.
- VON STORCH, H., GÜSS, S., HEIMANN, M. (1999): *Das Klimasystem und seine Modellierung*, Springer Verlag Berlin.
- VON STORCH, H. (1995): *Inconsistencies at the interface of climate impact studies and global climate research. Meteorol Z NF 4, 72-80.*
- VON WERNER, M. (1995): GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten. Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin.
- VON WERNER, M., SCHRÖDER, A., SCHMIDT, J. (2004): *Abschätzung des Oberflächenabflusses und der Wasserinfiltration auf landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Hilfe des Modells EROSION-3D, Forschungsbericht, LfUG Sachsen.*
- VON WERNER, M.; SCHMIDT, J. (1997): *EROSION 2D/3D - Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser - Band III: EROSION 3D Modellgrundlagen, Bedienungsanleitung. Hrsg.: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.*
- WALKENHORST, O., STOCK, M. (2009): Regionale Klimaszenarien für Deutschland - Eine Leseanleitung. ARL E-paper Nr. 6.
- WEBER, S. (2006): *Reaktionen einer Weizen-Wildkraut-Gemeinschaft auf erhöhtes CO<sub>2</sub> im FACE-Experiment: Proteomik, Physiologie und Bestandsentwicklung. Dissertation Universität Hohenheim.*
- WECHSUNG, F., GERSTENGARBE, F.-W.; LASCH, P., LÜTTGER A. (2008): *Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel, Summary PIK Report No. 112.*
- WEGEHENKEL, M. (2009): *Modeling of vegetation dynamics in hydrological models for the assessment of the effects of climate change on evapotranspiration and groundwater recharge. Adv. Geosci. 21, 109–115.*
- WEIGEL, H.-J. (2007): Studie des FAL (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft): Klimawandel – Fluch oder Segen für die Landwirtschaft?
- WEIGEL, H.-J.; DÄMMGEN, U. (2005): Free Air Carbon Dioxide Enrichment [FACE] <http://www.aoe.fal.de/index.htm?page=/co2projekt.htm>.
- WEIGEL, H.-J., MANDERSCHIED, R., PACHOLSKY, A., BURKART, S., JANSEN, G. (2005): Mehr CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre: Prima Klima für die Landwirtschaft?: Effekte auf Pflanzenwachstum und -qualität. *Forschungsrep Verbrauchersch Ern Landwirtschaft* 1, 14 – 17.
- WILKS, D.S. (1999): *Multiside downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator. Climate Research* 11, 125–136.

- WILLIAMS, J. R. (1985): The physical components of the EPIC model. – In: EL-SWAIFY, S. A.; MOLDENHAUER, W. C.; LO, A. (ed.): Soil Erosion and Conservation, Soil Conservation Society of America, 272-284.
- WILLIAMS J. R, BERNDT, H. D. (1977): Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Transactions of ASAE 20, 1100-1104.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. (1978): Predicting rainfallerosion losses - a guide to conservation planning. Agr. Handbook 537 (USDA), Washington.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. (1965): Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Agr. Handbook 292 (USDA), Washington D.C.
- WOOLHISER, D. A., SMITH, R. E., GOODRICH D. C. (1990): KINEROS: A kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. – USDA., Agric. Res. Service, ARS-77, March 1990.
- WURBS, D., STEININGER, M. (2011): Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden - Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Förderkennzeichen 3708 71 205, UBA-FB 001463.
- YOUNG, R. A., ONSTAD, C. A., BOSCH, D. D., ANDERSON, W. P. (1987): AGNPS, Agricultural Non-Point Source Pollution Model. A watershed analysis tool. - U.S. Department of Agriculture, Conservation Research Report 35.
- ZEBISCH, M. (2004): *Modellierung der Auswirkungen von Landnutzungsveränderungen auf Landschaftsmuster und Biodiversität. Dissertation TU Berlin.*
- ZEBISCH, M., GROTHMANN, T., SCHRÖTER, D., HASSE, C., FRITZSCH, U., CRAMER, W. (2005): *Klimawandel in Deutschland, Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Abschlussbericht des Umweltbundesamtes.*
- ZIBILSKE, L. M., BRADFORD, J. M., SMART, J. R. (2002): Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil. Soil & Tillage Research 66, 153–163.
- ZORITA, E., J.P. HUGHES, D.P. LETTENMAIER, H.V. STORCH (1995): Stochastic Characterization of Regional Circulation Patterns for Climate Model Diagnosis and Estimation of Local Precipitation. J. of Climate, 8, 1023-1042.

<http://www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/STAR/star.html>

[www.klimawandel-rlp.de](http://www.klimawandel-rlp.de)

<http://www.kliwa.de>

persönliche Mitteilung Dr. Stefan Hagemann, MPI Hamburg, 2009

persönliche Mitteilung Dr. D. Jacob, MPI, 2009

persönliche Mitteilung Dr. C. Meinke, GKSS, 2009

persönliche Mitteilung Dr. Uwe Böhm im Auftrag von Prof. Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe, PIK Potsdam, 2009

persönliche Mitteilung Dr. Gabriele Malitz, DWD, 2009

persönliche Mitteilung J. Stieber, HTW Dresden, 2011

persönliche Mitteilung Michael Zimmermann, LfULG, 2010

persönliche Mitteilung Dr. Walter Schmidt, LfULG, 2011

persönliche Mitteilung Dr. Frank Kreienkamp, CEC Potsdam, 2012

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: + 49 351 2612-0  
Telefax: + 49 351 2612-1099  
E-Mail: [lfulg@smul.sachsen.de](mailto:lfulg@smul.sachsen.de)  
[www.smul.sachsen.de/lfulg](http://www.smul.sachsen.de/lfulg)

**Autor:**

Dr. Anne Routschek  
TU Bergakademie Freiberg  
Agricolastr. 22, 09599 Freiberg  
Telefon: + 49 3731 39-2220  
Telefax: + 49 3731 39-2502  
E-Mail: [anne.routschek@tbt.tu-freiberg.de](mailto:anne.routschek@tbt.tu-freiberg.de)

**Redaktion:**

Dr. Arnd Bräunig  
LfULG, Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe/Referat Boden, Altlasten  
Halsbrücker Str. 31a, 09599 Freiberg  
Telefon: + 49 3731 294-228  
Telefax: + 49 3731 22918  
E-Mail: [arnd.braeunig@smul.sachsen.de](mailto:arnd.braeunig@smul.sachsen.de)

**Redaktionsschluss:**

24.07.2012

**ISSN:**

1867-2868

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <http://www.smul.sachsen.de/lfulg/6447.htm> heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinarbeit des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.