

Minderung von Wassererosion auf Kartoffelflächen

Schriftenreihe, Heft 4/2014



Entwicklung von Konzepten zur Wasser- erosionsminderung auf Kartoffelflächen mit Hilfe des Modells EROSION-3D

Michael von Werner, Jürgen Schmidt, Marcus Schindewolf

1	Anlass	8
2	Stand der Modellentwicklung EROSION-3D	10
3	Arbeitsziele	11
4	Lösungsansatz	12
4.1	Berechnung des Gefälles in Richtung der Furchen	12
4.2	Adaption der Abflussverteilung entsprechend dem Furchenverlauf	13
4.3	Berechnung der maximalen Fließtiefe in den Furchen	14
4.4	Berechnung der Fließbreite in den Furchen	16
4.5	Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit in den Furchen	17
5	Umsetzung in ein EROSION-3D-Softwaremodul	17
5.1	Erforderliche Eingabeparameter.....	17
5.2	Terrain analysis-/Reliefanalyse-Modul.....	19
5.3	Abflussmodul.....	21
5.4	Sedimentmodul	21
5.5	Prozess-Steuermodul.....	21
5.6	Langfristmodul.....	22
6	Beispielanwendung des Bearbeitungsrichtungs-Moduls im Gebiet Clausnitz	22
6.1	Parametrisierung	23
6.2	Hangneigungen	25
6.3	Simulationsrechnungen	32
6.3.1	Auswirkungen auf den Abfluss	32
6.3.2	Auswirkungen auf die Anzahl der Überstaupunkte.....	36
6.3.3	Auswirkungen auf Erosion und Deposition	40
7	Beregnungsversuch	49
7.1	Versuchsaufbau	49
7.2	Versuchsdurchführung	50
7.3	Probenahme und Laboranalysen	51
7.4	Parameterableitung	51
7.4.1	Skinfaktor	51
7.4.2	Oberflächenrauigkeit	52
7.4.3	Erosionswiderstand	52
7.5	Ergebnisse	53
8	Simulationsrechnungen mit den experimentell bestimmten Parametern	54
8.1	Parametrisierung.....	54
8.2	Simulationsrechnungen.....	55
8.2.1	Auswirkungen auf den Abfluss	56
8.2.2	Auswirkungen auf Erosion und Deposition.....	59
9	EROSION-3D-Anwendung zur Planung von Maßnahmen gegen Wassererosion auf Kartoffelflächen	64
10	Zusammenfassung	73
11	Literatur	75
12	Anhang	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Absieben von Kartoffeldämmen	8
Abbildung 2:	Kartoffellegen in abgesiebte Kartoffeldämme	8
Abbildung 3:	Wassererosion auf einer Kartoffelfläche	9
Abbildung 4:	Festlegung und Nummerierung der 8 Nachbarlemente in EROSION-3D	10
Abbildung 5:	Berechnung des Gefällewinkels in Bearbeitungsrichtung	12
Abbildung 6:	Abflussverteilung zwischen zwei Nachbarzellen	13
Abbildung 7:	Strömungsquerschnitte bei schichtförmiger Überströmung F1 und Furchenströmung F2 mit den Parametern Dammhöhe HD, Dammapstand AD, Fließbreite BF, Fließtiefe bei schichtförmiger Überströmung δ und maximale Fließtiefe in der Furche δF	14
Abbildung 8:	Maximale Stauhöhe und Fließtiefen in den Furchen in Abhängigkeit von der Dammhöhe mit der Fließtiefe δ bei schichtförmiger Überströmung als Parameter	15
Abbildung 9:	Fließbreiten in den Furchen in Abhängigkeit von der Dammhöhe und dem Dammapstand mit der Fließtiefe δ bei schichtförmiger Überströmung als Parameter	16
Abbildung 10:	Schematischer Querschnitt durch einen Kartoffelschlag.....	17
Abbildung 11:	Beziehung der Eingabeparameter im Modell EROSION-3D.....	18
Abbildung 12:	Ablauf der Geländeanalyse in EROSION-3D.....	20
Abbildung 13:	Eingabedialog zur Dateiauswahl für die Geländeanalyse bzw. Erstellung des Relief Daten-Sets	20
Abbildung 14:	Relief Optionen Dialog mit dem Reiter Fließrichtung (extern) zur Aktivierung der vorgegebenen Bearbeitungsrichtung	21
Abbildung 15:	Lage der Kartoffelschläge (rote Zahlen: Schlagnummern); die Schraffur gibt die Bearbeitungsrichtung an	23
Abbildung 16:	Niederschlagsverlauf des verwendeten 10-jährigen Starkregens	24
Abbildung 17:	Hangneigungskarte, abgeleitet aus dem DGM6a	25
Abbildung 18:	Hangneigungskarte, abgeleitet aus dem DGM6a unter Berücksichtigung der Richtung der Dämme auf den untersuchten Ackerschlägen.....	26
Abbildung 19:	Schlag 3. Zustand ohne Dämme; links: Die Abbildung zeigt Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile). rechts: Erosion und Deposition beim 10-jährigen Ereignis bei normaler Bodenfeuchte im September	27
Abbildung 20:	Schlag 3. Zustand mit Dämmen; links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile). Bei dem gewählten 10-jährigen Ereignis bei normaler Bodenfeuchte im September tritt der Abfluss an 34 Rasterzellen über die Dämme (blaue Quadrate).rechts: Erosion und Deposition; deutlich ist im unteren Drittel des Schlages der Übertritt in Form einer Erosionsrinne zu erkennen.....	27
Abbildung 21:	Schlag 3. Zustand mit Dämmen; links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile). Bei dem gewählten 10-jährigen Ereignis bei hoher Bodenfeuchte im September tritt der Abfluss an 40 Rasterzellen über die Dämme (blaue Quadrate).rechts: Erosion und Deposition	28
Abbildung 22:	Schlag 7. Zustand ohne Dämme; links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile); rechts: Erosion und Deposition beim 10-jährigen Ereignis bei normaler Bodenfeuchte im September	28
Abbildung 23:	Schlag 7. Zustand mit Dämmen; links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile). Bei dem gewählten 10-jährigen Ereignis bei normaler Bodenfeuchte im September tritt der Abfluss an 7 Rasterzellen über die Dämme (blaue Quadrate).rechts: Erosion und Deposition	29
Abbildung 24:	Schlag 7. Zustand mit Dämmen; links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile). Bei dem gewählten 10-jährigen Ereignis bei hoher Bodenfeuchte im September tritt der Abfluss an 10 Rasterzellen über die Dämme (blaue Quadrate).rechts: Erosion und Deposition	29
Abbildung 25:	Schlag 15. Zustand ohne Dämme; links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile); rechts: Erosion und Deposition beim 10-jährigen Ereignis bei normaler Bodenfeuchte im September.....	30
Abbildung 26:	Schlag 15. Zustand mit Dämmen; links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile). Bei dem gewählten 10-jährigen Ereignis bei normaler Bodenfeuchte im September tritt der Abfluss an 12 Rasterzellen über die Dämme (blaue Quadrate).rechts: Erosion und Deposition	30

Abbildung 27:	Schlag 15. Zustand mit Dämmen: links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile). Bei dem gewählten 10-jährigen Ereignis bei normaler Bodenfeuchte im September tritt der Abfluss an 19 Rasterzellen über die Dämme (blaue Quadrate).rechts: Erosion und Deposition	31
Abbildung 28:	Lage der überströmten Zellen beim Szenario September hohe Feuchte	32
Abbildung 29:	Prognosekarten des Oberflächenabflusses für das 10-jährliche Starkregenereignis bei normaler Bodenfeuchte	33
Abbildung 30:	Prognosekarten des Oberflächenabflusses für das 10-jährliche Starkregenereignis bei hoher Bodenfeuchte	34
Abbildung 31:	Abflusssumme auf Schlag 3 bei jeweils vier Szenarien im Juni und September.....	35
Abbildung 32:	Abflusssumme auf Schlag 7 bei jeweils vier Szenarien im Juni und September.....	36
Abbildung 33:	Abflusssumme auf Schlag 15 bei jeweils vier Szenarien im Juni und September.....	36
Abbildung 34:	Geschwindigkeit des Oberflächenabfluss-Films.....	38
Abbildung 35:	Höhe des Oberflächenabflusses	39
Abbildung 36:	Prognosekarten der Bodenerosion für das 10-jährliche Starkregenereignis bei normaler Bodenfeuchte	41
Abbildung 37:	Prognosekarten der Bodenerosion für das 10-jährliche Starkregenereignis bei hoher Bodenfeuchte	42
Abbildung 38:	Prognosekarten des mittleren schlagbezogenen Bodenabtrags für das 10-jährliche Starkregenereignis bei normaler Bodenfeuchte	43
Abbildung 39:	Prognosekarten des mittleren schlagbezogenen Bodenabtrags für das 10-jährliche Starkregenereignis bei hoher Bodenfeuchte	44
Abbildung 40:	Prognosekarten der transportierten Sedimentmenge für das 10-jährliche Starkregenereignis bei normaler Bodenfeuchte	45
Abbildung 41:	Prognosekarten der transportierten Sedimentmenge für das 10-jährliche Starkregenereignis bei hoher Bodenfeuchte	46
Abbildung 42:	Mittlerer Abtrag auf Schlag 3 bei jeweils vier Szenarien im Juni und September.....	47
Abbildung 43:	Mittlerer Abtrag auf Schlag 7 bei jeweils vier Szenarien im Juni und September.....	48
Abbildung 44:	Mittlerer Abtrag auf Schlag 15 bei jeweils vier Szenarien im Juni und September.....	48
Abbildung 45:	Position der Seitenbleche im Bereich der Fahrspur (links) und der Furche (rechts)	49
Abbildung 46:	Aufbau der Beregnungsanlage	49
Abbildung 47:	Kalibrierung der Infiltrationsrate über den Skinfaktor	51
Abbildung 48:	Oberflächenabfluss und Sedimentmassenstrom im Beregnungsexperiment.....	53
Abbildung 49:	Prognosekarten des Oberflächenabflusses für das 10-jährliche Starkregenereignis	57
Abbildung 50:	Abflusssumme auf Schlag 3 bei jeweils vier Szenarien	58
Abbildung 51:	Abflusssumme auf Schlag 7 bei jeweils vier Szenarien	59
Abbildung 52:	Abflusssumme auf Schlag 15 bei jeweils vier Szenarien	59
Abbildung 53:	Prognosekarten der Bodenerosion für das 10-jährliche Starkregenereignis	60
Abbildung 54:	Prognosekarten des mittleren schlagbezogenen Bodenabtrags für das 10-jährliche Starkregenereignis	61
Abbildung 55:	Prognosekarten der transportierten Sedimentmenge für das 10-jährliche Starkregenereignis	62
Abbildung 56:	Mittlerer Abtrag auf Schlag 3 bei jeweils vier Szenarien	63
Abbildung 57:	Mittlerer Abtrag auf Schlag 7 bei jeweils vier Szenarien	63
Abbildung 58:	Mittlerer Abtrag auf Schlag 15 bei jeweils vier Szenarien	64
Abbildung 59:	Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: Kartoffelschläge 1, 2, 3 und 6 (Ist-Zustand = Szenario 1) im westlichen Gebiet eines Beispielbetriebes; Bearbeitungsrichtung (Schraffur), Schlagnummern (violette Schrift) und Testpunkte für die Bodenabtragsabschätzung mit EROSION-3D (rote Punkte mit schwarzer Schrift)	65
Abbildung 60:	Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: Kartoffelschläge 4 und 5 (Ist-Zustand = Szenario 1) im östlichen Gebiet eines Beispielbetriebes; Bearbeitungsrichtung (Schraffur), Schlagnummern (violette Schrift) und Testpunkte für die Bodenabtragsabschätzung mit EROSION-3D (rote Punkte mit schwarzer Schrift).....	66
Abbildung 61:	Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: EROSION-3D-Prognosekarte der Bodenerosion durch Wasser für ein Starkregenereignis mit 10-jähriger	

	Wiederkehrzeit und dem Nutzungszustand/Ist-Zustand Mai 2012 (Szenario 1) für die Kartoffelschläge 1, 2, 3 und 6 (s. a. Abbildung 59) im westlichen Gebiet eines Beispielbetriebes.....	67
Abbildung 62:	Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: EROSION-3D-Prognosekarte der Bodenerosion durch Wasser für ein Starkregenereignis mit 10-jähriger Wiederkehrzeit und dem Nutzungszustand/Ist-Zustand Mai 2012 (Szenario 1) für die Kartoffelschläge 4 und 5 (s. a. Abbildung 60) im östlichen Gebiet eines Beispielbetriebes	67
Abbildung 63:	Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: Szenario 2 - Kartoffelschläge im westlichen Gebiet eines Beispielbetriebes nach Anlage von Kleegrasteilflächen (graugüne Flächen) in Kombination mit Schlagteilungen der ursprünglichen Kartoffelflächen 1 bis 4 und 6 (s. Abbildung 59) (mit Darstellung der Bearbeitungsrichtung [Schraffur], der Schlagnummern [violette Schrift] und der Testpunkte für die Bodenabtragsabschätzung mit EROSION-3D [rote Punkte mit schwarzer Schrift])	69
Abbildung 64:	Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: Szenario 2 - Kartoffelschläge im östlichen Gebiet eines Beispielbetriebes nach Anlage von Klee-gras-teilflächen (graugüne Flächen) in Kombination mit Schlagteilungen der ursprünglichen Kartoffelfläche 5 (Szenario 1, Abbildung 60) (mit Darstellung der Bearbeitungsrichtung [Schraffur], der Schlagnummern [violette Schrift] und der Testpunkte für die Bodenabtragsabschätzung mit EROSION-3D [rote Punkte mit schwarzer Schrift])	70
Abbildung 65:	Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: EROSION-3D-Prognosekarte der Bodenerosion durch Wasser für ein Starkregenereignis mit 10-jähriger Wiederkehrzeit nach Anpassung der Schlaggeometrien (Anlage von Klee-gras-teilflächen in Kombination mit Schlagteilungen der ursprünglichen Kartoffelflächen (= Szenario 2, s. Abbildung 64) im westlichen Gebiet eines Beispielbetriebes	71
Abbildung 66:	Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: EROSION-3D-Prognosekarte der Bodenerosion durch Wasser für ein Starkregenereignis mit 10-jähriger Wiederkehrzeit nach Anpassung der Schlaggeometrien (Anlage von Klee-gras-teilflächen in Kombination mit Schlagteilungen der ursprünglichen Kartoffelflächen (= Szenario 2, s. Abbildung 64) im östlichen Gebiet eines Beispielbetriebes.....	72
Abbildung 67:	Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: Darstellung der mit EROSION-3D für die im westlichen und östlichen Gebiet des Beispielbetriebes gelegenen Kartoffelflächen 1 bis 6 ermittelten erosionsbedingten Bodenabträge (Bodenabtrag in t/ha) vor (Szenario 1 = Ist-Zustand, Abbildung 59 und Abbildung 60) und nach der Anpassung der Schlaggeometrie (Szenario 2 = Klee-gras-anbau auf Teilflächen und neue Schlageinteilung, Abbildung 63 und Abbildung 64)	72
Abbildung 68:	Infiltrationsverlauf Beregnungsversuch Clausnitz I	76
Abbildung 69:	Infiltrationsverlauf Beregnungsversuch Clausnitz II	76
Abbildung 70:	Infiltrationsverlauf Beregnungsversuch Clausnitz III	76
Abbildung 71:	Oberflächenabfluss und Sedimentkonzentration Beregnungsversuch Clausnitz I (Kreise markieren verwendete Daten).....	77
Abbildung 72:	Oberflächenabfluss und Sedimentkonzentration Beregnungsversuch Clausnitz II (Kreise markieren verwendete Daten).....	77
Abbildung 73:	Oberflächenabfluss und Sedimentkonzentration Beregnungsversuch Clausnitz III (Kreise markieren verwendete Daten).....	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	EROSION-3D-Eingabeparameter für die Ackerfläche 3	24
Tabelle 2:	Anzahl der simulierten Überstaupunkte	37
Tabelle 3:	Gemessene Parameter für Kartoffelflächen (ermittelt in Beregnungsversuchen)	53
Tabelle 4:	Abgeleitete EROSION-3D-Modellparameter.....	54
Tabelle 5:	EROSION-3D-Eingabeparametertabelle für Ackerfläche 3 bzw. Ackerfläche 1	55

1 Anlass

Der Anbau von Kartoffeln ist wegen der mit der Dammbildung verbundenen intensiven Bearbeitungseingriffe in die Bodenstruktur und des späten Bestandesschlusses mit einem erhöhten Wasser- und Winderosionsrisiko verbunden. Die vorbereitenden Bodenbearbeitungsmaßnahmen zielen auf die Herstellung regelmäßig geformter Dämme im Abstand von etwa 75 cm (von Dammkrone zu Dammkrone). Um optimale Bedingungen sowohl für das Legen und das Wachstum der Kartoffeln als auch die Kartoffelernte sicherzustellen, wird seit einigen Jahren in den kartoffelerzeugenden Betrieben Sachsens das Absiebverfahren bei der Formung der Kartoffeldämme angewendet (s. Abbildung 1 und Abbildung 2). Hierbei wird der locker aufgehäufte Boden im Zuge der Dammbildung gesiebt und feinkrümelig zerteilt. Zielsetzung ist das Absieben von Steinen und Kluten aus den Kartoffeldämmen. Damit soll bei der Kartoffelernte der Anteil verletzter Kartoffeln möglichst gering gehalten werden. Dies erhöht den Anteil vermarktungsfähiger Ware im Sinne eines ökonomischen Kartoffelanbaus. Die Strukturstabilität und damit der Erosionswiderstand des Bodens von Kartoffelflächen sind jedoch als Folge des Absiebverfahrens eher gering. Zudem werden Strohreste einer Getreidevorfrucht bzw. Mulchmaterial, das von einer vorausgehenden Zwischenfruchtbegegrünung der zukünftigen Kartoffelfläche stammt, durch das Absieben weitestgehend eingemischt. Aufgrund der fehlenden Pflanzenreste sind die Kartoffeldämme nicht mehr ausreichend gegen Wassererosion geschützt. Gleichzeitig wird die erosionsmindernde Wirkung von pflugloser Bodenbearbeitung infolge der mit dem Absiebverfahren verbundenen weitgehenden Zerstörung von stabilen Bodenkrümeln, Grobporen usw. fast vollständig beseitigt.



Abbildung 1: Absieben von Kartoffeldämmen



Abbildung 2: Kartoffellegen in abgesiebte Kartoffeldämme

Neben dem geringen Erosionswiderstand der gesiebten Kartoffeldämme erhöht zudem die Dammbildung und die dadurch bedingte Strukturierung die Erosionsgefährdung der Kartoffelflächen. Durch die spezifische Geometrie der Kartoffelbeete sammelt sich das Oberflächenwasser in den zwischen den Dämmen verbleibenden Furchen. Bei Anlage der Dämme quer zum Hang fließt das Wasser in der Regel nicht in Hangrichtung, sondern wird in den Furchen zurückgehalten. Bei schräg zum Hang angelegten Dämmen vermindern

sich einerseits das Gefälle und damit die Strömungsgeschwindigkeit, andererseits wird der Strömungsquerschnitt infolge der Dämme eingeschränkt, was wiederum zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten in den Furchen führen kann. Der Abtrag der Dammflanken und die Überstauung der Dämme können schließlich zum Versagen bzw. Brechen der Dämme führen. Ausgehend von den Bruchstellen folgt das Wasser dann wieder dem natürlichen Gefälle. Wegen der Konzentration des Abflusses entstehen dabei oft tiefe Erosionsrinnen mit enormen lokalen Abtragsraten (Abbildung 3). Dies gilt insbesondere für quer zu Hangrinnen angelegte Kartoffeldämme. Dort wird in den Furchen von den seitlichen Hangflanken Wasser zugeführt, das sich am tiefsten Punkt in der Hangrinne sammelt und dort zum Überströmen und Durchbrechen von Kartoffeldämmen führen kann. Die voranstehenden Ausführungen zeigen, dass sich die erosionsauslösenden Wirkungen des Abflusses auf einer Kartoffelfläche sowohl verringern als auch vergrößern können, je nachdem, welcher der genannten Effekte wirksamer ist.



Abbildung 3: Wasserosion auf einer Kartoffelfläche

Es zeigt sich zudem, dass auf abgeseibten Kartoffelflächen durch konservierende Bodenbearbeitung und nachfolgender Mulchbedeckung von Kartoffeldämmen kein ausreichender Schutz vor Wasserosion erreicht werden kann. Aus diesem Grund müssen ergänzende Schutzmaßnahmen in Form von Schlagteilungen, Änderung der Bearbeitungsrichtung, Begrünung von Teilflächen, Hangrinnen usw. im Sinne der Minderung der durch Wasserosion verursachten Schäden sowohl auf als auch außerhalb von Kartoffelflächen zur Anwendung kommen. Für die sachgerechte Planung und Anlage dieser Maßnahmen ist eine Erosionsmodellierung erforderlich. In diesem Sinne wurde im Projekt das in Sachsen verfügbare Modell EROSION-3D für die Anwendung auf Kartoffelflächen weiterentwickelt. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

2 Stand der Modellentwicklung

EROSION-3D

Das Simulationsmodell EROSION-3D beschreibt die Strömungsvorgänge an der Bodenoberfläche unter Zuhilfenahme eines quadratischen Rasters, welches das Wassereinzugsgebiet in gleich große, in sich homogene Flächenelemente gliedert. Der Oberflächenabfluss eines Flächenelements resultiert dabei aus dem Niederschlagsüberschuss innerhalb dieses Elements (abhängig von Niederschlagsintensität und Infiltrationsrate) und aus dem Zustrom aus höher gelegenen Nachbarelementen. Der im Modell zugrunde gelegte Algorithmus berücksichtigt jeweils 8 benachbarte Flächenelemente und ermittelt die jeweilige Höhendifferenz bezogen auf das im Zentrum liegende Ursprungselement (s. Abbildung 4). Entweder erhält das am tiefsten gelegene Nachbarelement den Abfluss der Ursprungszelle insgesamt (D8-Algorithmus) oder der Abfluss wird entsprechend der Höhendifferenz anteilig auf mehrere tiefer gelegene Nachbarzellen (soweit vorhanden) verteilt (FD8-Algorithmus).

Meist bildet der D8-Algorithmus die natürliche Verteilung des Oberflächenabflusses nur unvollkommen ab. Aus diesem Grund verwendet EROSION-3D zur Simulation flächenhafter Abflüsse den FD8-Algorithmus. Sobald allerdings der zunächst flächenhaft verteilte Abfluss zu linienhaften Strömungsmustern konvergiert, ist der D8-Algorithmus besser geeignet. Um den Übergang von flächenhaften zu linienhaften Strömungszuständen zu identifizieren, verwendet EROSION-3D einen Schwellenwert, definiert als die Anzahl der in eine Zelle entwässernden Rasterelemente (bzw. deren Fläche), die notwendig ist, um in dieser Zelle einen linienhaften Strömungszustand zu initiieren. Der Schwellenwert ist vom Anwender so festzulegen, dass das ungestörte natürliche Entwässerungsnetz möglichst realistisch wiedergegeben wird.

7	8	1
6	■	2
5	4	3

Abbildung 4: Festlegung und Nummerierung der 8 Nachbarelemente in EROSION-3D

Innerhalb der Rasterelemente wird unabhängig davon, ob es sich um flächen- oder linienhafte Strömungszustände handelt, stets eine schichtförmige Überströmung unterstellt, d. h., das Oberflächenwasser verteilt sich gleichmäßig über die gesamte Grundfläche der jeweiligen Zelle. Unter dieser Voraussetzung kann die Fließtiefe δ als Funktion der Hangneigung S , der Oberflächenrauigkeit n und des Abflussvolumenstromes q durch folgende Gleichung (1) (nach MANNING) beschrieben werden:

$$\delta = \left(\frac{q \cdot n}{S^{1/2}} \right)^{3/5}$$

Gl. 1

3 Arbeitsziele

Kartoffeldämme wirken in mehrfacher Hinsicht auf das Strömungsverhalten und den Bodenabtrag ein:

- Ablenkung der Strömung in Richtung der Furchen, sofern die Dammkronen nicht überstaut werden
- Zunahme der Fließtiefe und der Fließgeschwindigkeit aufgrund der Einengung der Fließbreite
- Abnahme des Gefälles, sofern der Verlauf der Dämme nicht dem maximalen Gefälle folgt. Hierdurch vergrößert sich die Fließtiefe, während sich die Fließgeschwindigkeit reduziert.
- Abnahme der Oberflächenrauigkeit infolge der feinkrümeligen Zerteilung/Siebung der Bodenaggregate. Dadurch nimmt die Fließgeschwindigkeit zu und die Fließtiefe ab.
- Abnahme des Erosionswiderstandes infolge der stark aufgelockerten Bodenstruktur von abgesiebten Kartoffeldämmen

Die Vielzahl der Einzeleinflüsse zeigt, dass die Wirkungen von Kartoffeldämmen auf die Hydraulik des Oberflächenabflusses und auf den Bodenabtrag nicht ohne weiteres zu überschauen ist. Die Simulation der Abfluss- und Erosionsprozesse auf Kartoffeläckern mit dem Modell EROSION-3D erfordert umfangreiche Erweiterungen des vorhandenen Modellansatzes, insbesondere in Bezug auf die

- Adaption der Abflussverteilung entsprechend des Dammverlaufs,
- Berechnung des Gefälles in Richtung der Dämme,
- Berechnung der mittleren Fließtiefe und -geschwindigkeit in den Furchen,
- Berechnung der maximalen Stauhöhe in den Furchen.

Die neuen EROSION-3D-Funktionen zur Berücksichtigung der Oberflächenstrukturen sollen in Form eines zusätzlichen Softwaremoduls realisiert werden. Weil der Parameterkatalog Sachsen für Kartoffelkulturen bisher keine belastbaren Angaben bereithält, sind verschiedene Modellparameter unter Berücksichtigung der spezifischen Bearbeitungseingriffe experimentell zu bestimmen wie z. B. Lagerungsdichte, Erosionswiderstand, Skinfaktor und Oberflächenrauigkeit. Grundsätzlich können auch im Kartoffelanbau konservierende Bewirtschaftungsmethoden wie Mulch- und Direktlegen oder Untersaaten zum Einsatz kommen, um der Erosion entgegenzuwirken. Für konservierende Varianten des Kartoffelanbaus fehlen allerdings ebenso wie für das konventionelle Verfahren die erforderlichen EROSION-3D-Modellparameter. Experimentelle Untersuchungen zu konservierenden Varianten sind nicht Bestandteil dieses Vorhabens.

4 Lösungsansatz

Die Dammstruktur der Kartoffelbeete kann üblicherweise nicht als Reliefinformation im Digitalen Höhenmodell (DGM) abgebildet werden, weil die Auflösung hierfür bei weitem nicht ausreicht. Die Herstellung entsprechend hochauflösender DGM (ca. 0,2 x 0,2 m) ist extrem aufwändig (siehe Diplomarbeit BORNKAMPF 2006) und im Rahmen von Standardanwendungen nicht realisierbar. Für die Beschreibung der Erosions- und Transportprozesse mit dem Simulationsmodell EROSION-3D bedarf es daher einer Modellerweiterung, die es erlaubt, die spezifischen Beetstrukturen beim Kartoffelanbau in generalisierter Form, d. h. als Schlaginformation, zu berücksichtigen. Als maßgebende Parameter sind dabei die Richtung und Geometrie der Dämme sowie deren Abstand und Höhe zu berücksichtigen. Um die Anwendung des Softwaremoduls möglichst einfach zu gestalten, wird von einem V-förmigen Dammprofil ausgegangen.

4.1 Berechnung des Gefälles in Richtung der Furchen

Bei der herkömmlichen Neigungsberechnung in EROSION-3D wird unter Verwendung verschiedener Algorithmen das Vektorprodukt aus Vektoren in Nord-Süd- und Ost-West-Richtung gebildet, um einen mittleren Neigungswert der Rasterzelle zu erhalten.

Für die Furchenneigung wird dagegen nur ein Vektor in Richtung der Furche benötigt. Bei Bearbeitungsrichtungen, die ein Vielfaches von 45° betragen (0, 45, 90 usw.), ist dies über die Höhenwerte der acht Nachbarn der Rasterzelle möglich.

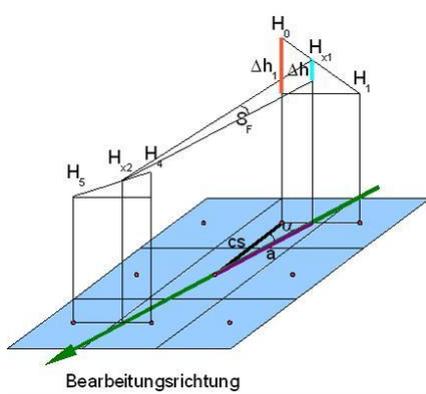


Abbildung 5: Berechnung des Gefälles in Bearbeitungsrichtung

Die Höhendifferenz beträgt für den Fall einer in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Furche (Abbildung 5)

$$\Delta h = H_0 - H_4 \quad \text{Gl. 2}$$

Die Neigung berechnet sich aus

$$S_F = \arctan \left(\frac{\Delta h}{2 \cdot cs} \right) \quad \text{Gl. 3}$$

S_F Gefällewinkel in der Furche [°]

Δh Höhendifferenz der gegenüber liegenden Nachbarn [m]

cs Zellgröße [m]

Für andere Richtungswerte müssen zunächst die Höhenwerte aus jeweils zwei nebeneinander liegenden Höhenwerten interpoliert werden (Abbildung 5).

$$\Delta h_1 = H_0 - H_1 \quad \text{Gl. 4}$$

$$H_{x1} = H_0 - (\Delta h_1 \cdot \tan(\alpha_x)) \quad \text{Gl. 5}$$

H_x Höhe [m]

α_x relativer Winkel [°] bezogen auf den betrachteten Sektor

Für den gegenüber liegenden Nachbarn gilt entsprechend

$$\Delta h_2 = H_4 - H_5 \quad \text{Gl. 6}$$

$$H_{x2} = H_4 - (\Delta h_2 \cdot \tan(\alpha_x)) \quad \text{Gl. 7}$$

Die Hangneigung berechnet sich dann aus den beiden interpolierten Höhenpunkten

$$\Delta h = H_{x1} - H_{x2} \quad \text{Gl. 8}$$

$$S_F = \arctan \left(\frac{\Delta h \cdot \cos(\alpha_x)}{2 \cdot cs} \right) \quad \text{Gl. 9}$$

4.2 Adaption der Abflussverteilung entsprechend dem Furchenverlauf

EROSION-3D verwendet standardmäßig den FD8-Algorithmus zur Abflussverteilung, der eine zum Höhenunterschied proportionale Aufteilung des Abflusses auf bis zu acht tiefer gelegene Nachbarn zulässt. Durch die Dämme ist die natürliche Ausbreitung des Abflusses jedoch eingeschränkt.

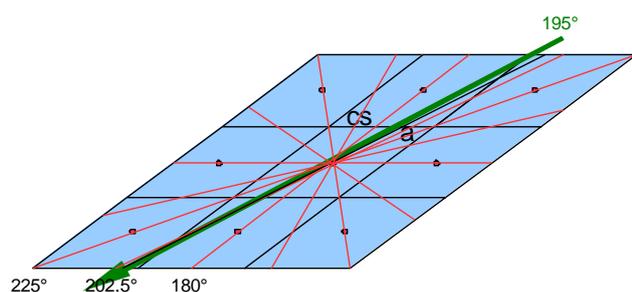


Abbildung 6: Abflussverteilung zwischen zwei Nachbarzellen

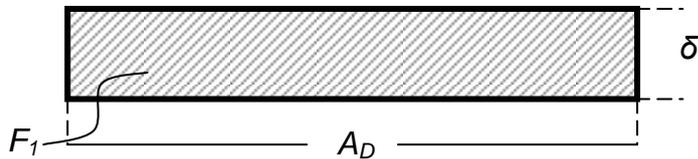
Es werden daher zwei Fälle unterschieden:

- Ist die Bearbeitungsrichtung genau ein Vielfaches von 45°, wird der gesamte Abfluss einer Zelle zu genau einer tiefer gelegenen Rasterzelle in Bearbeitungsrichtung geleitet (D8-Algorithmus). Über die Höhendifferenz zur Nachbarzelle wird bestimmt, ob der Abfluss in Bearbeitungsrichtung oder in die Gegenrichtung erfolgt. Sind beide Nachbarn höher gelegen, wird die Bearbeitungsrichtung für diese Zelle nicht ausgewertet und die natürliche Richtung verwendet.
- In allen anderen Fällen wird der Abfluss auf zwei Nachbarn aufgeteilt: Im Beispiel (Abbildung 6) beträgt die Pflugrichtung 195°. Der Abfluss muss also zwischen dem südlichen (180°) und dem südwestlichen Nachbarn (225°) aufgeteilt werden, sofern beide Nachbarn tiefer als die betrachtete Zelle liegen. Die Verteilung wird über den Tangens der Bearbeitungsrichtung durchgeführt, wobei immer 22,5°-Segmente (im Beispiel 180°-202,5°) betrachtet werden.

4.3 Berechnung der maximalen Fließtiefe in den Furchen

Zur Berechnung der Fließtiefe und -geschwindigkeit in den Furchen wird von einem V-förmigen Querschnitt der Furchen/Dämme ausgegangen. Die geometrischen Parameter sind in Abbildung 7 im Einzelnen dargestellt.

Schichtförmiger Strömungszustand:



Furchenströmung:

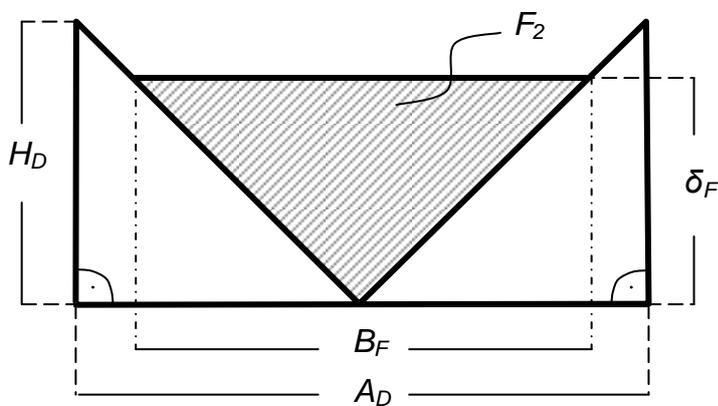


Abbildung 7: Strömungsquerschnitte bei schichtförmiger Überströmung F1 und Furchenströmung F2 mit den Parametern Dammhöhe H_D , Dammbreite A_D , Fließbreite B_F , Fließtiefe bei schichtförmiger Überströmung δ und maximale Fließtiefe in der Furche δ_F

Vereinfachend wird angenommen, dass beim Übergang vom Schichtabfluss zur Furchenströmung der durchströmte Querschnitt flächenmäßig gleich bleibt.

$$F_1 = F_2 \quad \text{Gl. 10}$$

Da $F_1 = A_D \cdot \delta$ und $F_2 = \frac{B_F \cdot \delta_F}{2}$ ergibt sich:

$$A_D \cdot \delta = \frac{B_F \cdot \delta_F}{2} \quad \text{Gl. 11}$$

und nach Umstellung:

$$\delta_F = \frac{2 \cdot A_D \cdot \delta}{B_F} \quad \text{Gl. 12}$$

Außerdem gilt:

$$\frac{H_D}{A_D} = \frac{\delta_F}{B} \quad \text{Gl. 13}$$

Nach Umstellung erhält man:

$$B_F = \frac{\delta_F \cdot A_D}{H_D} \tag{Gl. 14}$$

Gl. 14 in Gl. 12 eingesetzt ergibt:

$$\delta_F = \frac{2 \cdot A_D \cdot H_D \cdot \delta}{\delta_F \cdot A_D} \tag{Gl. 15}$$

Durch Kürzen und Umstellen erhält man:

$$\delta_F = \sqrt{2 \cdot H_D \cdot \delta} \tag{Gl. 16}$$

In Abbildung 8 wird Gl. 16 für verschiedene Dammhöhen und Fließtiefen bei schichtförmiger Überströmung ausgewertet. Es ist ersichtlich, dass die Fließtiefen mit zunehmender Dammhöhe und zunehmender Fließtiefe bei schichtförmiger Überströmung größer werden. Im vorliegenden Beispiel wird die maximal mögliche Stauhöhe überschritten, wenn die schichtförmige Strömung mit einer Fließtiefe von 100 mm in eine Furchenströmung mit ≤ 200 mm Dammhöhe übergeht.

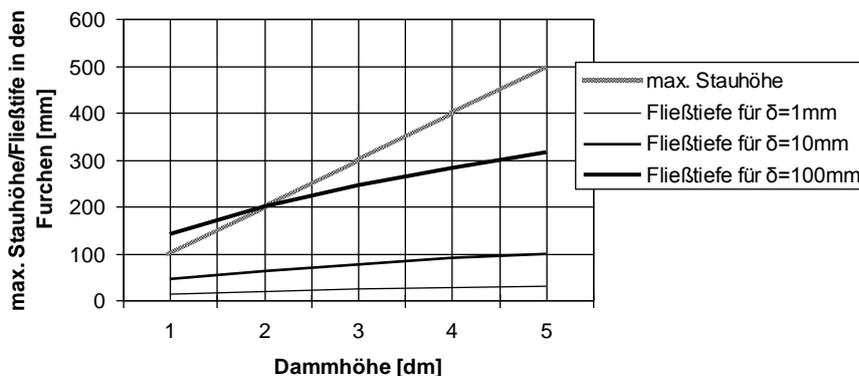


Abbildung 8: Maximale Stauhöhe und Fließtiefen in den Furchen in Abhängigkeit von der Dammhöhe mit der Fließtiefe δ bei schichtförmiger Überströmung als Parameter

Gl. 1 in Gl. 16 eingesetzt ergibt:

$$\delta_F = \sqrt{2 \cdot H_D \cdot \left(\frac{q \cdot n}{S_F^{1/2}} \right)^{3/5}} \tag{Gl. 17}$$

Mit Hilfe von Gl. 17 kann die maximale Fließtiefe in den Furchen aus bekannten Größen abgeleitet werden, nämlich aus der Höhe der Dämme H_D , der Hangneigung in den Furchen S_F , der Oberflächenrauigkeit n und dem Abflussvolumenstrom q .

4.4 Berechnung der Fließbreite in den Furchen

Analog zur Fließtiefe kann die Fließbreite in den Furchen aus bekannten Größen berechnet werden und zwar gemäß Gl. 18:

$$B_F = A_D \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \delta}{H_D}} \quad \text{Gl. 18}$$

Entsprechend dieser Gleichung zeigt Abbildung 9 die Abhängigkeit der Fließbreite von der Dammhöhe und dem Dammanstand für unterschiedliche Fließtiefen bei schichtförmiger Überströmung. Die Fließbreite wird größer, wenn Dammhöhe und -abstand zunehmen. Im vorliegenden Beispiel überschreitet die Fließbreite den Dammanstand (und die maximale Fließtiefe die Dammhöhe), wenn die schichtförmige Strömung mit einer Fließtiefe von 100 mm in eine Furchenströmung mit ≤ 400 mm Dammanstand und ≤ 200 mm Dammhöhe übertritt.

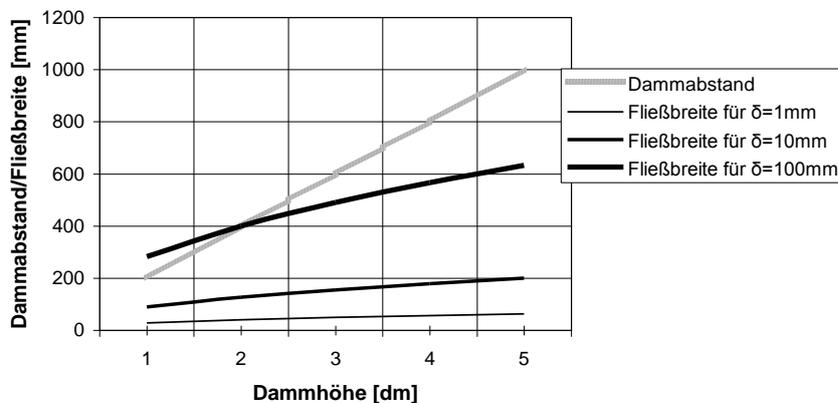


Abbildung 9: Fließbreiten in den Furchen in Abhängigkeit von der Dammhöhe und dem Dammanstand mit der Fließtiefe δ bei schichtförmiger Überströmung als Parameter

Durch Einsetzen von Gl.1 in Gl. 18 erhält man:

$$B_F = A_D \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \left(\frac{q \cdot n}{S_F^{1/2}} \right)^{3/5}}{H_D}} \quad \text{Gl. 19}$$

4.5 Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit in den Furchen

Die Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit in den Furchen erfolgt auf der Grundlage der Strömungsgleichung nach MANNING aus den Größen Oberflächenrauigkeit n , hydraulischer Radius R und Gefälle S :

$$v_q = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad \text{Gl. 20}$$

Nach Einsetzen der spezifischen Größen für den hydraulischen Radius $R = (\delta_F \cdot B_F) / (2 \cdot (\delta_F + B_F))$ und die Hangneigung in den Furchen S_F ergibt sich:

$$v_q = \frac{1}{n} \cdot \left[\frac{\delta_F \cdot B_F}{2 \cdot (\delta_F + B_F)} \right]^{2/3} \cdot S_F^{1/2} \quad \text{Gl. 21}$$

5 Umsetzung in ein EROSION-3D-Softwaremodul

Von der Implementierung der Bearbeitungsrichtung sind in EROSION-3D zahlreiche Teilmodule betroffen.

5.1 Erforderliche Eingabeparameter

Abbildung 10 zeigt einen Querschnitt durch einen Kartoffelschlag. Die vom Benutzer für die Parametrisierung der Bearbeitungsrichtungs-Funktion in EROSION-3D zusätzlich zu erbringenden Daten sind

- Bearbeitungsrichtung [Grad],
- Dammhöhe [m],
- Dammapstand [m].

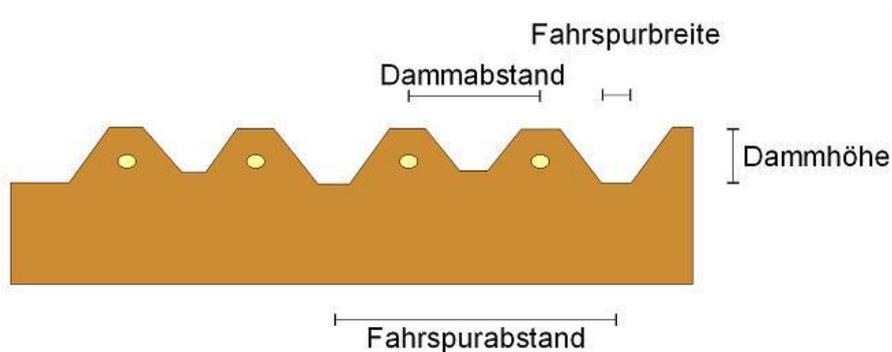
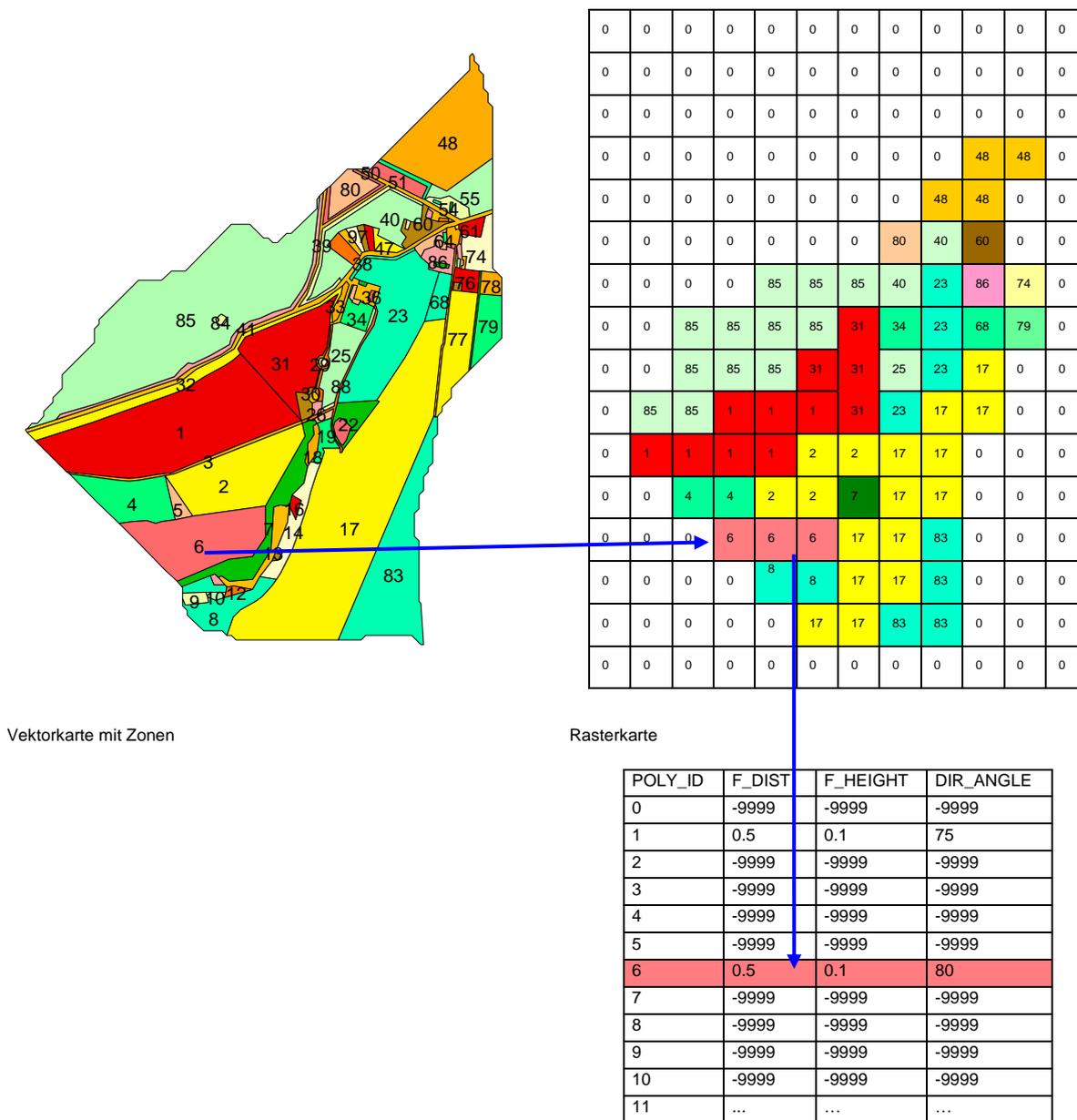


Abbildung 10: Schematischer Querschnitt durch einen Kartoffelschlag

Die Daten sind in Form eines Richtungszonen-Grids und einer Tabellendatei einzugeben (Abbildung 11). Richtungszonen sind z. B. Ackerschläge, die durch eine eindeutige ID gekennzeichnet sind. Zu dieser Rasterdatei muss eine gleichnamige Tabellendatei im CSV-Format vorliegen (z. B. *richtung.asc* und *richtung.csv*). In der Tabelle sind für jede ID die Daten für die Bearbeitungsrichtung sowie für Dammhöhe und -abstand gespeichert (Abbildung 11).

Die übrigen notwendigen Parameter werden bereits vom Modell selbst berechnet und können in den neuen bzw. modifizierten Modulen verwendet werden.



Sachdaten-Tabelle

Abbildung 11: Beziehung der Eingabeparameter im Modell EROSION-3D

5.2 Terrain analysis-/Reliefanalyse-Modul

Die Bearbeitungsrichtung beeinflusst die Hangneigung, Exposition und Abflussverteilung. Die Veränderung insbesondere der Abflussverteilung nur einer Zelle bewirkt eine Veränderung aller tiefer gelegenen Zellen in Bezug auf deren Zelleinzugsgebiet, Abflusskonzentration und Fließlängen sowie auf die Ausbildung des Gewässernetzes (Abbildung 12).

Für die Implementation der Bearbeitungsrichtung mussten alle Prozessmodule der Geländeanalyse neu entwickelt oder angepasst werden.

EROSION-3D bestimmt für jede Zelle deren Einzugsgebiet innerhalb des Gesamteinzugsgebietes. Durch Verwendung des FD8-Algorithmus, der mehrere Ausflussrichtungen aus einer Zelle zulässt, ergibt sich ein intensiv verzahntes Abfluss-Netzwerk. Diese im Verlauf des Preprocessing berechnete theoretische Verknüpfung wird bei der späteren Berechnung auf die einzelnen Parameter wie z. B. Abfluss und Sediment angewendet.

Alleiniger Eingabeparameter des Reliefanalysemoduls sind die zellbezogenen Höhenwerte des Digitalen Geländemodells. Wird für eine beliebige Zelle dieser Höhenwert oder einer der daraus abgeleiteten Parameter modifiziert, führt dies zu einer Veränderung der Abflussverteilung aller unterhalb im Einzugsgebiet gelegenen Zellen. Diese Veränderung kann durch Verwendung eines Bearbeitungsrichtungswertes oder – im späteren Berechnungsverlauf – durch einen spontanen Wechsel der Abflussrichtung infolge des Dammüberstaus eintreten. Der Wechsel der Abflussrichtung bei einem Dammüberstau hat jedoch noch weitere Folgen: Innerhalb der Furche folgt der Abfluss einer vom Nutzer vorgegebenen Richtung, es wird der D8- bzw. ein eingeschränkter FD8-Algorithmus verwendet. Als Hangneigung wird die zuvor berechnete Furchenneigung benutzt. Tritt jedoch ein Überstau oder ein Dammbbruch auf, folgt der Abfluss wieder der natürlichen Gefällrichtung. Dementsprechend muss auch die Neigung in dieser Richtung verwendet werden. Für die Abflussverteilung wird wieder der FD8-Algorithmus eingesetzt.

Tritt während eines Berechnungsintervalls mindestens ein Überlauf auf, reagiert das Modell daher mit einer Neuberechnung der Abflussverteilung nach diesem Intervall. Während des Intervalls folgt der Abfluss jedoch noch weiter der Richtung, die zu Beginn des Intervalls festgelegt war. Daher sollte die Länge des Zeitintervalls nicht zu hoch gewählt werden. Die Zelle, in welcher der Überlauf stattfand, wird in den Folgeintervallen des aktuellen Simulationslaufs nicht mehr durch die vorgegebene Bearbeitungsrichtung modifiziert.

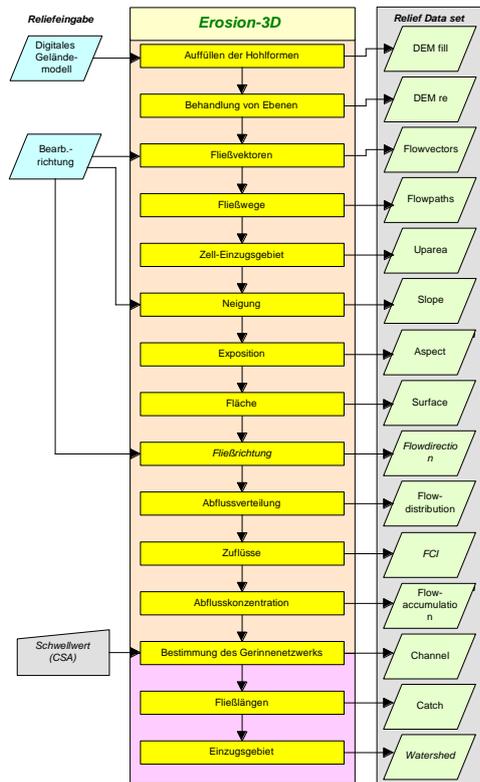


Abbildung 12: Ablauf der Geländeanalyse in EROSION-3D

Die Angabe, dass das Modell eine vorgegebene Abflussrichtung verwenden soll, muss sowohl bei der Reliefanalyse, d. h. der Erstellung des Relief data sets, als auch bei der Berechnung erfolgen. Bei der Reliefanalyse muss der Benutzer lediglich zusätzlich zum Geländemodell eine Rasterdatei mit den Richtungs-zonen eingeben (Abbildung 13).



Abbildung 13: Eingabedialog zur Dateiauswahl für die Geländeanalyse bzw. Erstellung des Relief Daten-Sets

Zusätzlich muss die Funktion ‚Benutze Fließrichtung‘ im ‚Relief Optionen‘ Dialog eingeschaltet werden (Abbildung 14).

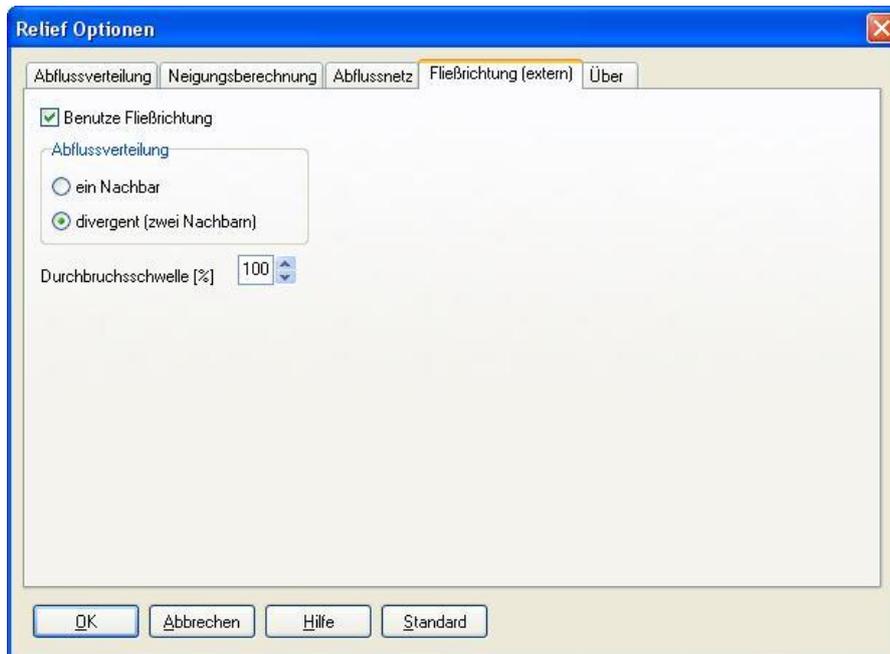


Abbildung 14: Relief Optionen Dialog mit dem Reiter Fließrichtung (extern) zur Aktivierung der vorgegebenen Bearbeitungsrichtung

5.3 Abflussmodul

In EROSION-3D wird von einer flächigen Überströmung einer Rasterzelle durch den Abfluss ausgegangen. Durch die Betrachtung der Bearbeitungsfurchen und Dämme wurde unter Anwendung der Parameter Dammabstand und Dammhöhe eine alternative Berechnungsroutine zur Bestimmung des hydraulischen Umfangs und der Abflussgeschwindigkeit entwickelt. Als Ergebnis entstand ein aktualisiertes Abflussmodul.

Liegen für eine Zelle die Parameter Bearbeitungsrichtung, Dammhöhe und Dammabstand vor, schaltet das Abflussmodul auf ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit und Fließtiefe in der Furche um. Gleichzeitig führt das Abflussmodul einen Vergleich der aktuellen Fließtiefe mit der Dammhöhe durch. Sobald die Fließtiefe die Dammhöhe übersteigt, wird dem Prozess-Steuermodul signalisiert, dass nach dem Zeitschritt eine Neuberechnung der Reliefparameter durchgeführt werden muss.

5.4 Sedimentmodul

Bislang wurden in EROSION-3D Abfluss und Sediment innerhalb eines gemeinsamen Moduls berechnet. Aufgrund der Erweiterungen der Abflussberechnung wurde eine Trennung der beiden Prozesskomponenten in separate Module umgesetzt.

5.5 Prozess-Steuermodul

Das Prozess-Steuermodul wurde derart modifiziert, dass im Falle eines Dammüberstaus bei einer oder mehrerer Zellen innerhalb eines Zeitschritts eine Neuberechnung der Reliefparameter nach diesem Zeitschritt durchgeführt werden kann. Bei Bedarf müssen dann weitere Module (z. B. das Langfristsimulationsmodul) aktiviert werden.

5.6 Langfristmodul

Bislang wurde beim Langfristmodul erst nach Ende eines Niederschlagsereignisses eine Bilanzrechnung von Sediment und Abfluss berechnet. Sofern der Benutzer die Option zur Anpassung der Geländeoberfläche mit dem umgelagerten Sediment gewählt hatte, wurde daraufhin eine Neuberechnung der Reliefparameter durchgeführt.

Beim neu entwickelten Berechnungsmodul wird bei jedem Niederschlagsintervall überprüft, ob ein Dammüberstau stattfindet. Ist dies der Fall, müssen nach dem Intervall die Abflusswege neu berechnet werden. Dabei müssen gleichzeitig die Veränderungen durch Sedimentumlagerungen berücksichtigt werden. Aus diesen Gründen musste ein neues Langfristmodul entwickelt werden, das eine Berechnung nach jedem Niederschlagsintervall zulässt. Dementsprechend musste auch der Teil des Prozess-Steuermoduls neu entwickelt werden, der die Aktivierung des Langfristsimulationsmoduls und des Geländeanalysemoduls übernimmt.

6 Beispielanwendung des Bearbeitungsrichtungs-Moduls im Gebiet Clausnitz

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in der näheren Umgebung von Clausnitz, einem Ortsteil von Rechenberg-Bienenmühle im Landkreis Mittelsachsen. Der Ort liegt am Fuß des Erzgebirgskamms im Tal der Rachel, einem Nebenfluss der Freiburger Mulde. Die vorherrschende Bodenart ist mittel sandiger Lehm (Ls3).

Das Modell wurde in einem Gebietsausschnitt mit 19 Kartoffelschlägen angewendet. Die Lage der Schläge und die Bearbeitungsrichtung zeigt Abbildung 15.

Auf den Ackerschlägen wurden Kartoffeln in einem Dammanstand von 0,75 m bei einer Dammhöhe von 0,25 m angebaut. Innerhalb der Fahrspur befinden sich jeweils 2 Beete.

Die Rastergröße wird durch das zugrunde liegende ATKIS-DGM festgelegt und beträgt 20 m. Die Basiskarte für die Landnutzung bildet das ATKIS-DLM, das von den vom Betrieb übergebenen Schlaggeometrien überlagert wird. Die Bodeninformation lieferte die Bodenkonzeptkarte Sachsen 1 : 50.000 (BkKonz 50) und für Fehlstellen die Bodenübersichtskarte 1 : 200.000 (BBÜK200).

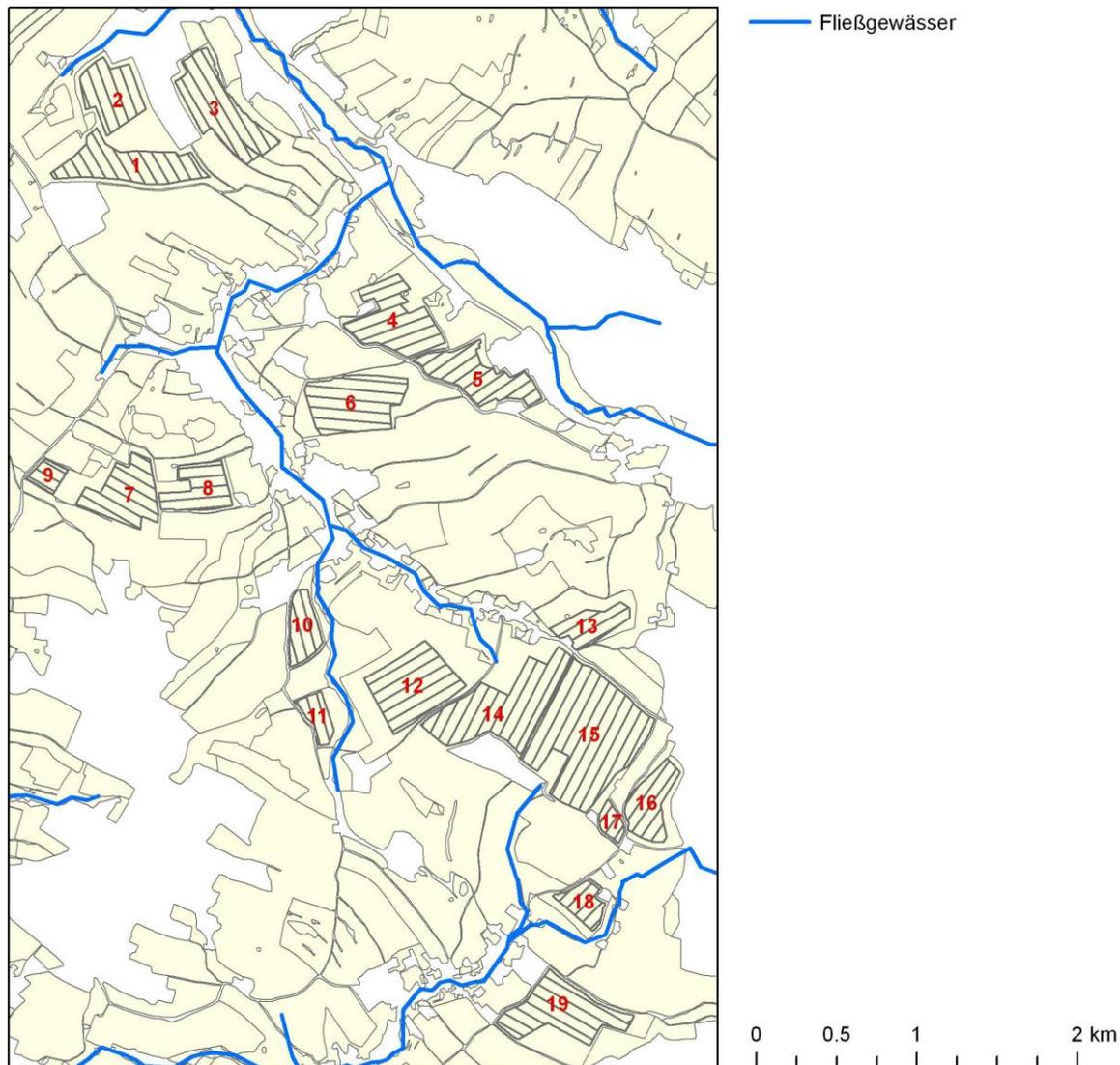


Abbildung 15: Lage der Kartoffelschläge (rote Zahlen: Schlagnummern); die Schraffur gibt die Bearbeitungsrichtung an

6.1 Parametrisierung

Die verwendeten Modellparameter für Boden und Landnutzung zeigt Tabelle 1. Es wurden bei diesen Modellrechnungen die Werte des Parameterkataloges Sachsen verwendet, der die herkömmliche Anbaumethode für Kartoffeln berücksichtigt. Bei den Rechnungen in Kapitel 6.3 werden dagegen die Werte des Parameterkataloges den experimentell für die heutige Anbaumethode ermittelten Werten gegenübergestellt.

Die Szenarien variieren daher folgende Randbedingungen:

- Termin
- Einfluss der Geometrie
- Bodenfeuchte

Tabelle 1: EROSION-3D-Eingabeparameter für die Ackerfläche 3

Randbedingungen: Nutzung: Kartoffeln Bodenfeuchte: normal (PKS) Bearbeitung: konventionell Bodenart: mittel sandiger Lehm (Ls3)	Szenario Juni	Szenario September
Erosionswiderstand [N/m ²]	0.0038	0.005
Hydraulische Rauigkeit [s/m ^{1/3}]	0.015	0.08
Bodenbedeckungsgrad [%]	53	58
Lagerungsdichte [kg/m ³]	1390	1440
Org. Kohlenstoffgehalt [M.-%]	1.7	1.7
Anfangswassergehalt [Vol.-%] normal (PKS)/feucht	31/39	30/33
Skinfaktor [-]	0.26	0.25

Die Niederschlagsdaten sind der Digitalen Koordinierten Starkregen-Auswertung des Deutschen Wetterdienstes (DWD-KOSTRA 2000; Rasterfeld Spalte:64 Zeile:58) entnommen. Den Niederschlagsverlauf zeigt Abbildung 16.

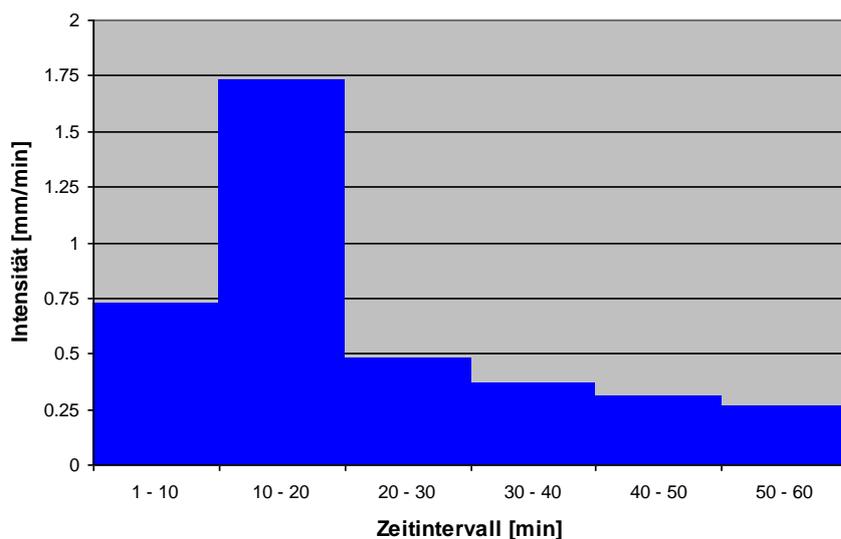


Abbildung 16: Niederschlagsverlauf des verwendeten 10-jährigen Starkregens

Für die Simulationsrechnungen wurden zwei Reliefanalysen (EROSION-3D Relief Data sets) durchgeführt. Beim ersten Datensatz folgt der Oberflächenabfluss dem natürlichen Gefälle und breitet sich dabei divergent aus (FD8-Algorithmus). Beim zweiten Datensatz gingen für die Kartoffelschläge die Parameter Bearbeitungsrichtung, Dammanstand und Dammhöhe ein. Der Oberflächenabfluss kann innerhalb der Kartoffelschläge nur in Richtung der Bearbeitungsrichtung fließen. Der Abfluss kann weitgehend nur einer Nachbarzelle übergeben werden.

6.2 Hangneigungen

Ein erstes Ergebnis der Reliefanalyse ist die Hangneigungskarte. Abbildung 17 zeigt die Hangneigungen ohne Berücksichtigung der Bearbeitungsrichtung, während Abbildung 18 die Situation mit Kartoffeldämmen wiedergibt. Deutlich ist zu erkennen, dass in Bereichen, in denen die Bearbeitungsrichtung weitgehend dem Verlauf der Höhenlinien folgt, eine geringere Hang- bzw. Furchenneigung zu erkennen ist.

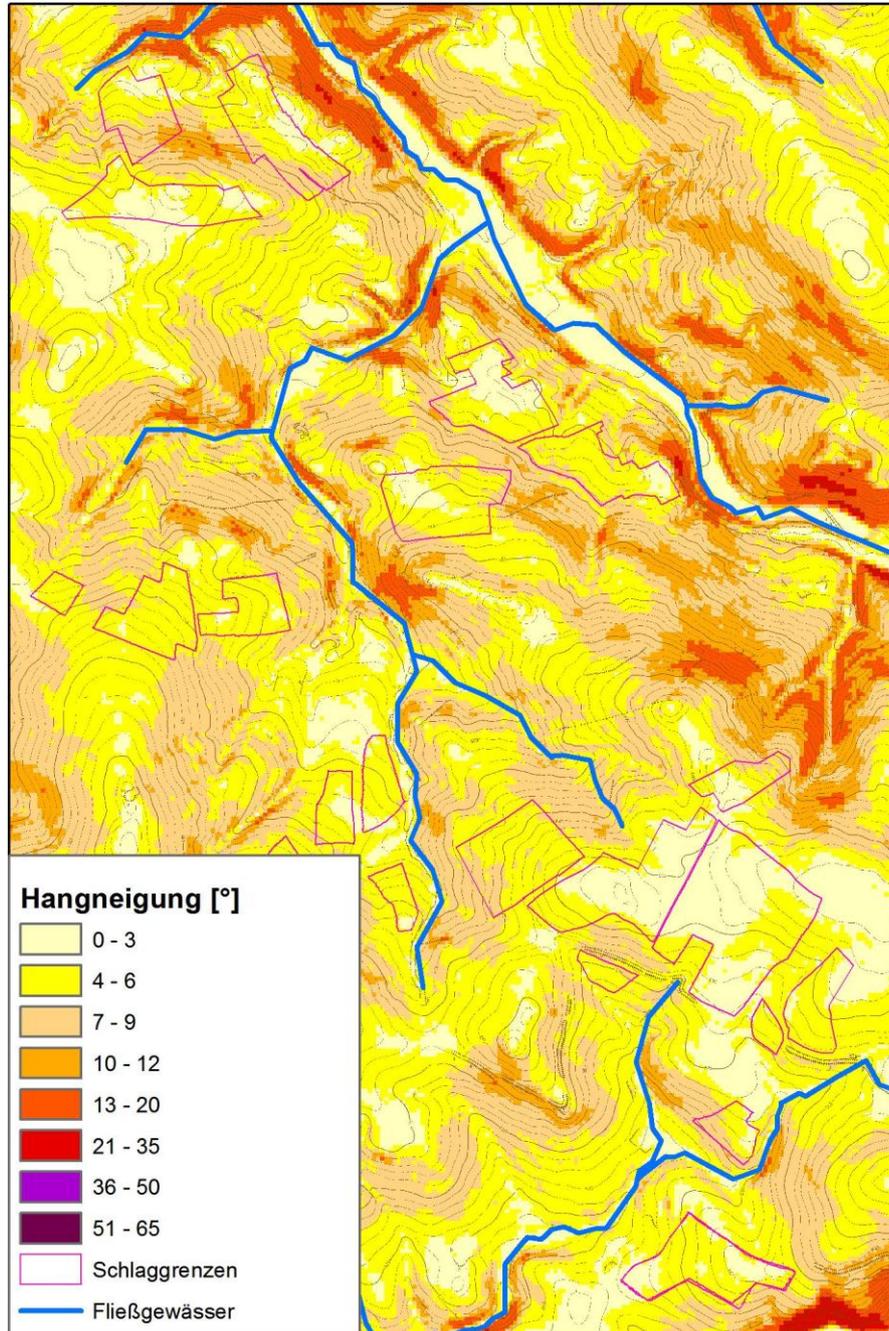


Abbildung 17: Hangneigungskarte, abgeleitet aus dem DGM6a

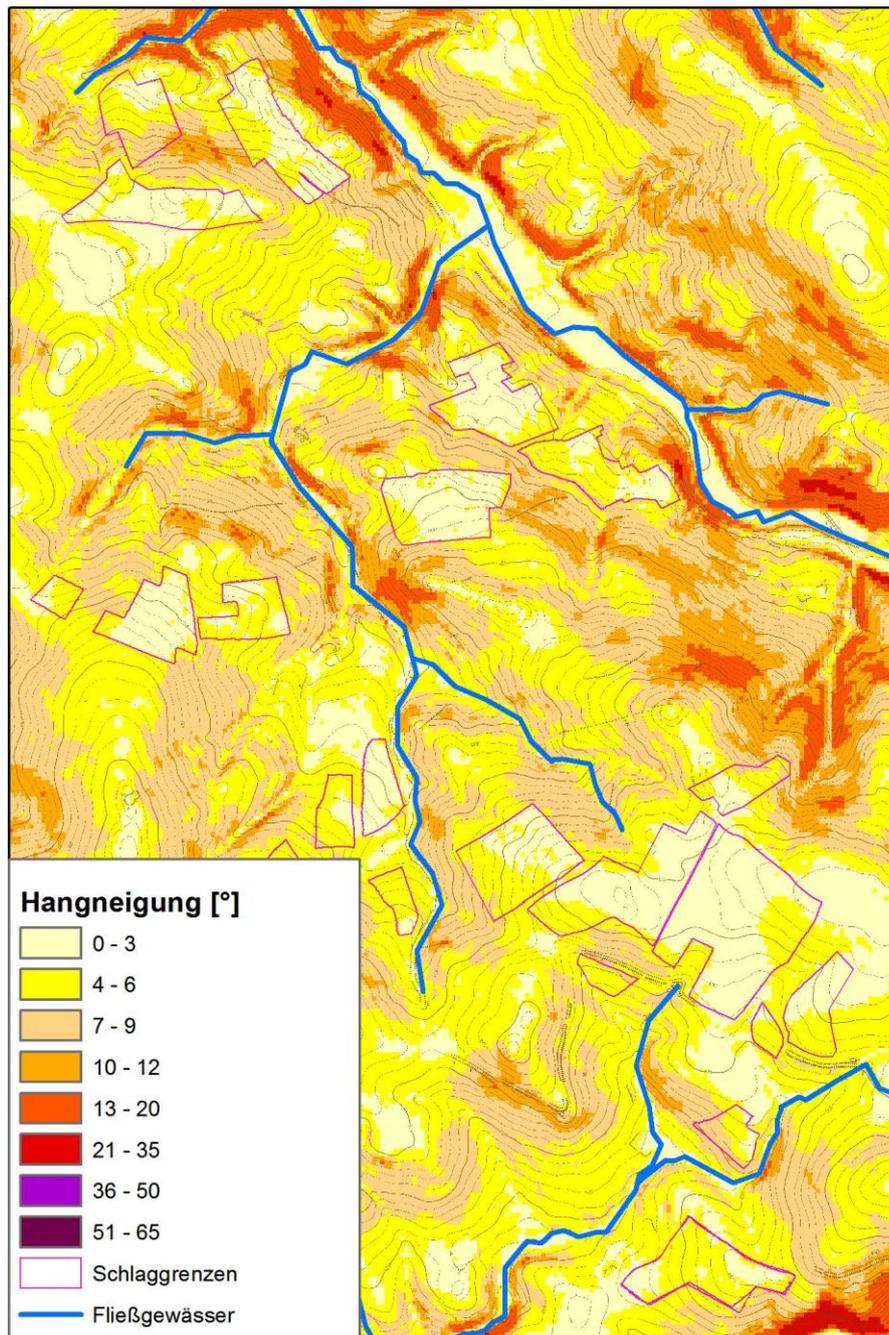


Abbildung 18: Hangneigungskarte, abgeleitet aus dem DGM6a unter Berücksichtigung der Richtung der Dämme auf den untersuchten Ackerschlägen

Die folgenden Abbildungen 19 bis 27 zeigen beispielhaft für 3 Schläge Ausschnitte aus den Hangneigungskarten. Zusätzlich sind bei diesen Abbildungen die vom Modell berechneten Fließrichtungen und potenziellen Überlaufstellen jeweils ohne und mit Dämme eingezeichnet. Zum Vergleich zeigt die jeweils rechte Abbildung das Ergebnis der Simulationsrechnungen.

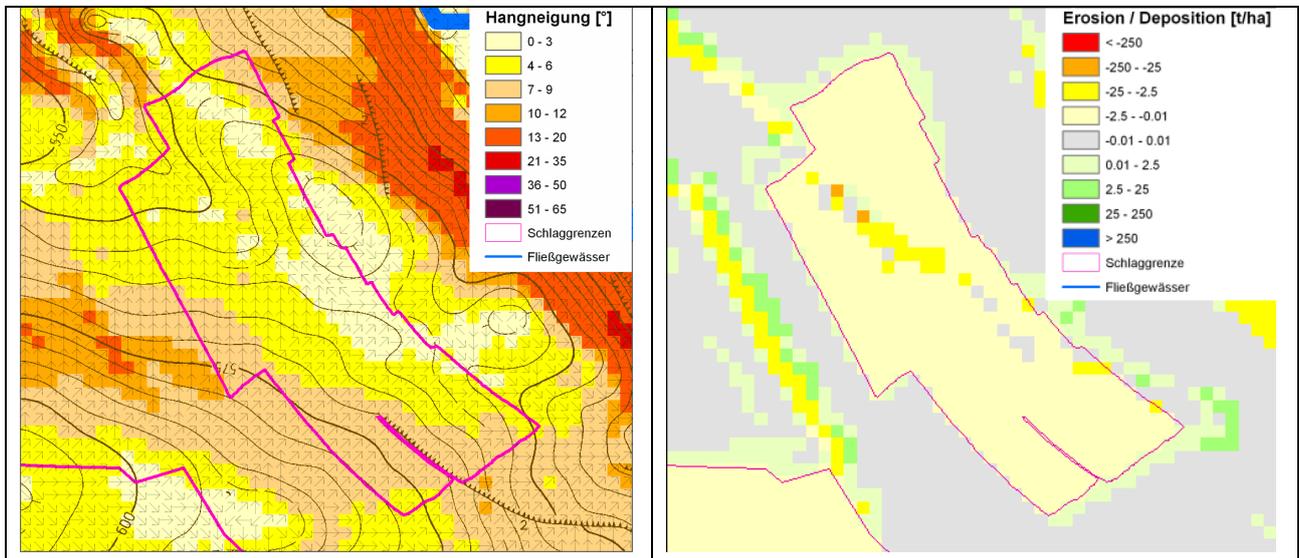


Abbildung 19: Schlag 3. Zustand ohne Dämme;
links: Die Abbildung zeigt Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile).
rechts: Erosion und Deposition beim 10-jähr. Ereignis bei normaler Bodenfeuchte im September

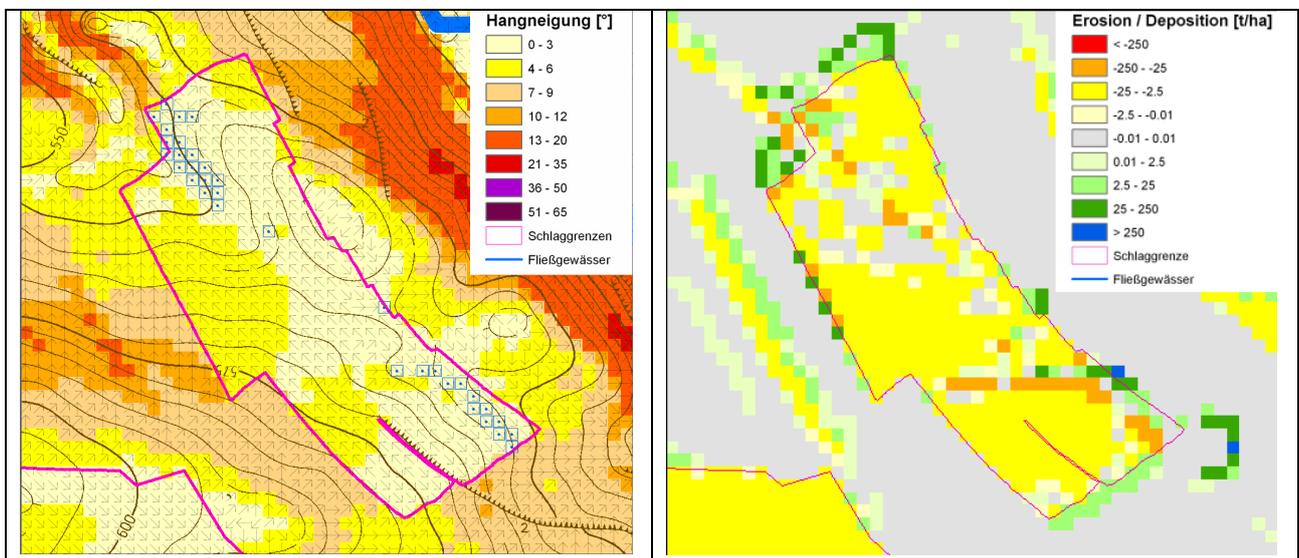


Abbildung 20: Schlag 3. Zustand mit Dämmen;
links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile). Bei dem gewählten 10-jähr. Ereignis bei normaler Bodenfeuchte im September tritt der Abfluss an 34 Rasterzellen über die Dämme (blaue Quadrate).
rechts: Erosion und Deposition; deutlich ist im unteren Drittel des Schlages der Übertritt in Form einer Erosionsrinne zu erkennen

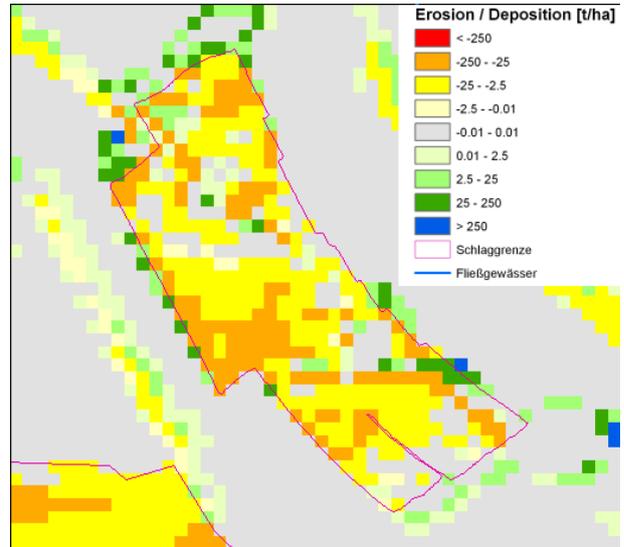
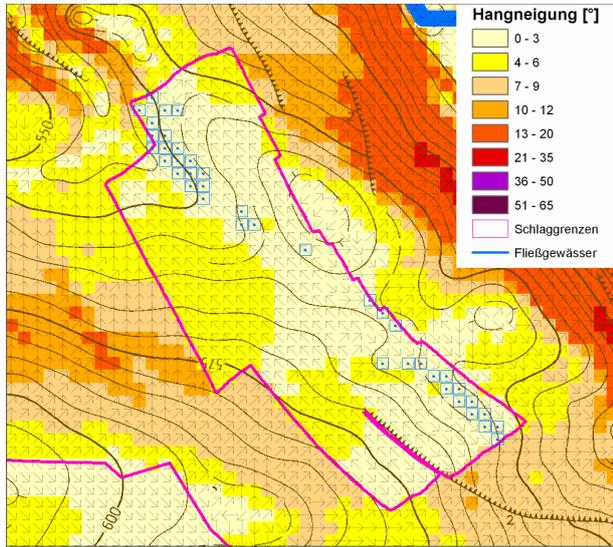


Abbildung 21: Schlag 3. Zustand mit Dämmen; links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile). Bei dem gewählten 10-jähr. Ereignis bei hoher Bodenfeuchte im September tritt der Abfluss an 40 Rasterzellen über die Dämme (blaue Quadrate).rechts: Erosion und Deposition

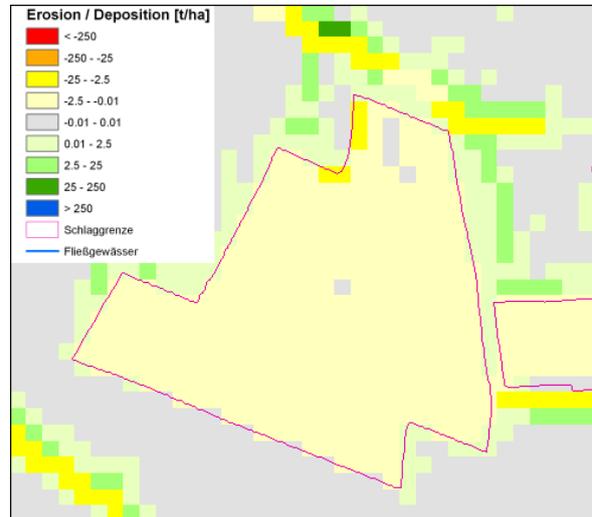
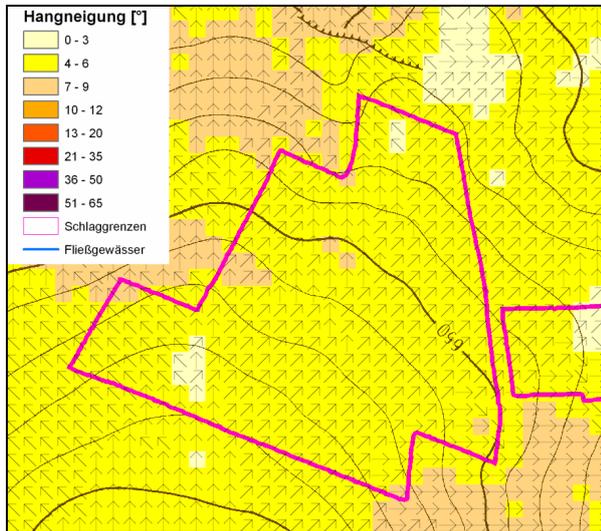


Abbildung 22: Schlag 7. Zustand ohne Dämme; links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile); rechts: Erosion und Deposition beim 10-jähr. Ereignis bei normaler Bodenfeuchte im September

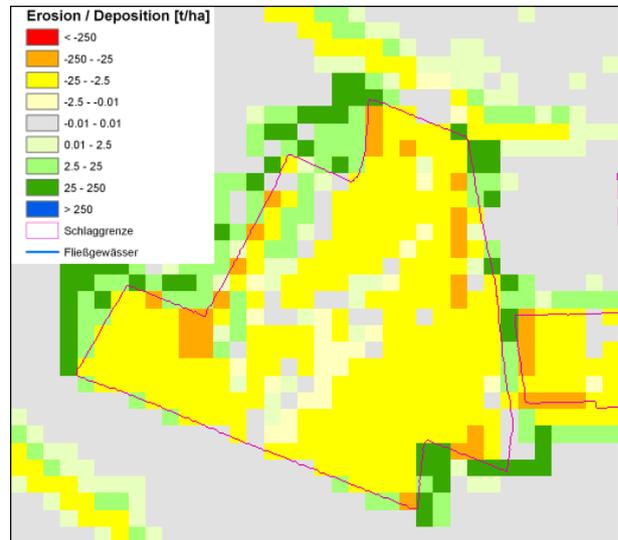
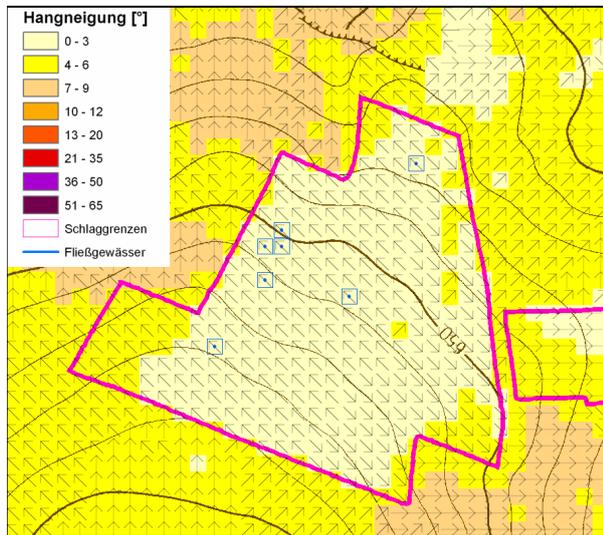


Abbildung 23: Schlag 7. Zustand mit Dämmen; links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile). Bei dem gewählten 10-jähr. Ereignis bei normaler Bodenfeuchte im September tritt der Abfluss an 7 Rasterzellen über die Dämme (blaue Quadrate).rechts: Erosion und Deposition

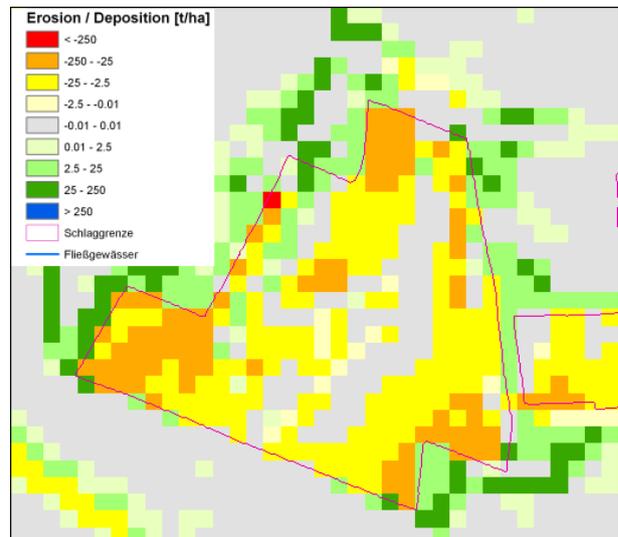
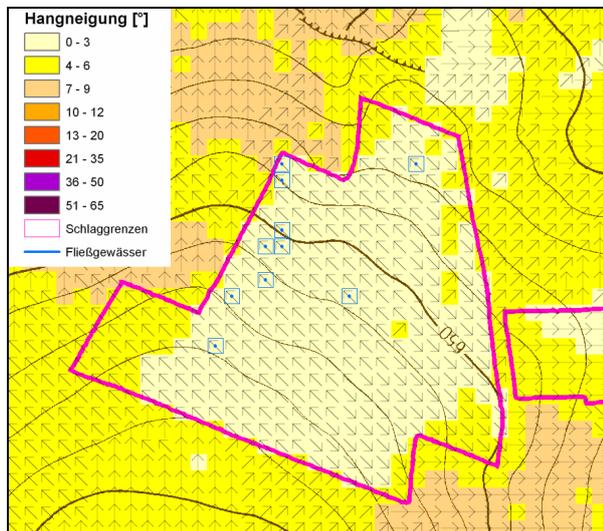


Abbildung 24: Schlag 7. Zustand mit Dämmen; links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile). Bei dem gewählten 10-jähr. Ereignis bei hoher Bodenfeuchte im September tritt der Abfluss an 10 Rasterzellen über die Dämme (blaue Quadrate).rechts: Erosion und Deposition

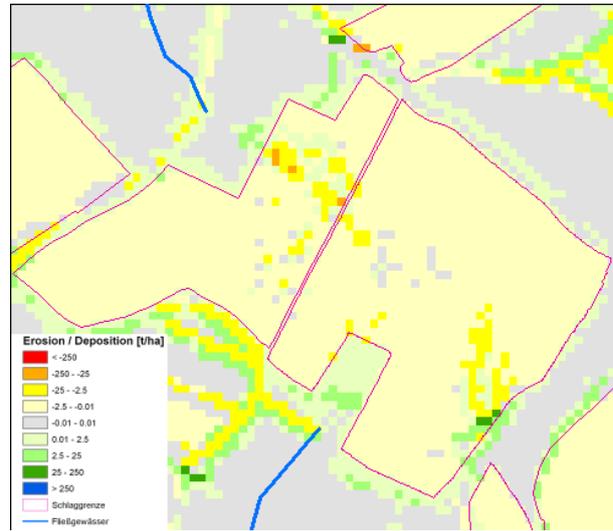
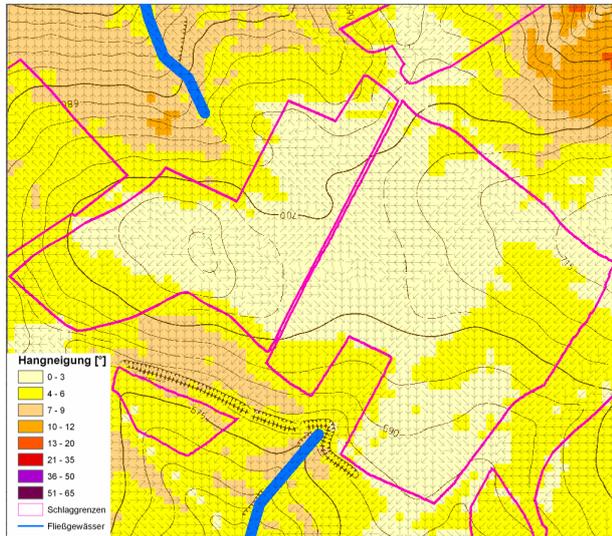


Abbildung 25: Schlag 15. Zustand ohne Dämme;
links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile);rechts: Erosion und Deposition beim 10-jähr. Ereignis
bei normaler Bodenfeuchte im September

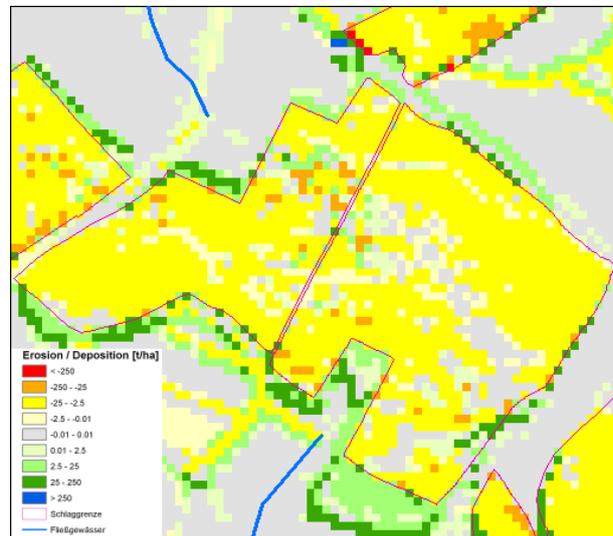
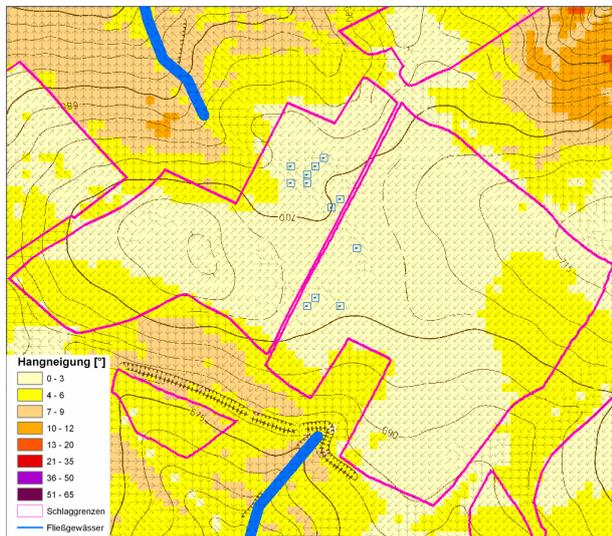


Abbildung 26: Schlag 15. Zustand mit Dämmen;
links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile). Bei dem gewählten 10-jähr. Ereignis bei normaler
Bodenfeuchte im September tritt der Abfluss an 12 Rasterzellen über die Dämme (blaue
Quadrate).rechts: Erosion und Deposition

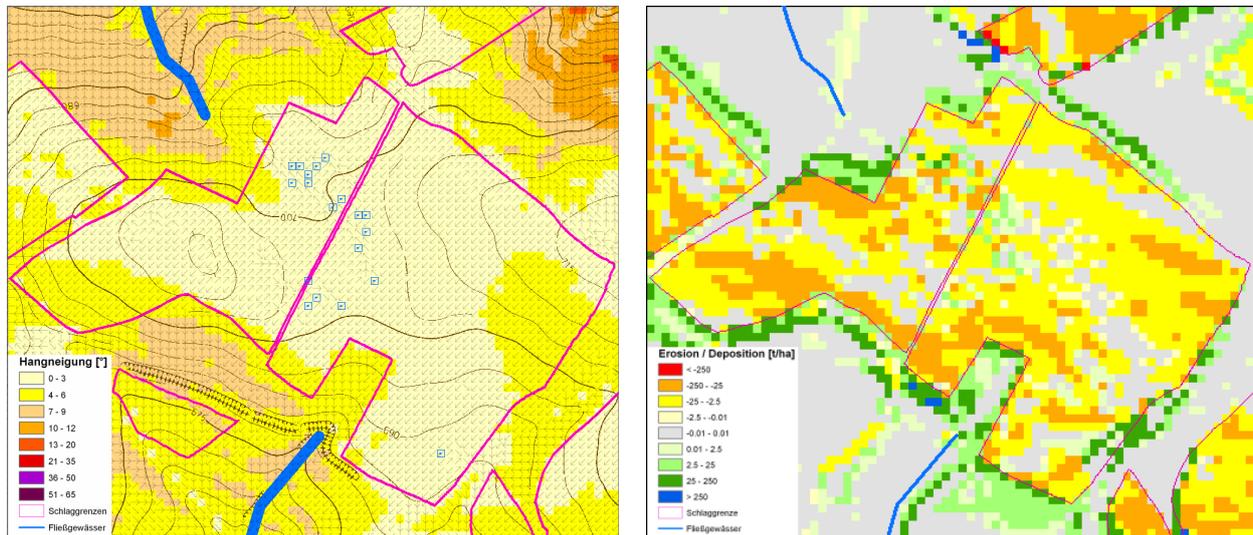


Abbildung 27: Schlag 15. Zustand mit Dämmen:
links: Hangneigung und Fließrichtungen (Pfeile). Bei dem gewählten 10-jähr. Ereignis bei normaler Bodenfeuchte im September tritt der Abfluss an 19 Rasterzellen über die Dämme (blaue Quadrate).rechts: Erosion und Deposition

Abbildung 28 zeigt eine Übersicht aller Schläge mit den überströmten Zellen beim Szenario im September bei hoher Bodenfeuchte.

Eine Überströmung tritt in den meisten Fällen in folgenden Situationen auf:

- in tief gelegenen Bereichen; durch das größere Einzugsgebiet ist das Abflussvolumen hoch
- in flachen Bereichen, in denen die Bearbeitungsrichtung parallel zu den Höhenlinien verläuft; durch die geringere Hangneigung nimmt die Fließgeschwindigkeit ab und die Höhe des Abflusses steigt an
- in Bereichen, in denen mehrere Rinnen zusammen treffen, d. h. dort, wo Durchbrüche auftreten oder wenn von vornherein die Bearbeitungsrichtung nicht verwendet werden konnte



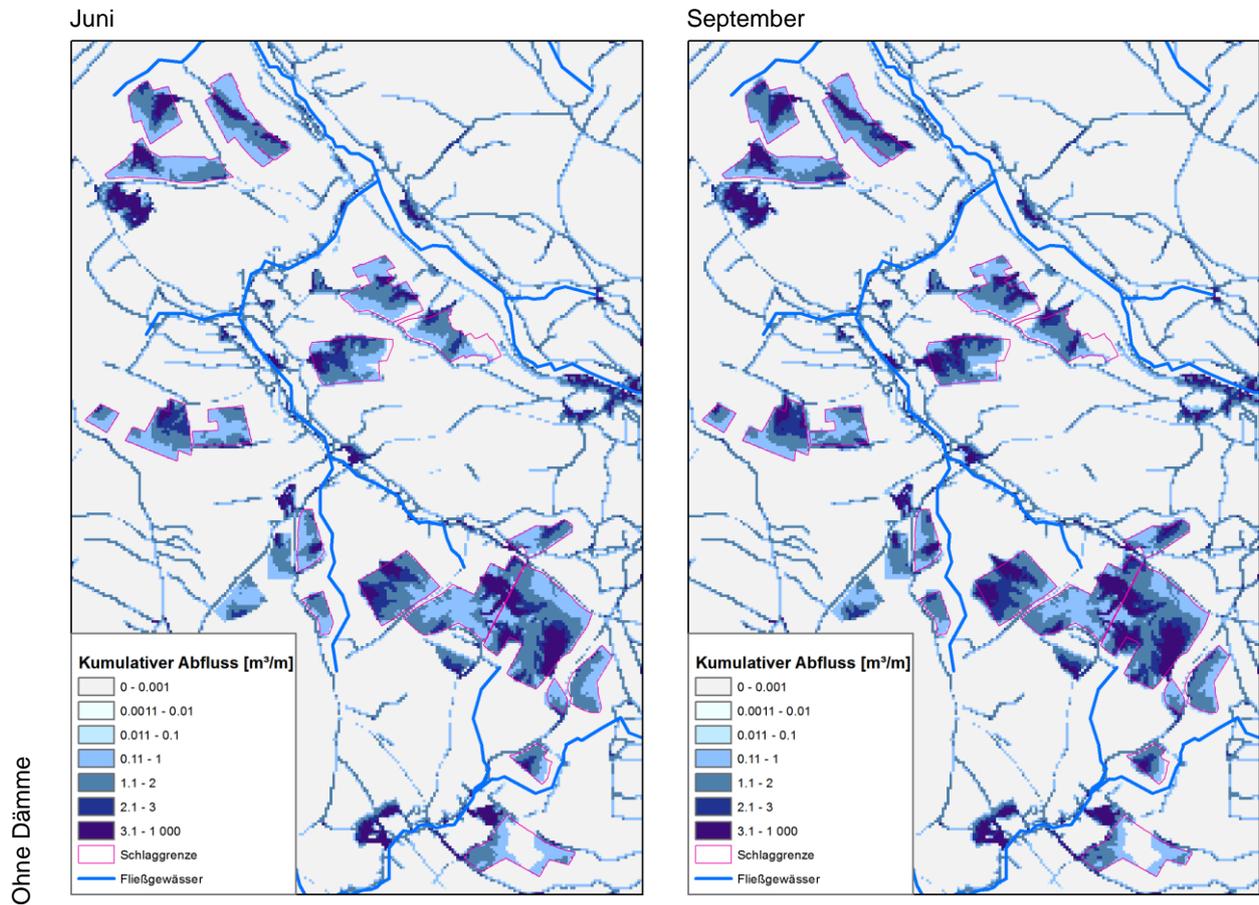
Abbildung 28: Lage der überströmten Zellen beim Szenario September hohe Feuchte

6.3 Simulationsrechnungen

Die Simulationsrechnungen wurden für die Termine Juni und September im Gesamtgebiet durchgeführt. Zunächst wurde jeweils die Prognosekarte für den Zustand ohne Dämme bei normaler Bodenfeuchte erstellt (Szenario I). Bei der nächsten Simulation wurden bei normaler Feuchte 25 cm hohe Dämme angenommen. Zusätzlich wurde angenommen, dass die Dämme bereits dann überstaut sind bzw. brechen, wenn 70 % der Stauhöhe erreicht ist (Szenario II). Diese Annahme beruht auf folgenden Überlegungen: Die Breite der Dämme nimmt nach oben hin ab und die höheren Teile der Dämme sind lockerer und können leichter durchbrochen werden. Szenario III entspricht Szenario I, allerdings bei hoher Bodenfeuchte. Analog wurden in Szenario IV die Bedingungen von Szenario II bei hoher Bodenfeuchte angenommen.

6.3.1 Auswirkungen auf den Abfluss

Die Abbildungen 29 bis 33 zeigen die Abflussmengen für die vier Szenarien jeweils als Juni- und September-Variante.



d:\projekte\Clausnitz\map_neu\gif\runoff\ero10j_juni_imNorm_run_map.gif

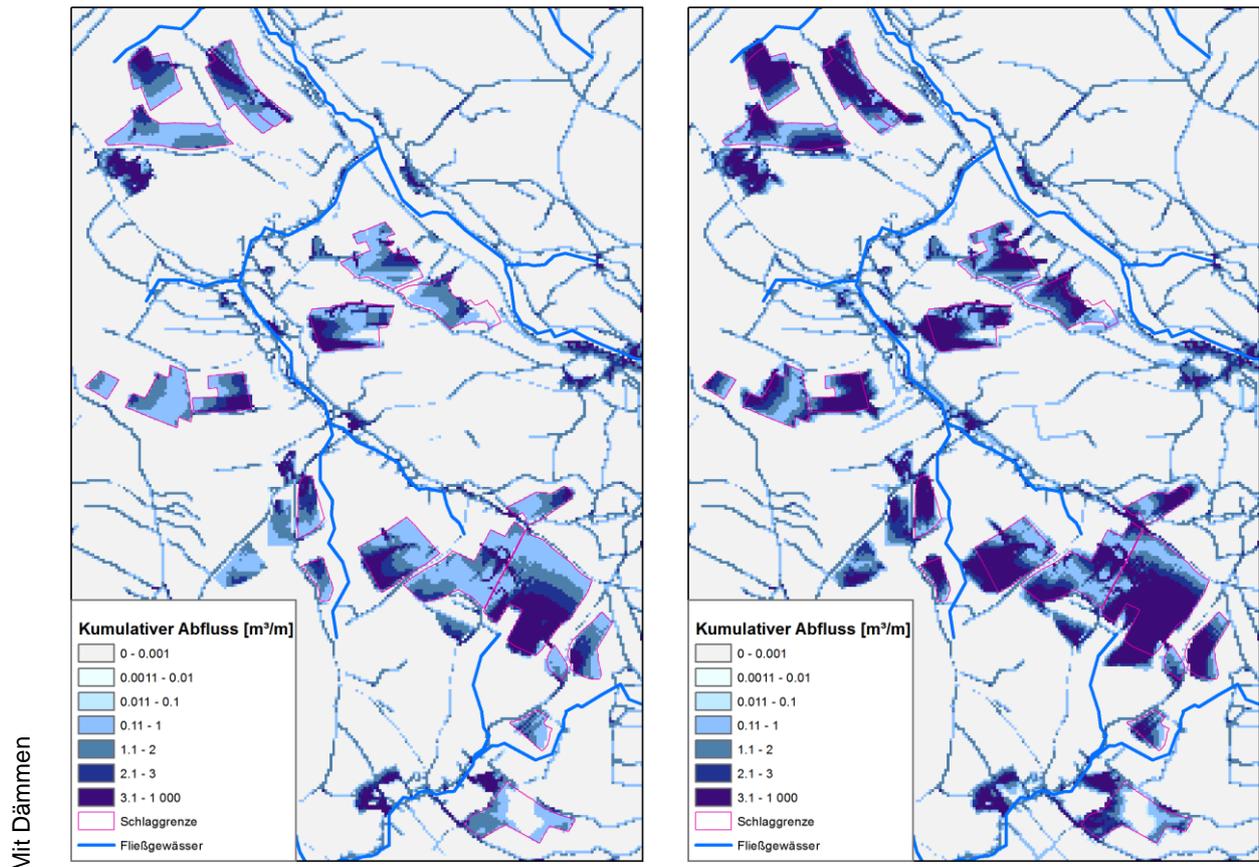


Abbildung 29: Prognosekarten des Oberflächenabflusses für das 10-jährliche Starkregenereignis bei normaler Bodenfeuchte

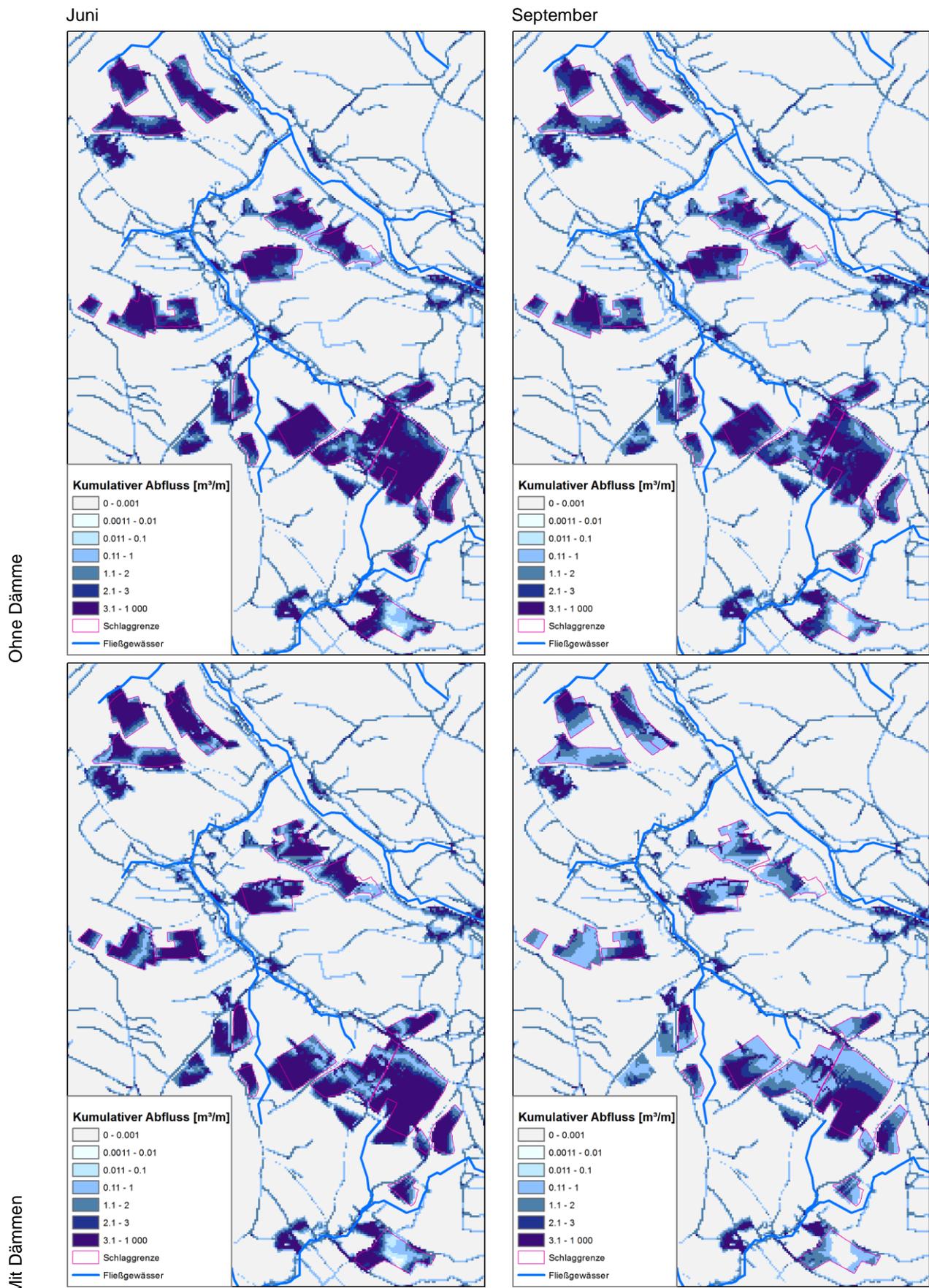


Abbildung 30: Prognosekarten des Oberflächenabflusses für das 10-jährliche Starkregenereignis bei hoher Bodenfeuchte

Die folgenden Untersuchungen wurden für alle 19 Ackerschläge durchgeführt. Weil das Verhalten der Flächen nahezu identisch ist, werden hier nur exemplarisch die Schläge 3, 7 und 15 (vgl. Abbildung 15) dargestellt. Die Werte stellen jeweils die Summe des Infiltrationsüberschusses (Niederschlags minus Infiltration; engl. Infiltration excess runoff) aller Zellen eines Schlags dar.

Bei der Dammsituation wird die gleiche Abflussmenge über einen verringerten Querschnitt geleitet. Damit steigen zwar die Abflusshöhe und -geschwindigkeit, das Abflussvolumen bleibt jedoch nahezu gleich. Die Parametrisierung weist im Herbst eine etwas höhere Lagerungsdichte auf. Die Lagerungsdichte ist im Juni noch geringer, weil die Kartoffeldämme erst im Frühjahr aufgehäufelt wurden und somit lockerer sind. Zudem ist die Infiltration durch Verschlammung im Herbst etwas vermindert.

Weil die Dämme bzw. Furchen im Modell keinen direkten Einfluss auf die Infiltration und somit auf die Abflussbildung haben, sind nur geringe Unterschiede zwischen der Variante mit und ohne Bearbeitungsrichtung zu erkennen. Da die Bodenfeuchte nach KA5 in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte steht, weist die Feuchtvariante im Herbst einen erheblich geringeren Wassergehalt als im Juni auf, sodass der Unterschied zwischen ‚normal‘ und ‚feucht‘ kleiner ist.

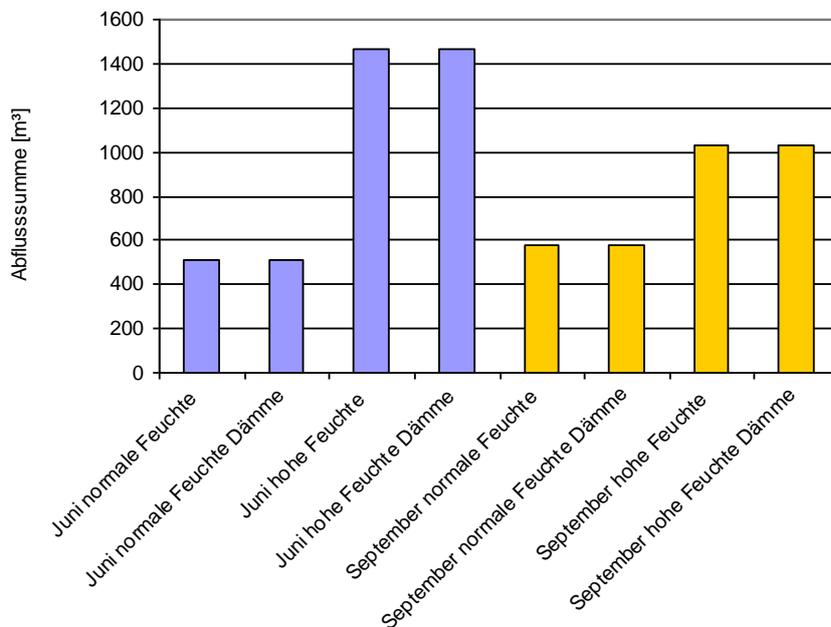


Abbildung 31: Abflusssumme auf Schlag 3 bei jeweils vier Szenarien im Juni und September

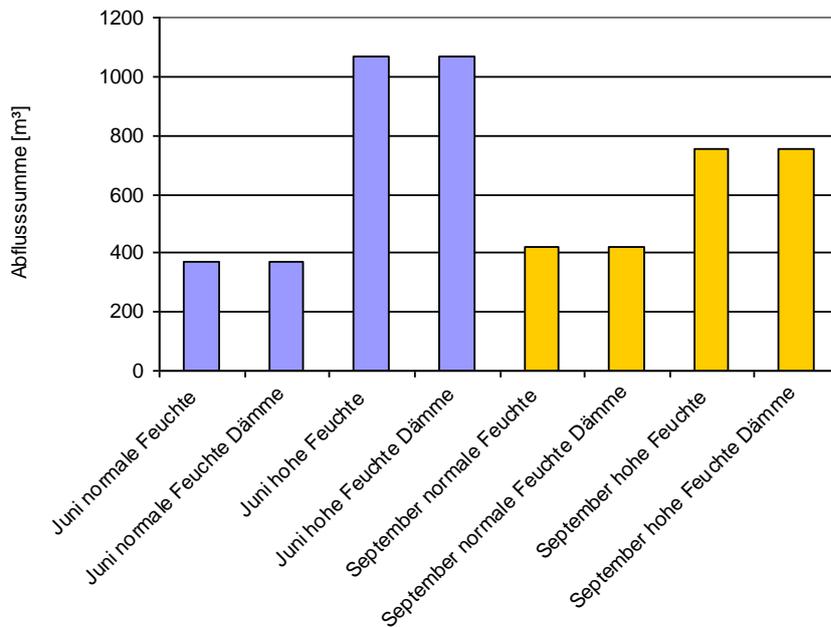


Abbildung 32: Abflusssumme auf Schlag 7 bei jeweils vier Szenarien im Juni und September

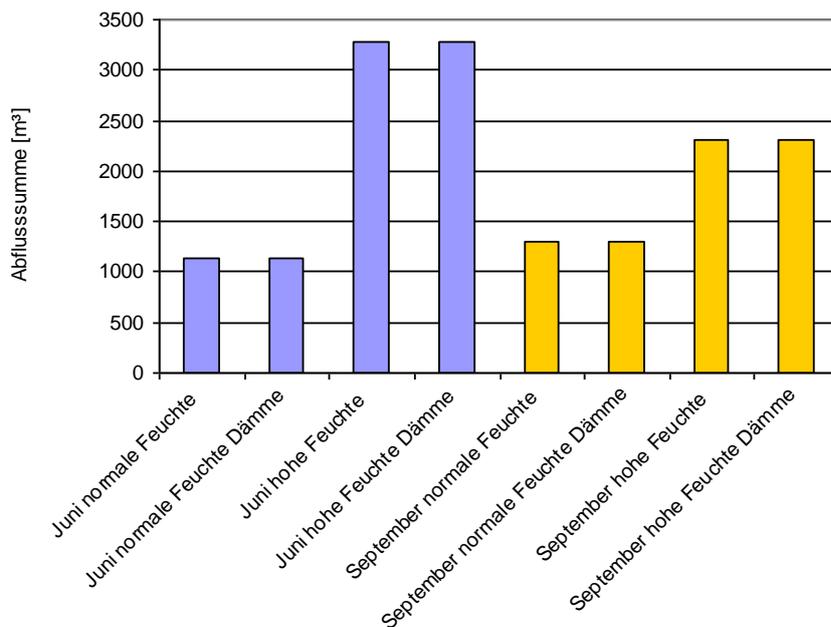


Abbildung 33: Abflusssumme auf Schlag 15 bei jeweils vier Szenarien im Juni und September

6.3.2 Auswirkungen auf die Anzahl der Überstaupunkte

Die geringe Zunahme des Abflusses bei den Herbstszenarien führt zu einer starken Zunahme der Dammüberstauungen (Tabelle 2). Bei den Juni-Szenarien treten kaum Durchbrüche auf. Obwohl bei den Varianten mit normaler Feuchte der Abfluss im September nur geringfügig höher ist als im Juni, treten erheblich mehr Durchbrüche auf. Bei den Feuchtvarianten erhöht sich die Zahl der Durchbrüche noch stärker, obwohl die Abflusssummen geringer als im Juni sind. Der Grund hierfür ist eine deutliche Abnahme der Fließgeschwindigkeit (Abbildung 34) des Oberflächenabflusses im September. Diese Abnahme resultiert wiederum aus der Zunahme der Rauigkeit durch die Vegetation, die für das Szenario vorausgesetzt wurde. Die geringere Fließ-

geschwindigkeit erhöht die Filmdicke des Abflusses (Abbildung 35), der teilweise über die Dammkronen fließt. Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen jeweils die Modellwerte für das zweite Intervall des 10-jährlichen Starkregens bei hoher Bodenfeuchte.

In der Realität befindet sich jedoch in den Furchen selbst wenig Vegetation, sodass die saisonalen Unterschiede geringer sind. Das würde bedeuten, dass im Herbst ein geringeres Überstau-Risiko besteht, gleichzeitig aber mit höheren Erosionsraten zu rechnen wäre. Diese These müsste in Felduntersuchungen überprüft werden.

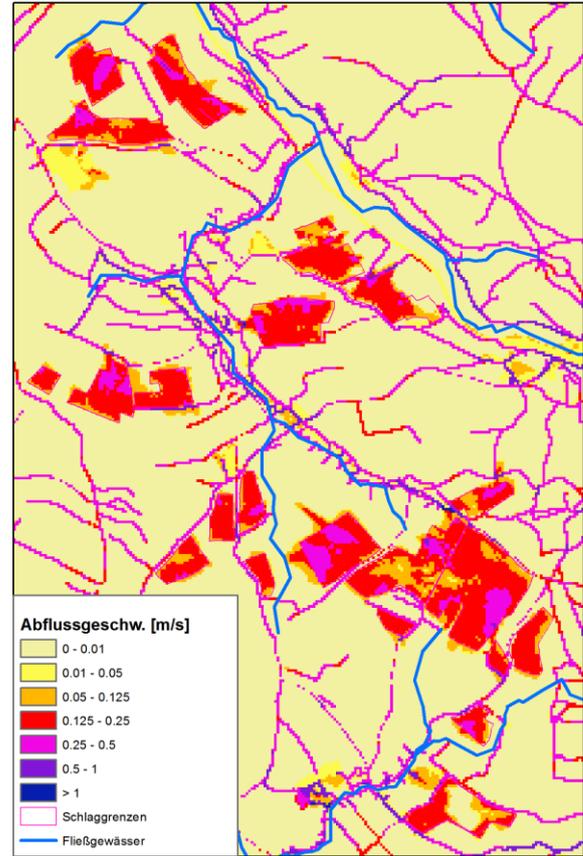
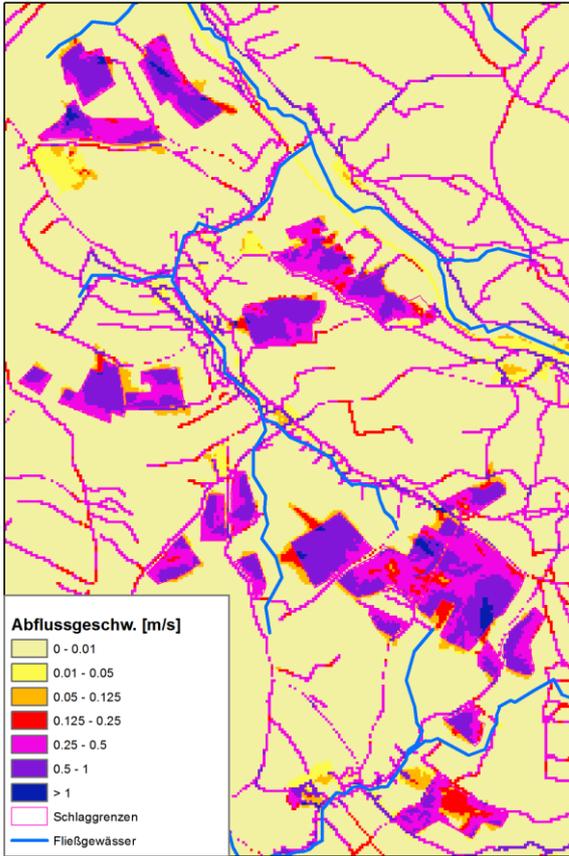
Tabelle 2: Anzahl der simulierten Überstaupunkte

Szenario	Juni	September
normale Bodenfeuchte; keine Dämme	0	0
normale Bodenfeuchte; Dämme 0,25 cm; angenommener Überstau bei 70 % Stauhöhe	2	98
hohe Bodenfeuchte; Dämme 0,25 cm; angenommener Überstau bei 70 % Stauhöhe	7	136

Juni

September

Ohne Dämme



Mit Dämmen

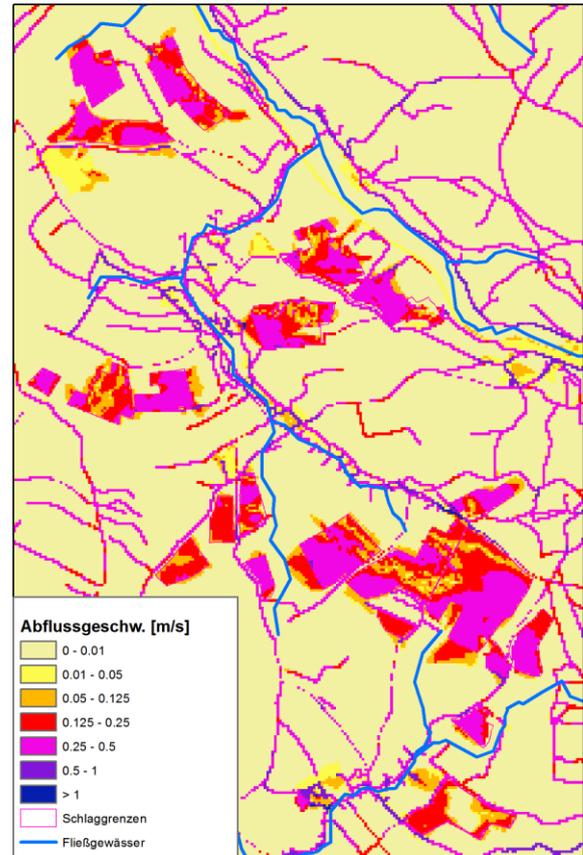
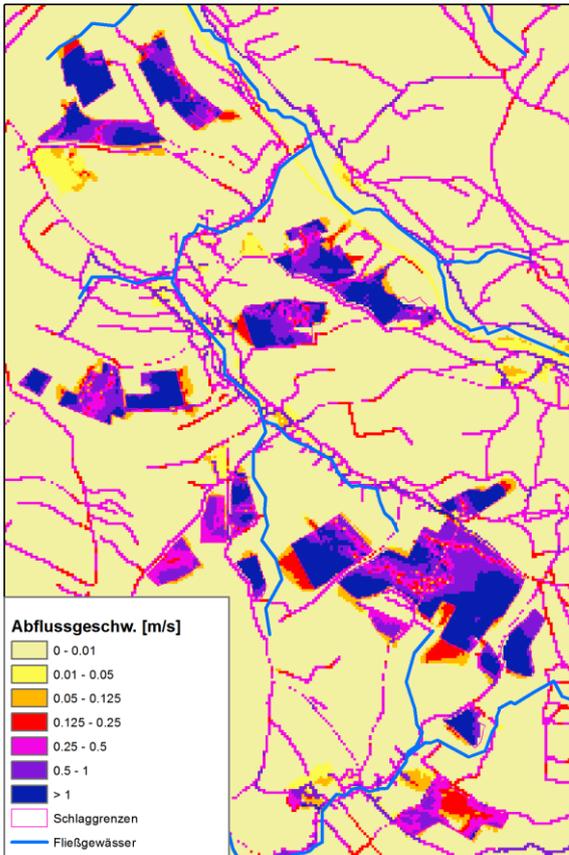


Abbildung 34: Geschwindigkeit des Oberflächenabfluss-Films

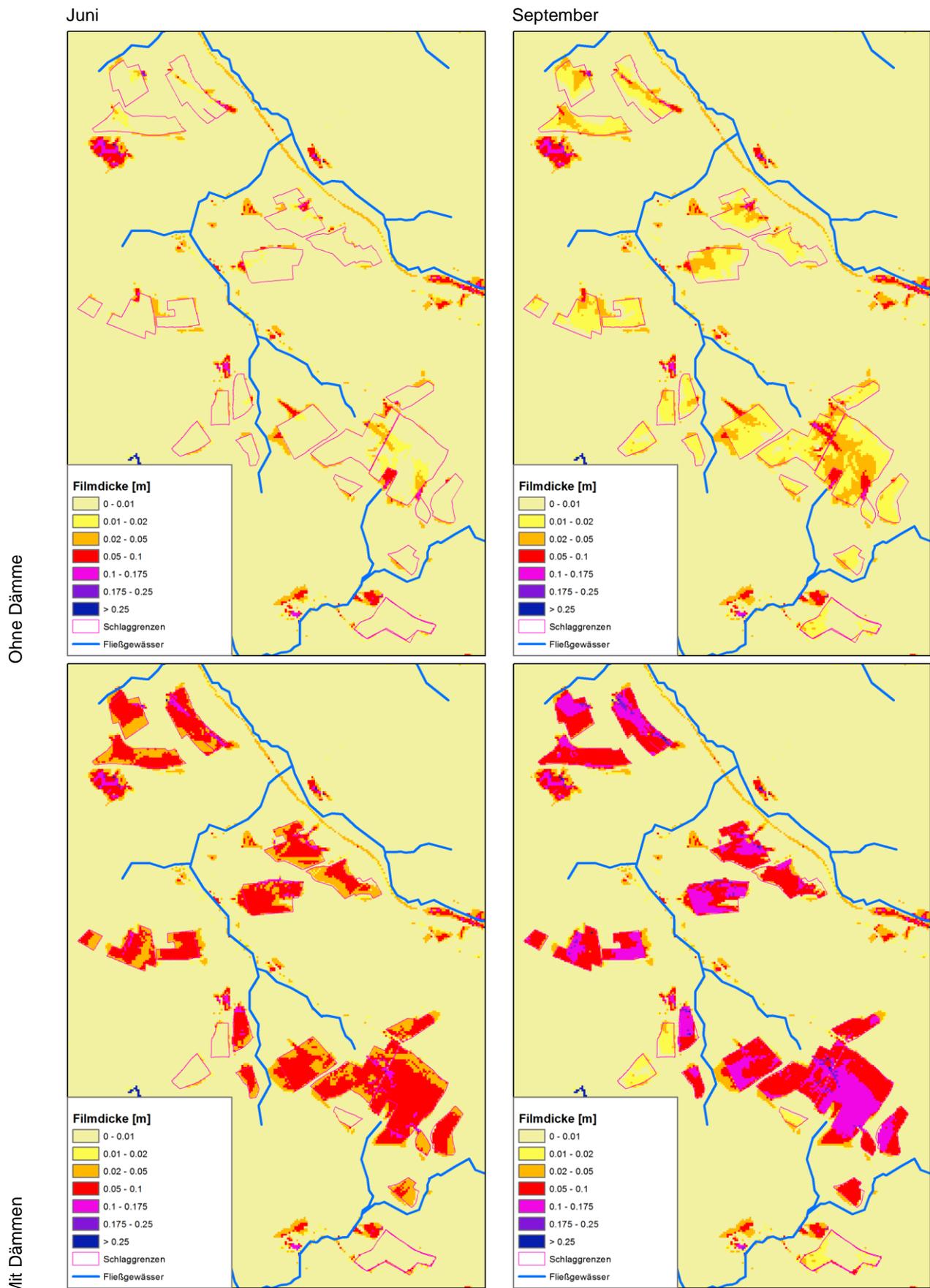


Abbildung 35: Höhe des Oberflächenabflusses

6.3.3 Auswirkungen auf Erosion und Deposition

Die 36 bis 41 zeigen die Ergebniskarten für die Szenarien für

- den zellbezogenen Bodenabtrag bzw. Deposition (Abbildungen 36 und 37),
- den schlagbezogenen gemittelten Bodenabtrag (Abbildungen 38 und 39) und
- die durch die Zelle bewegte Sedimentmasse (Abbildungen 40 und 41).

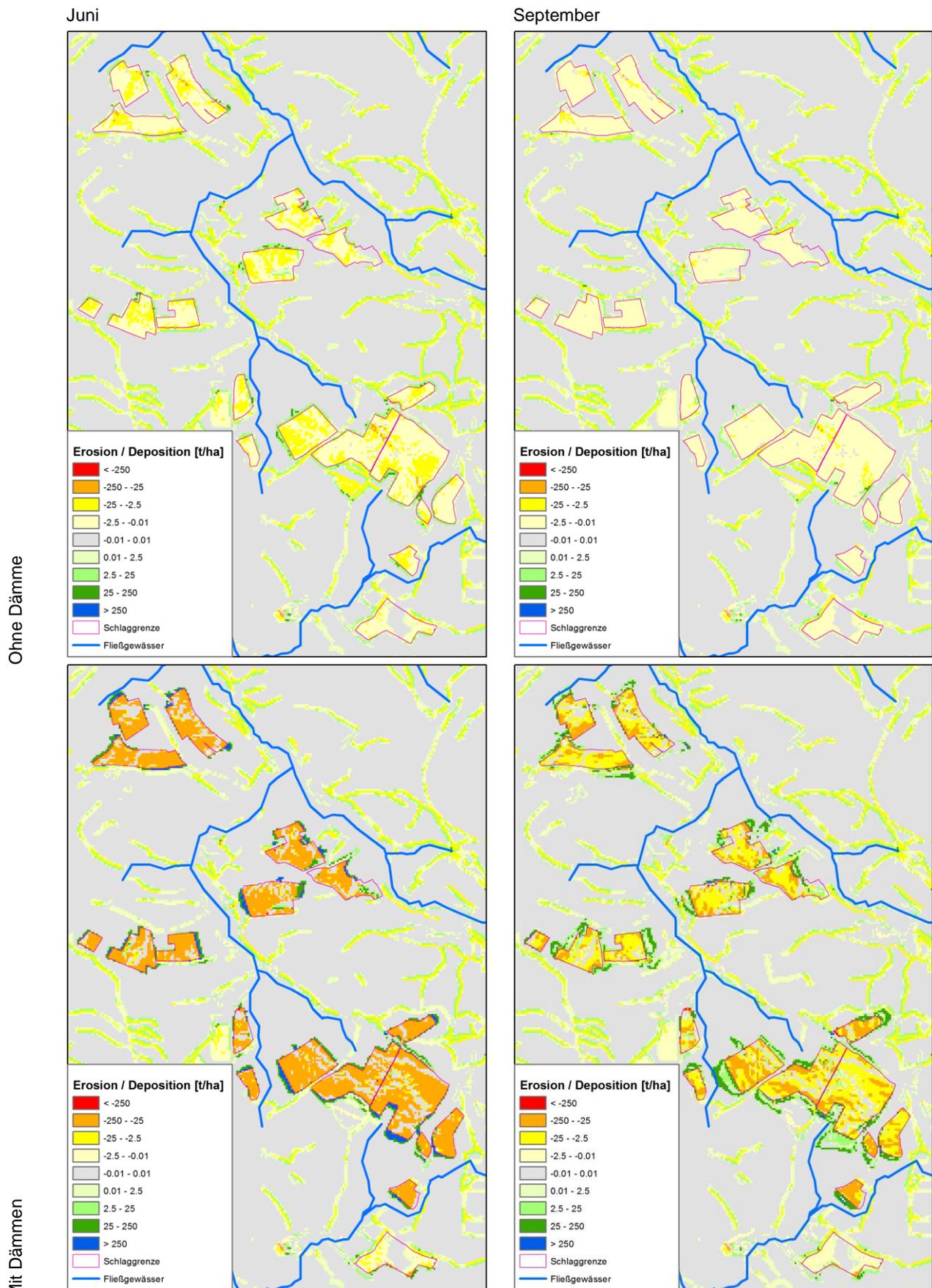


Abbildung 36: Prognosekarten der Bodenerosion für das 10-jährliche Starkregenereignis bei normaler Bodenfeuchte

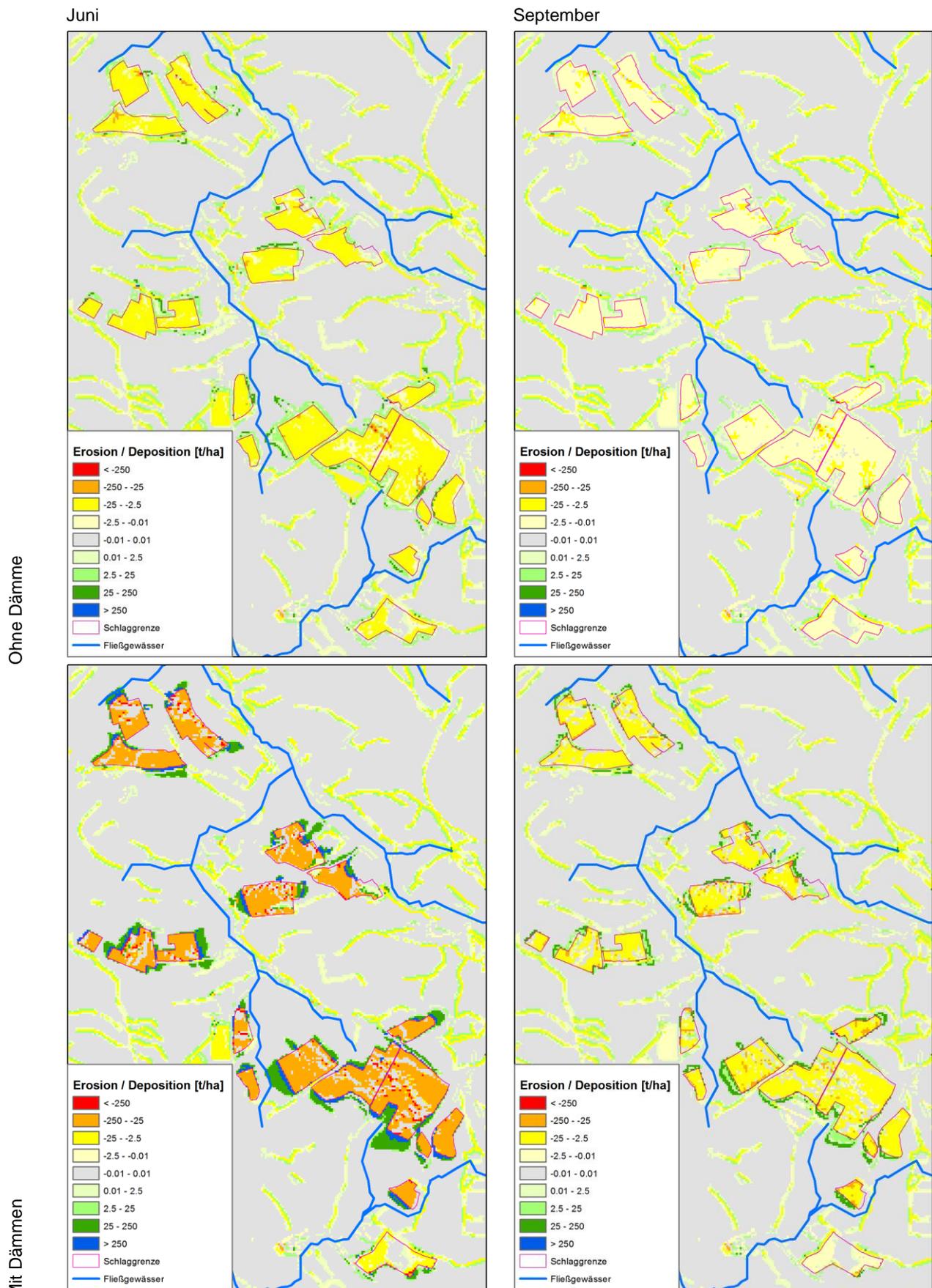


Abbildung 37: Prognosekarten der Bodenerosion für das 10-jährliche Starkregenereignis bei hoher Bodenfeuchte

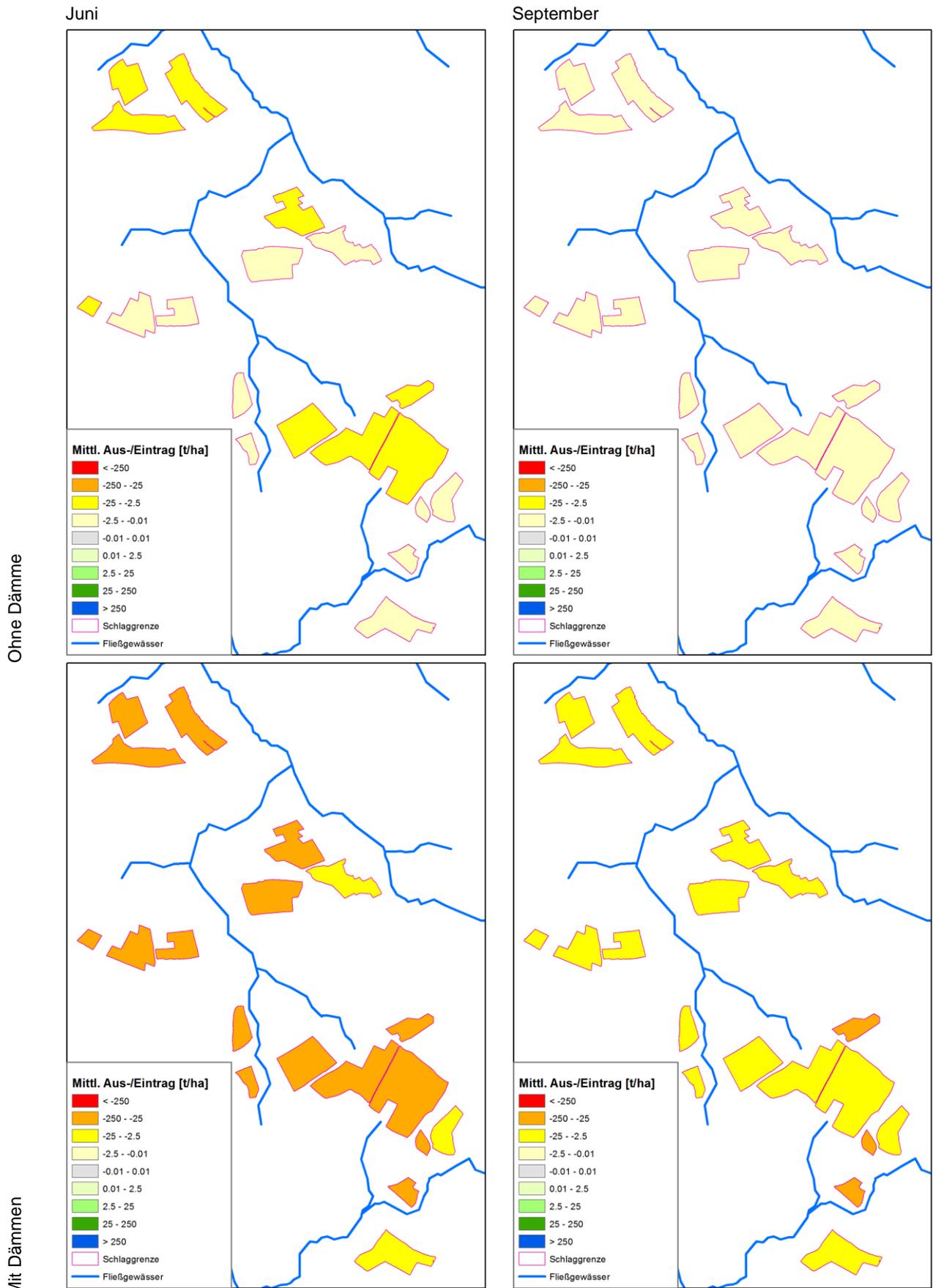


Abbildung 38: Prognosekarten des mittleren schlagbezogenen Bodenabtrags für das 10-jährliche Starkregenereignis bei normaler Bodenfeuchte

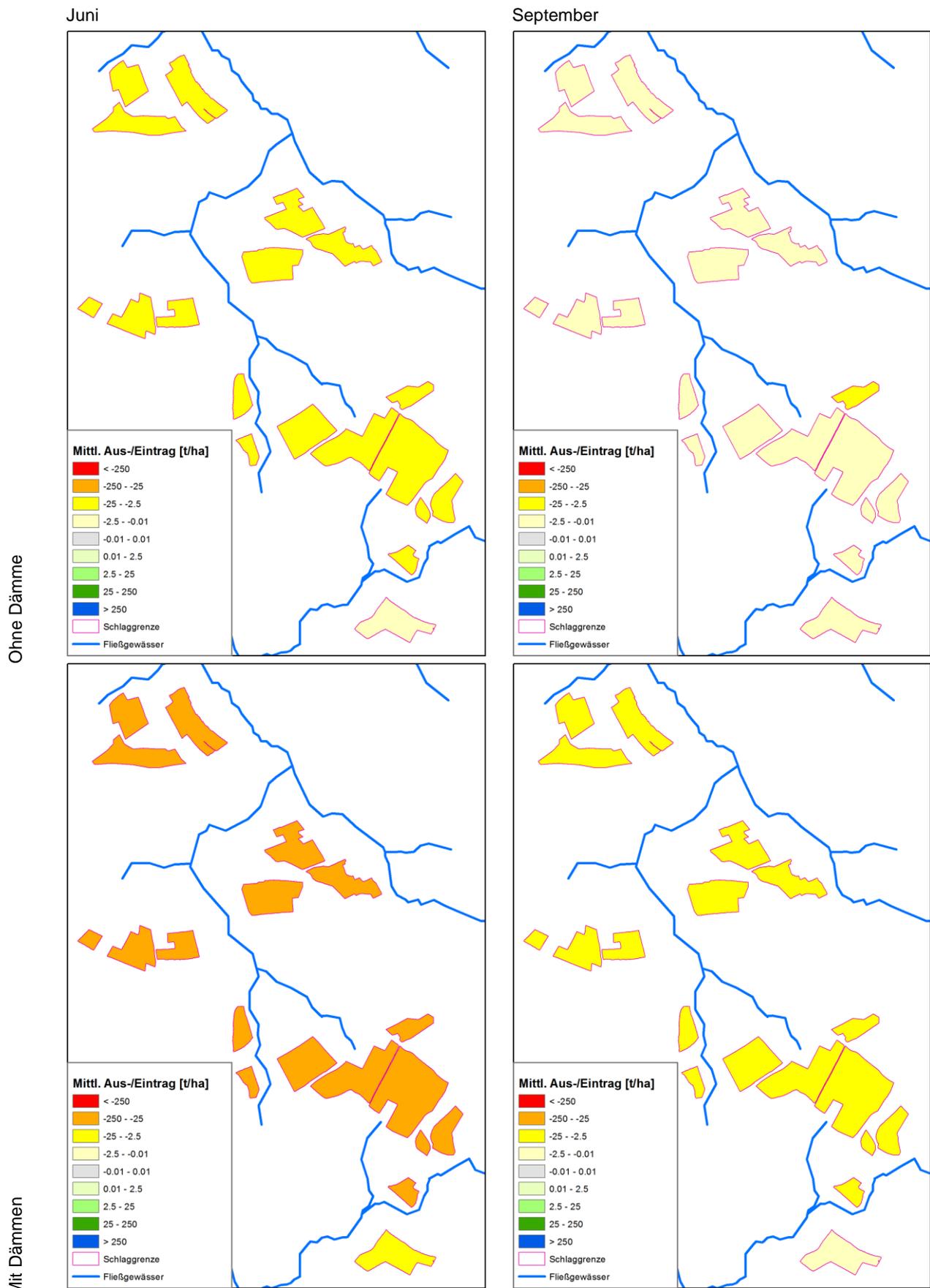


Abbildung 39: Prognosekarten des mittleren schlagbezogenen Bodenabtrags für das 10-jährliche Starkregenereignis bei hoher Bodenfeuchte

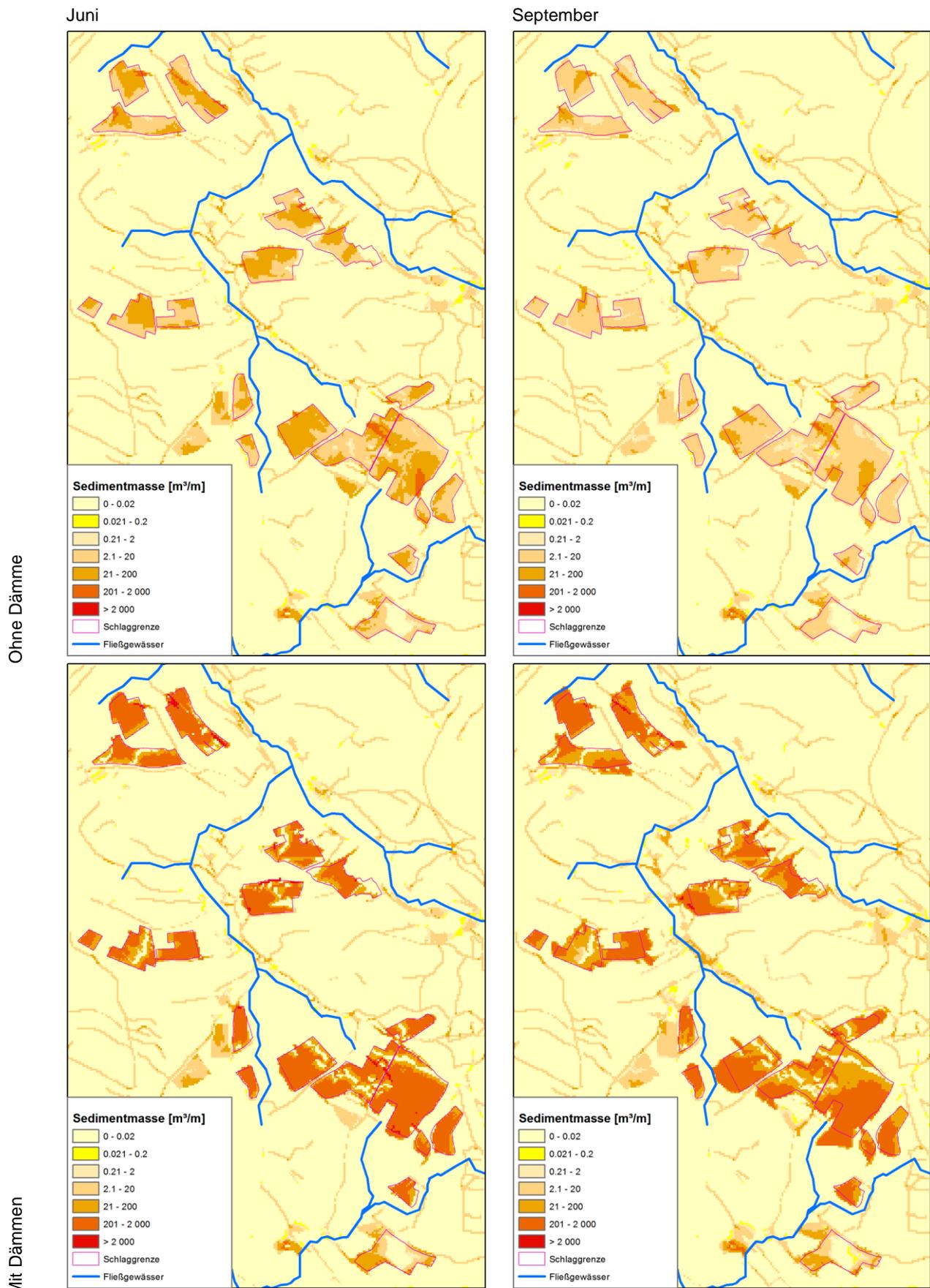


Abbildung 40: Prognosekarten der transportierten Sedimentmenge für das 10-jährliche Starkregenereignis bei normaler Bodenfeuchte

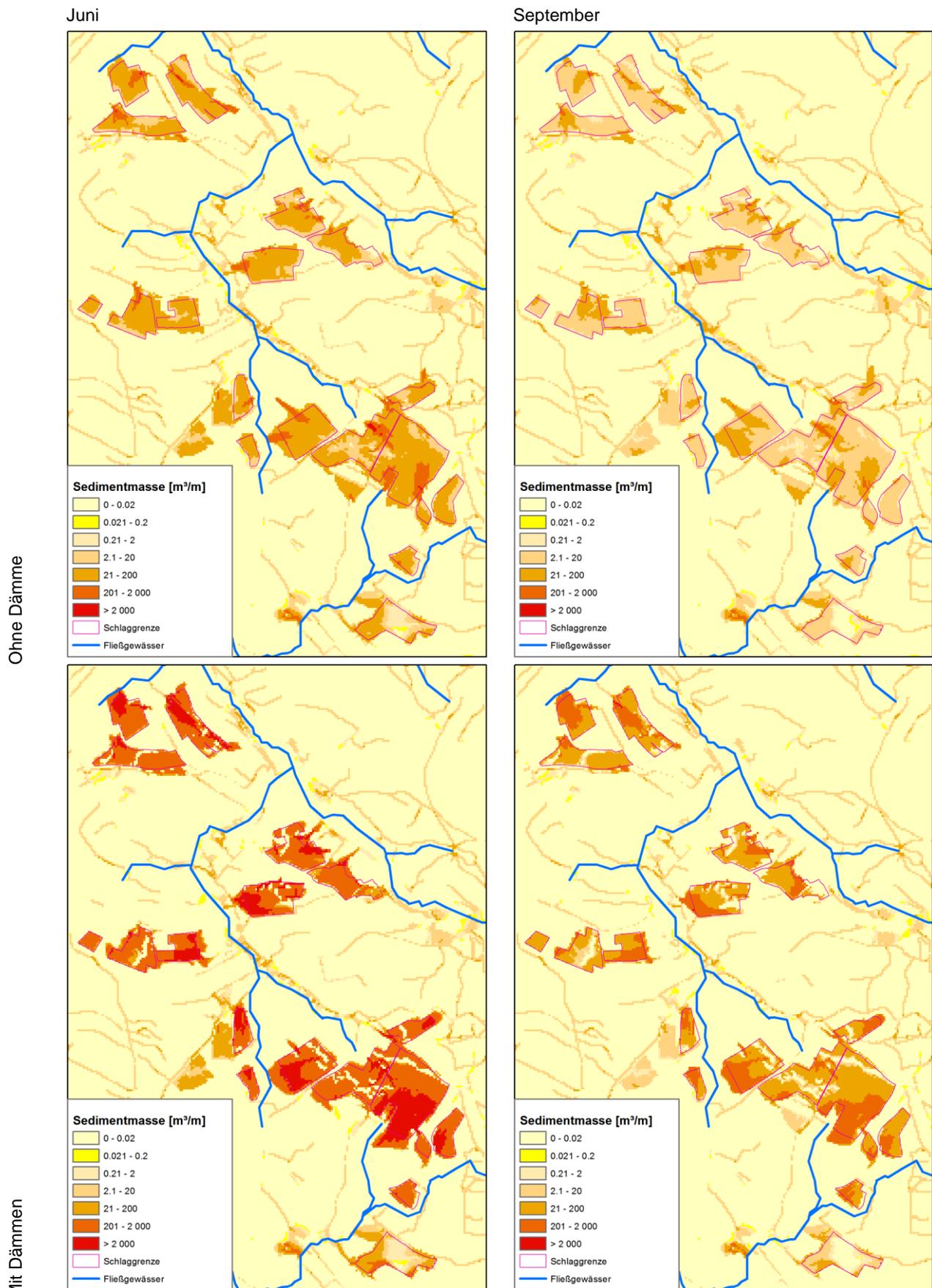


Abbildung 41: Prognosekarten der transportierten Sedimentmenge für das 10-jährliche Starkregenereignis bei hoher Bodenfeuchte

Auch beim mittleren Abtrag zeigen die Abbildungen 42 bis 44 bei allen untersuchten Flächen untereinander ein nahezu identisches Verhalten. Verglichen mit dem Abfluss sind das jahreszeitliche Verhalten und das Verhältnis zwischen den Szenarien jedoch sehr unterschiedlich.

Der mittlere Abtrag beim Juni-Ereignis erhöht sich erheblich bei der Dammbearbeitung gegenüber dem Zustand ohne Dämme unter Annahme einer normalen Bodenfeuchte. Geht man von einer hohen Bodenfeuchte aus, verdreifacht sich der mittlere Abtrag auf den Flächen nochmals.

Im September verzehnfacht sich der Abtrag bei normaler und bei hoher Bodenfeuchte nach Einbringen der Kartoffeldämme. Der Unterschied zwischen den Simulationen mit normaler und mit hoher Feuchte ist jedoch durch den geringen Anstieg des Feuchtwertes (s. Kapitel 6.3.1) gering.

Beim September-Ereignis sind die mittleren Abträge jedoch deutlich niedriger als im Juni (Abbildungen 42 bis 44). Der Grund ist der höhere Erosionswiderstand, die höhere Rauheit und die bessere Bedeckung im September.

Bei der Dammsituation wird die gleiche Abflussmenge über einen verringerten Querschnitt geleitet. Damit erhöhen sich Abflusshöhe und -geschwindigkeit. Als Folge steigt die Erosionsleistung des Abflusses stark an, weil die Fließgeschwindigkeit im Quadrat in die Berechnung des Impulsstroms des Abflusses eingeht.

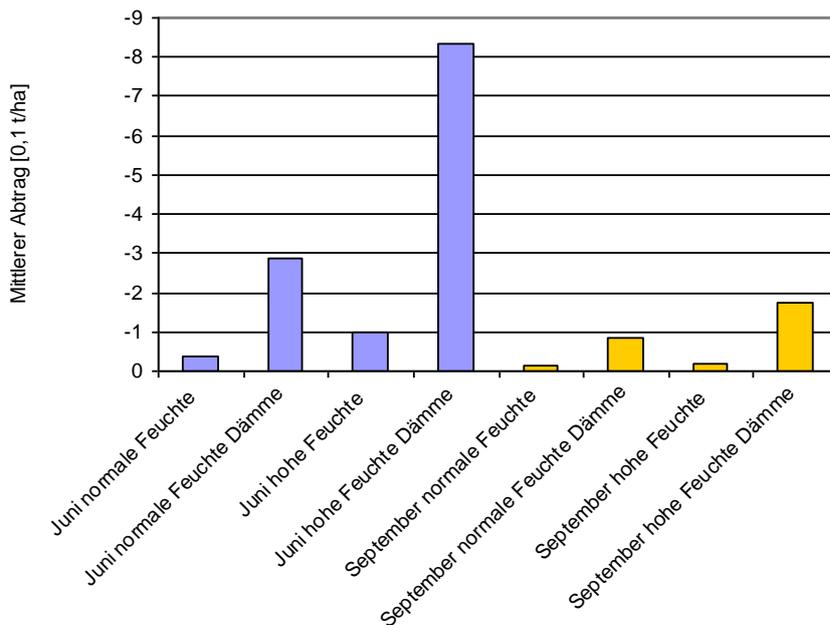


Abbildung 42: Mittlerer Abtrag auf Schlag 3 bei jeweils vier Szenarien im Juni und September

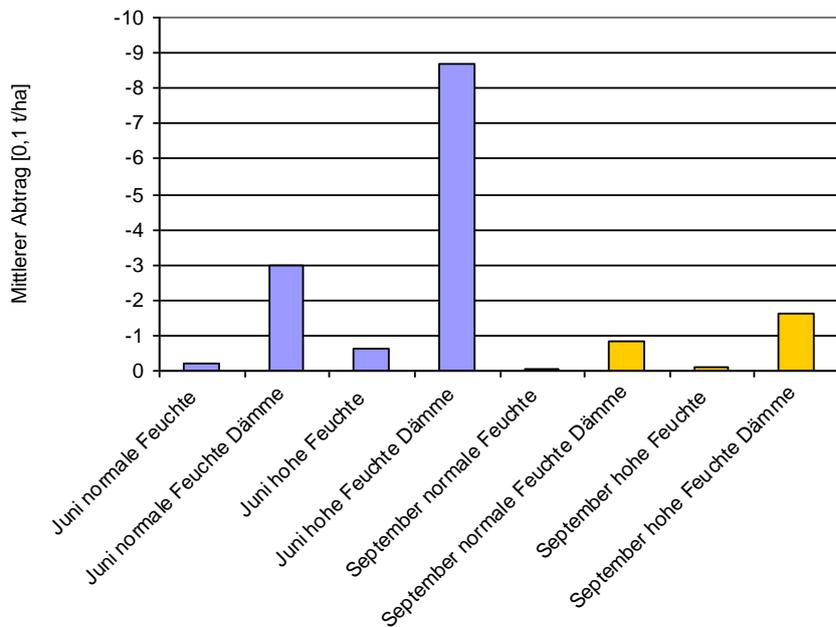


Abbildung 43: Mittlerer Abtrag auf Schlag 7 bei jeweils vier Szenarien im Juni und September

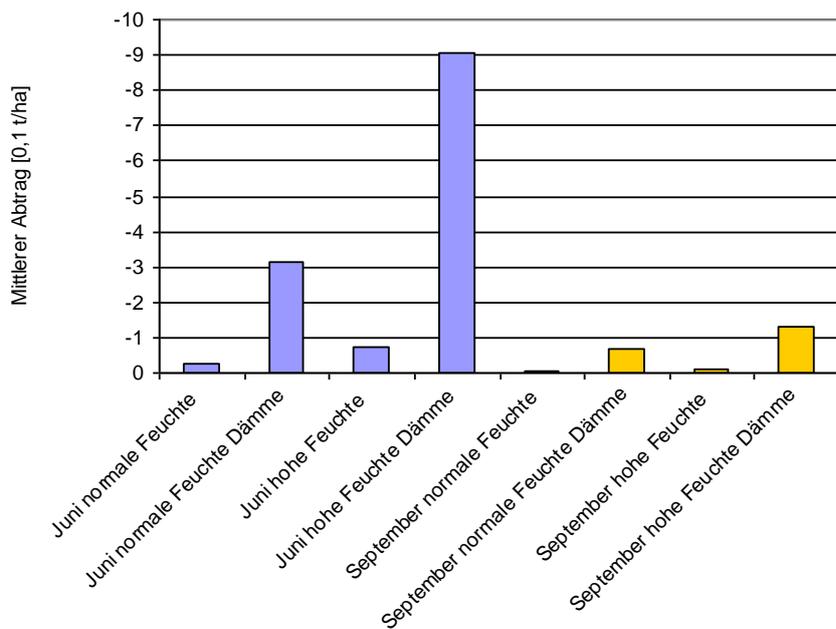


Abbildung 44: Mittlerer Abtrag auf Schlag 15 bei jeweils vier Szenarien im Juni und September

7 Beregnungsversuch

7.1 Versuchsaufbau

Der Aufbau der Anlage orientiert sich an der von ASTALOSCH (1990) und SCHRAMM (1994) beschriebenen Großberegnungsanlage.

Die Kopplung von drei Beregnungsmodulen ermöglicht die Beregnung einer 3 m² großen Fläche, die durch einen Metallrahmen von 45 cm Höhe gegenüber der Umgebung abgegrenzt wird (vgl. Abbildung 45). Die Seitenbleche wurden jeweils auf der Dammkrone installiert, um eine Abflusskonzentration in der Parzellenmitte zu gewährleisten.

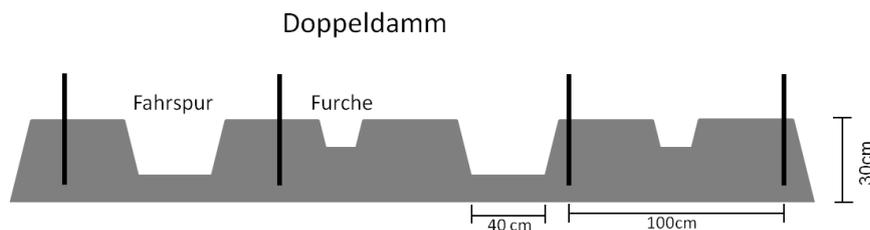


Abbildung 45: Position der Seitenbleche im Bereich der Fahrspur (links) und der Furche (rechts)

Der Auffangkasten am unteren Ende des Rahmens wird in den Boden eingesetzt und im Übergang zur Parzelle abgedichtet. Am Kasten wird ein Ablaufrohr zum Auffangen von Oberflächenabfluss und Sediment angebracht. Das Modulgerüst wird über die höhenverstellbaren Füße konstant auf 2 m Höhe ausgerichtet (vgl. Abbildung 46).

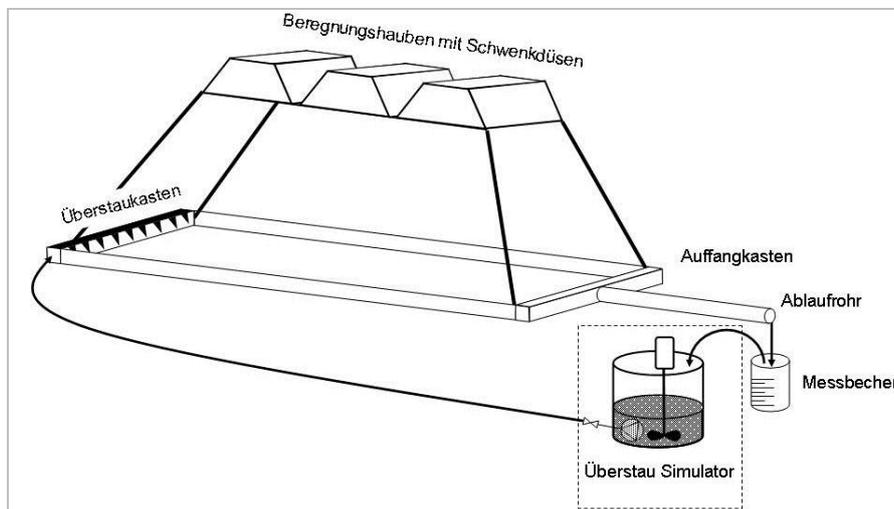


Abbildung 46: Aufbau der Beregnungsanlage

Am oberen Ende des Beregnungsrahmens befindet sich das Überstauomodul, in das mittels Schmutzwasserpumpe sedimentbeladenes Wasser eingespeist werden kann.

Die identischen Beregnungsmodul sind jeweils mit einer Flachstrahldüse ausgestattet, die über einen Getriebemotor über die Beregnungsfläche geschwenkt werden kann. Die Niederschlagsintensität wird über die

Schwenkgeschwindigkeit und die Verweilzeit in den Umkehrpunkten geregelt. Auffangrinnen in den Hauben dienen zur Ableitung des Überschusswassers, während die Düsen an den Umkehrpunkten verweilen. Bei den Düsen handelt es sich um das Fabrikat VeeJet 80/100 der Fa. Spraying Systems, die aufgrund ihres mit natürlichen Starkregen vergleichbarem Tropfenspektrums [-] und Fallgeschwindigkeit der Tropfen [m/s] einen Quasistandard darstellen (AUERSWALD et al. 1992; FOSTER et al. 1982; HASSEL & RICHTER 1992; KAINZ et al. 1992).

Um eine gleichmäßige Niederschlagsverteilung zu gewährleisten, müssen die Flachstrahldüsen über die Fläche bewegt werden. Die Niederschlagsintensität wird über die Schwenkgeschwindigkeit und die Verweilzeit in den Umkehrpunkten geregelt.

Der Düsenvordruck und die Niederschlagsintensität bestimmen das Tropfenspektrum und die Fallgeschwindigkeit bzw. die daraus resultierende Impulsstromdichte (N/m^2) des produzierten Niederschlages.

ZIMMERMANN (1989) untersuchte mittels Distrometer die durch VeeJet 80/100 an einem Kleinregner erzeugten Niederschläge für unterschiedliche Druckstufen. Verglichen mit den Angaben von DIEM (1971), WISCHMEIER (1978) und BRANDT (1989) zu natürlichen Niederschlägen ergaben sich die besten Übereinstimmungen hinsichtlich Tropfenspektrum und Fallgeschwindigkeit der Tropfen für 0,5 bar Düsenvordruck und >30 mm/h Niederschlag (GERLINGER 1997; SCHRAMM 1994; ZIMMERMANN 1989).

Nach Auswahl einer für den Schlag repräsentativen Fläche wird diese abgesperrt, um ein versehentliches Betreten und Zerstören zu verhindern. Danach werden der Rahmen und die Anlage installiert. Der Düsenvordruck [bar] wird vor jedem Experiment über ein Druckminderungsventil geregelt. Die Beregnungsintensität [mm/h] wird über die Einstellung von Schwenkgeschwindigkeit und Verweildauer der Düsen in den Umkehrpunkten variiert. Die angestrebte Niederschlagsintensität orientiert sich an dem mittleren Wert von ca. 36 mm/h des Bodenerosionsmessprogramms Sachsen. Trotz sorgfältiger Voreinstellung der Anlagenparameter kann die Intensität leicht variieren. Um die genaue Intensität für das Einzelexperiment zu bestimmen, wird die Fläche mit einer Folie abgedeckt, um einen vollständigen Oberflächenabfluss zu gewährleisten. Aus dem Abfluss kann die Niederschlagsmenge pro Flächen- und Zeiteinheit bestimmt werden.

7.2 Versuchsdurchführung

Nach Entfernen der Folie beginnt die eigentliche Messung. Der Beregnungsversuch gliedert sich in zwei Teilerperimente. Im ersten Teil erfolgt die Bestimmung der Infiltrationsmenge [l] zur nachträglichen Ermittlung des Skinfaktors. Dazu wird die abfließende Wassermenge [ml] minütig mit Hilfe eines Messbechers bestimmt. Der Oberflächenabfluss wird in einer 200 l-Tonne aufgefangen. Bei Erreichen konstanter Infiltrationsraten bzw. bei einer ausreichenden abgeflossenen Wassermenge (min. 50 l), schließt sich nahtlos das zweite Teilerperiment an. Es dient der Simulation der Sedimentkonzentration [g/l] zur Bestimmung des Erosionswiderstandes. Dazu wird der installierte Überstau zugeschaltet, um einen Zustrom sedimentbeladenen Wassers in die Parzelle zu gewährleisten. Die Menge des Zustroms [l] kann unter Feldbedingungen nicht genau bestimmt werden. Allerdings wird stets so viel sedimentbeladenes Wasser eingespeist, dass eine virtuelle Hanglänge von 15–35 m erreicht wird. Die Einspeisung muss demzufolge das 5- bis 12-Fache des Durchflusses der letzten Minute betragen. Die Beprobung des Oberflächenabflusses erfolgt analog zum ersten Experimentteil, im minütigem Rhythmus werden Sedimentproben in Kunststoffflaschen entnommen. Parallel dazu wird auf der Parzelle die Fließgeschwindigkeit des Abflusses [m/s] mit dem Farbtracer „Vitasyn Blau AE85“. Ermittelt wurde die Zeit [s], die der Tracer benötigt, die gesamte Plotlänge [3 m] zu überwinden. In jedem Überstauexperiment wurden mindestens vier Tracerversuche, oft auch in Bereichen unterschiedlicher Fließgeschwindigkeit, durchgeführt.

7.3 Probenahme und Laboranalysen

Die Hangneigung wird mittels Wasserwaage und Gliedermaßstab ermittelt, die Bodenbedeckung mit Hilfe der Schätztafel abgeleitet (Ad-Hoc-AG Boden 2005; MICHAEL et al. 1996).

Parallel zum Beregnungsexperiment erfolgte die Entnahme der Bodenproben zur nachträglichen Bestimmung direkt messbarer Modellparameter (Lagerungsdichte, C_{org} -Gehalt, Anfangsbodenfeuchte, Korngrößenzusammensetzung). Zu diesem Zweck wurden aus 20 cm Tiefe jeweils sechs Stechzylinder (100 cm^3) und eine Mischprobe entnommen.

Die Mischproben wurden im Labor nach DIN ISO 11464 vorbereitet. Eine Teilprobe des Feinbodens wurde zur Korngrößenanalyse nach dem Sieb- und Schlämverfahren DIN ISO 11277 verwendet, wobei auf eine chemische Vorbehandlung mit H_2O_2 verzichtet wurde. Um den bei der Erosion auftretenden mechanischen Zerfallsprozess der Bodenaggregate nachzubilden, wurden die Proben im Ultraschallbad vorbehandelt (MICHAEL et al. 1996). Eine weitere Teilprobe des Feinbodens wurde zur Bestimmung des Gehaltes an organischem Kohlenstoff gemäß DIN ISO 10694 verwendet.

Die Stechzylinderproben dienen der Ermittlung des Anfangswassergehaltes und der Lagerungsdichte nach DIN ISO 11272.

7.4 Parameterableitung

7.4.1 Skinfaktor

Die Ermittlung des Skinfaktors wie auch des Erosionswiderstandes (s. u.) erfordert die vollständige Parametrierung des Bodenerosionsmodells EROSION-2D, der Hangprofilversion von EROSION-3D mit den oben aufgeführten Messdaten.

Im Modell wird der Infiltrationsversuch mit den oben genannten Messdaten simuliert. Dabei wird über die Veränderung des Skinfaktors der Gesamtabfluss iterativ dem im Experiment gemessenen Abfluss angepasst (vgl. Abbildung 47).

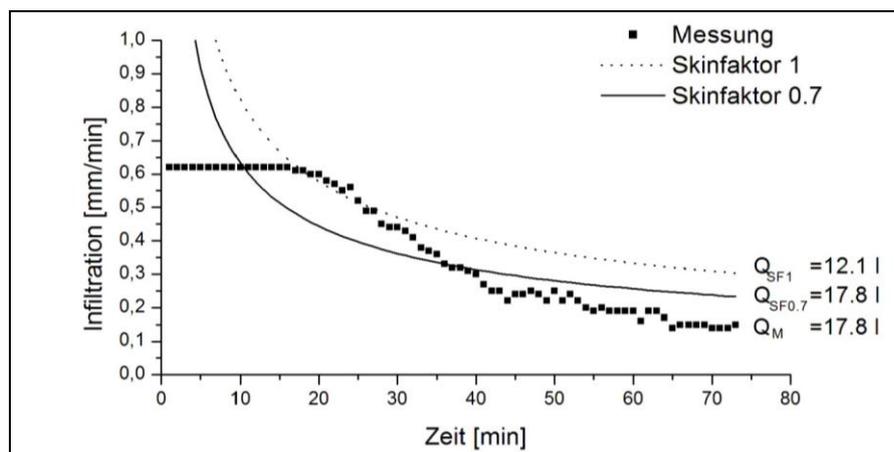


Abbildung 47: Kalibrierung der Infiltrationsrate über den Skinfaktor

7.4.2 Oberflächenrauigkeit

Nach Ermittlung der Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses (s. o.) lässt sich nach Gleichung 22 die Oberflächenrauigkeit MANNINGS n berechnen.

$$n = v_q^{-\frac{5}{3}} \cdot q^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad \text{Gl. 22}$$

n	Oberflächenrauigkeit nach Manning [s/m ^{1/3}]
v_q	Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses [m/s]
q	Abflussrate [m ³ /(s*m)]
S	Hangneigung [-]

Es ist zu beachten, dass aufgrund der typischen Mikromorphologie von Kartoffeldämmen Abflusskonzentration nur im Bereich der Furche bzw. der Fahrspur auftritt. Aus diesem Grund verringert sich die Einheitsbreite zur Berechnung des Volumenstroms von 1 m auf ca. 0,4 m. Dieser Sachverhalt wurde bei der Berechnung der Oberflächenrauigkeit berücksichtigt.

7.4.3 Erosionswiderstand

Die Bezugsgrößen zur Ermittlung des bodenspezifischen Erosionswiderstandes sind die virtuelle Hanglänge der Versuchsparzelle, der Durchfluss und die mittlere gemessene Sedimentkonzentration im Beregnungsexperiment bei zusätzlichem Überstau. Die virtuelle Hanglänge ergibt sich aus Gleichung 23 wie folgt:

$$vL_p = \frac{Q_{\bar{v}} \cdot L_p}{Q} \quad \text{Gl. 23}$$

vL_p	virtuelle Parzellenlänge [m]
L_p	Parzellenlänge [m]
Q	Durchfluss in der letzten Minute vor Überstau [m ³]
$Q_{\bar{v}}$	Durchfluss mit Überstau [m ³].

Dazu sind folgende Annahmen notwendig:

- Die ermittelte Endinfiltration ist für den Zeitraum des Überstauexperimentes konstant.
- Die über die Zeit des Zustroms gemittelte Sedimentkonzentration stellt den Bezugswert für den ersten Simulationszeitschritt nach Überstaubeginn dar.

Nach Anpassung der berechneten an die gemessene Abflussmenge über den Skinfaktor (vgl. Abbildung 48) wird der simulierte Sedimentaustrag durch Kalibrierung des Erosionswiderstandes der gemittelten Sedimentmenge im Strömungsexperiment angeglichen.

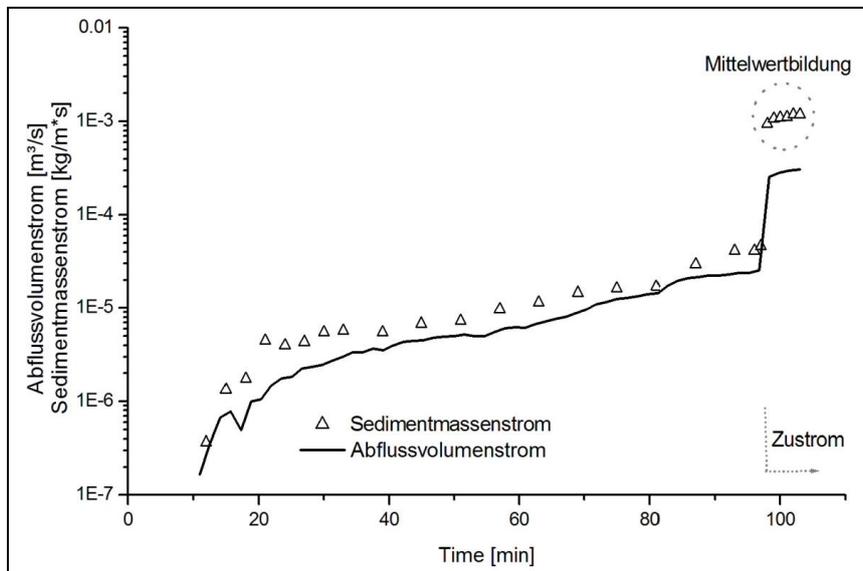


Abbildung 48: Oberflächenabfluss und Sedimentmassenstrom im Beregnungsexperiment

7.5 Ergebnisse

Die Beregnungsversuche (drei Messungen: Clausnitz I bis III) wurden am 10.05.2010 und am 18.05.2010 auf einem Kartoffelacker in Clausnitz, Sachsen durchgeführt. Das Kartoffellegen lag ca. zwei Wochen zurück, sodass die Keimung gerade erst eingesetzt hatte. Die Rahmenbedingungen (vgl. Tabelle 3) der Versuche sind sehr ähnlich. Die Infiltrationsverläufe, Oberflächenabflüsse und Sedimentabträge der einzelnen Beregnungsversuche (Abbildungen 68 bis 73) und die zugehörigen Datenblätter finden sich im Anhang (Kapitel 12).

Tabelle 3: Gemessene Parameter für Kartoffelflächen (ermittelt in Beregnungsversuchen)

Parameter	Clausnitz I (FS)	Clausnitz II (D)	Clausnitz III (FS)
Hangneigung [-]	10	8	10
Niederschlagsintensität [mm/min]	0.67	0.63	0.67
C _{org} -Gehalt [%]	3.78	3.24	2.89
Bodenart	Uls	Us	Uls
Skelett [%]	20,6	26,3	28,3
Lagerungsdichte [g/cm ³]	1.22	1.22	1.22
Anfangsbodenfeuchte [Vol.-%]	30	32	32
Bedeckung [%]	18	14	14
Endinfiltration [%]	0,33	0,28	0,33
Sedimentkonzentration [g/l]	17	32	22
Abflussbeiwert [-]	0.26	0.38	0.24
Fließgeschwindigkeit [m/s]	0.34	0.33	0.34

FS = Fahrspur, D = Damm

Die Ergebnisse machen deutlich, dass der Bereich „Damm“ bezüglich der betrachteten Prozesse anders reagiert als der Bereich „Fahrspur“. Dieser zeigt sowohl eine geringere Gesamtinfiltration als auch eine höhere Sedimentkonzentration. Noch deutlicher wird dieser Sachverhalt bei Ableitung der Modellparameter Rauigkeit, Skinfaktor und Erosionswiderstand (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Abgeleitete EROSION-3D-Modellparameter

Parameter	Clausnitz I (FS)	Clausnitz II (D)	Clausnitz III (FS)
Skinfaktor [-]	0.087	0.072	0.115
Oberflächenrauigkeit [s/m ^{1/3}]	0.01	0.013	0.011
Oberflächenrauigkeit [s/m ^{1/3}]*	0.0056	0.0069	0.0058
Erosionswiderstand [N/m]	0.00102	0.00053	0.00085
Erosionswiderstand [N/m]*	0.00146	0.00083	0.0012

* Der Berechnung liegt eine Fließbreite von 1 m zugrunde; FS = Fahrspur, D = Damm

8 Simulationsrechnungen mit den experimentell bestimmten Parametern

8.1 Parametrisierung

Die in den vorhergehenden Simulationsläufen in Kapitel 6.3 verwendeten Parameter entstammten dem Parameterkatalog Sachsen. Dieser berücksichtigt jedoch nicht den Kartoffelanbau in Furchen und die dabei einhergehenden spezifischen Bearbeitungseingriffe in die Bodenstruktur.

Mit den aus den Experimenten gewonnenen Parametern – u. a. Lagerungsdichte, Erosionswiderstand und Skinfaktor – wurden Vergleichsrechnungen zur Parametrisierung mit bisher vorhandenen Werten aus dem Parameterkatalog angestellt. Die verwendeten Modellparameter für Boden und Landnutzung zeigt Tabelle 5. Die Berechnungsversuche fanden am westlichen Rand von Fläche 1 (Abbildung 15) statt. Für alle Parameter wurden jeweils die Mittelwerte aus den drei Versuchen gebildet. Die Szenarien variieren daher folgende Randbedingungen:

- Einfluss der Geometrie
- Einfluss des Anbauverfahrens
- Bodenfeuchte

Tabelle 5: EROSION-3D-Eingabeparametertabelle für Ackerfläche 3 bzw. Ackerfläche 1

Randbedingungen: Nutzung: Kartoffeln Bearbeitung: konventionell Bodenart: mittel sandiger Lehm (Ls3)	Szenario Mai PKS	Szenario Mai Messung
Erosionswiderstand [N/m ²]	0.0023	0.0008
Hydraul. Rauigkeit [s/m ^{1/3}]	0.012	0.011
Bodenbedeckungsgrad [%]	8	15
Lagerungsdichte [kg/m ³]	1300	1220
Org. Kohlenstoffgehalt [M.-%]	1.7	3.3
Anfangswassergehalt [Vol.-%] normal (PKS)/ <i>feucht</i>	31/39	31/39
Skinfaktor [-]	0.29	0.09
Bodenart	Ls3 Mittel-sandiger Lehm Quelle: Bkkonz	Uls bzw. Ls3 Sandig lehmiger Schluff
Skelett [%]	9	25

Die Parameter der Messung wurden bei allen Kartoffel-Anbauflächen verwendet. Für beide Varianten wurde die Bodenart der Bkkonz 50 verwendet. Die Abweichung in der Bodenart könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei der Bodenartbestimmung keine chemische Dispergierung durchgeführt wurde und somit der Schluffgehalt höher ist.

Die Lagerungsdichte in der Messung ist recht gering, weil das Kartoffellegen erst zwei Wochen zuvor stattgefunden hatte. Die kleinere Lagerungsdichte und der größere Humusgehalt führen zu einer höheren Infiltration und somit zu einem geringeren Abfluss gegenüber der Parametrisierung nach dem Parameterkatalog Sachsen. Der geringere Skinfaktor vermindert dagegen die Infiltration etwas.

Bei Verwendung der experimentellen Parameter lassen der kleinere Erosionswiderstand und die geringere Rauigkeit einen höheren Abtrag erwarten.

8.2 Simulationsrechnungen

Die Simulationsrechnungen wurden für den Termin Mai im Gesamtgebiet durchgeführt. Zunächst wurde jeweils die Prognosekarte für den Zustand ohne Dämme bei normaler Bodenfeuchte erstellt (Szenario I). Szenario II entspricht Szenario I, allerdings bei hoher Bodenfeuchte. Bei Szenario I und II wurden für die Kartoffelflächen die Werte aus dem Parameterkatalog Sachsen verwendet.

Bei den folgenden Simulationen wurden bei normaler Feuchte 25 cm hohe Dämme angenommen. Zusätzlich wurde angenommen, dass die Dämme bereits dann überstaut werden bzw. brechen, wenn 70 % der Stauhöhe erreicht ist (Szenario III). Diese Annahme beruht auf folgenden Überlegungen:

- Die Breite der Dämme nimmt nach oben hin ab und
- die höheren Teile der Dämme sind lockerer und können leichter durchbrochen werden.

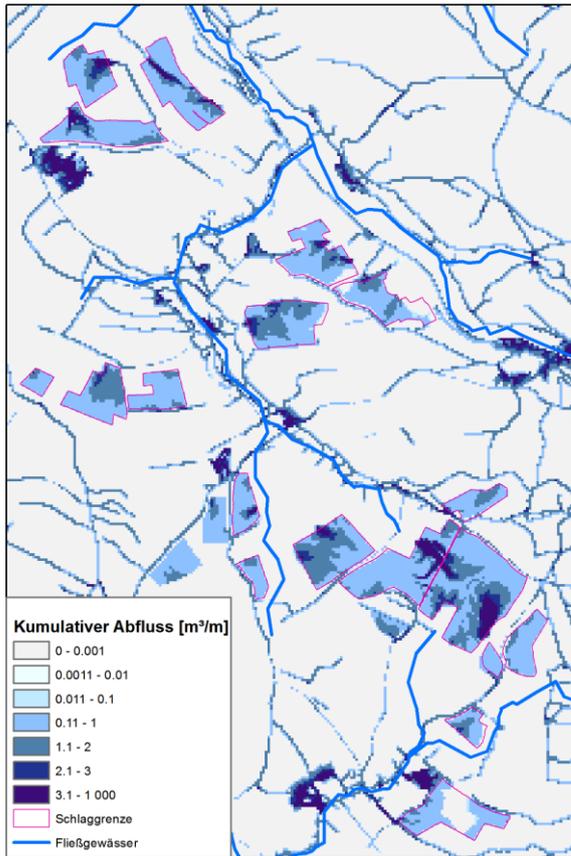
Analog wurden in Szenario IV die Bedingungen von Szenario III bei hoher Bodenfeuchte angenommen. Bei Szenario III und IV wurden für die Kartoffelflächen die experimentell ermittelten Werte verwendet.

8.2.1 Auswirkungen auf den Abfluss

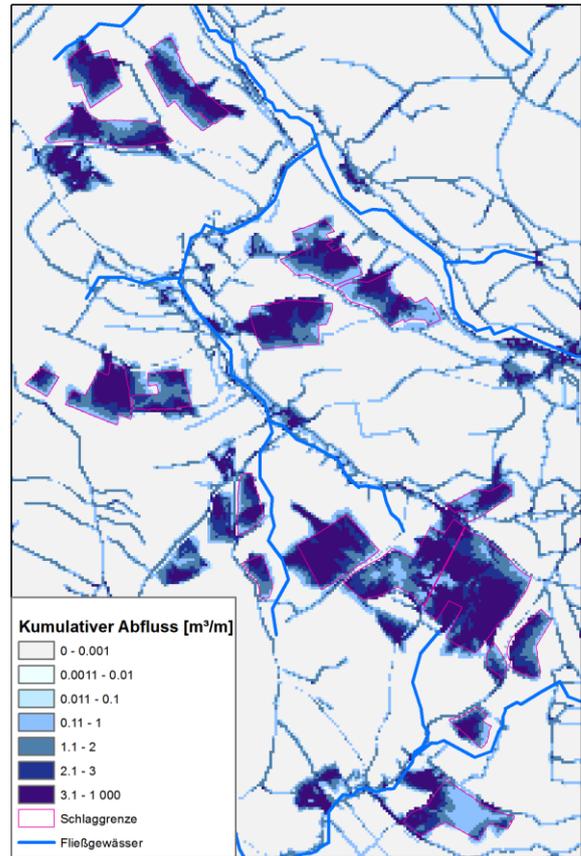
Die folgenden Abbildungen 49 bis 52 zeigen die Abflussmengen für die vier Szenarien.

Ohne Dämme / Parametrisierung PKS

Normale Bodenfeuchte



Hohe Bodenfeuchte



Mit Dämmen / Parametrisierung Messung

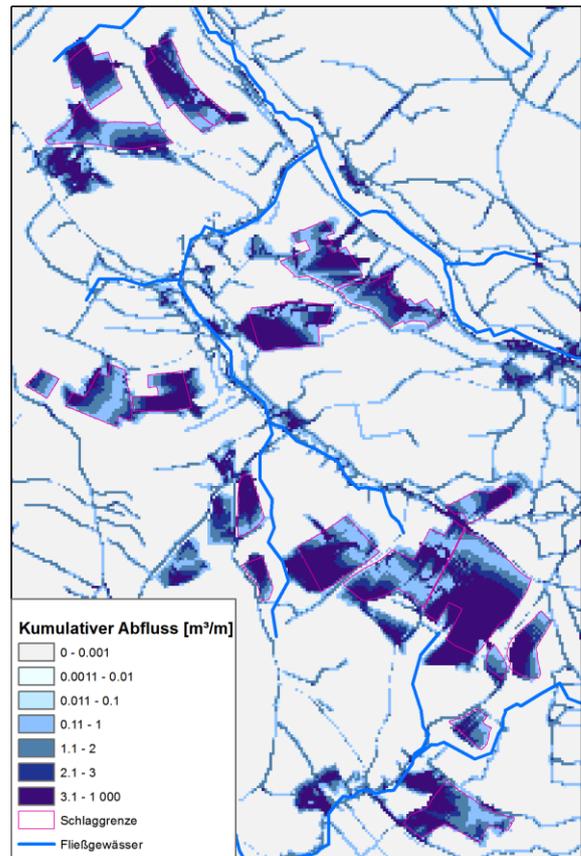
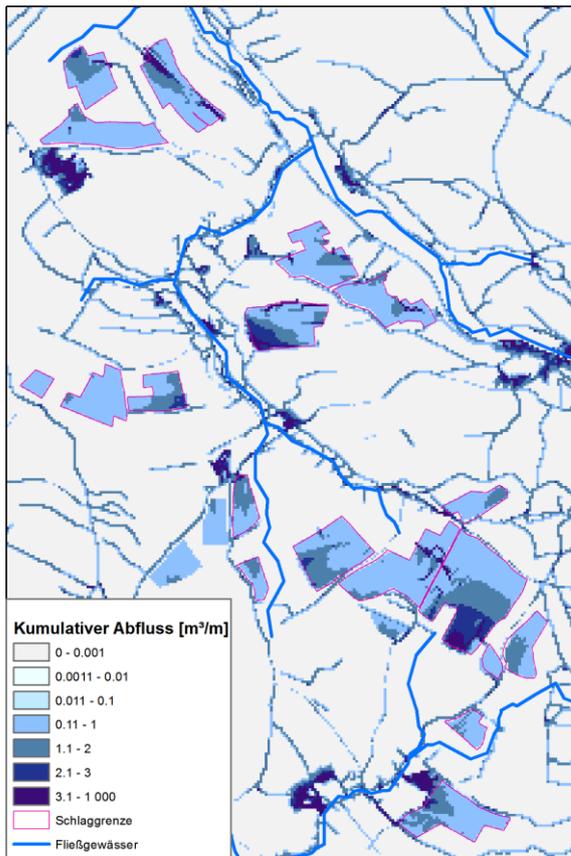


Abbildung 49: Prognosekarten des Oberflächenabflusses für das 10-jährliche Starkregenereignis

Die Simulationen wurden flächendeckend für einen Gebietsausschnitt durchgeführt, der alle 19 Ackerschläge umfasst. Weil das Verhalten der Flächen nahezu identisch ist, werden hier nur exemplarisch die Schläge 3, 7 und 15 dargestellt. Die Werte stellen jeweils die Summe des Infiltrationsüberschusses (Niederschlag minus Infiltration; engl. Infiltration excess runoff) aller Zellen eines Schlags dar.

Bei der Dammsituation wird die gleiche Abflussmenge über einen verringerten Querschnitt geleitet. Damit steigen zwar Abflusshöhe und -geschwindigkeit, das Abflussvolumen bleibt jedoch nahezu gleich. Gegenüber den Simulationen für den Monat Juni (Kapitel 6.3) bei den PKS-Varianten erkennt man geringere Abflüsse, die durch niedrigere Lagerungsdichten im Monat Mai zu erklären sind.

Bei allen Simulationen für den Monat Mai zeigte sich bei den Damm-Szenarien unter Verwendung der experimentell bestimmten Parameter ein Absinken des Abflusses. Dieses Verhalten ist sowohl in den Karten (Abbildung 49) als auch in den Diagrammen (Abbildung 50, Abbildung 51 und Abbildung 52) sichtbar. Der Grund hierfür ist die nochmals geringere Lagerungsdichte bei Verwendung der gemessenen Parameter. Die Variantenrechnungen bei hoher Bodenfeuchte ergeben aufgrund der verringerten Infiltration erwartungsgemäß erhöhte Abflusssummen.

Des Weiteren ist zu beachten, dass das verwendete Niederschlagsereignis relativ kurz ist. Bei längeren Niederschlagsereignissen würden bei den Dammvarianten aufgrund der bearbeitungsbedingten Zerstörung der Boden- und Aggregatstruktur ein Rückgang der Infiltration und ein Anstieg des Abflusses zu beobachten sein.

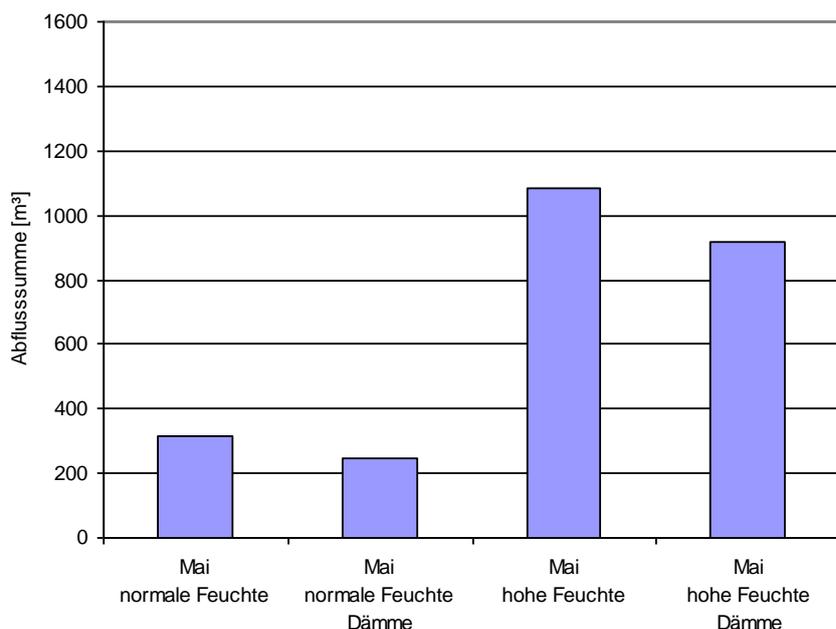


Abbildung 50: Abflusssumme auf Schlag 3 bei jeweils vier Szenarien

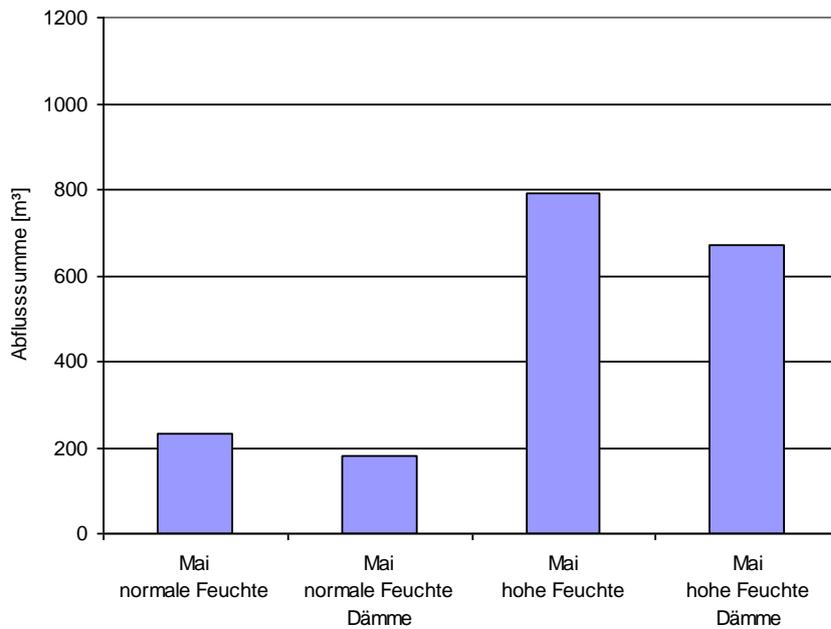


Abbildung 51: Abflusssumme auf Schlag 7 bei jeweils vier Szenarien

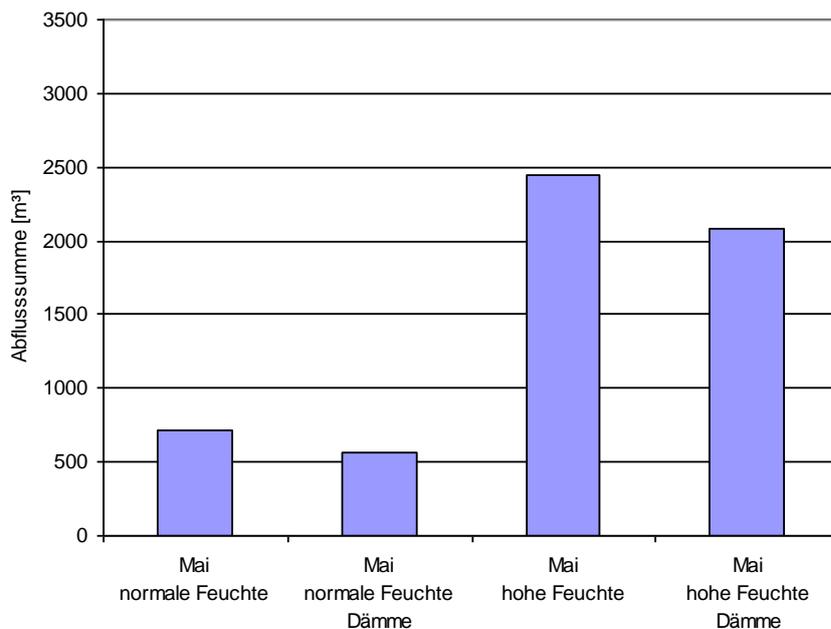


Abbildung 52: Abflusssumme auf Schlag 15 bei jeweils vier Szenarien

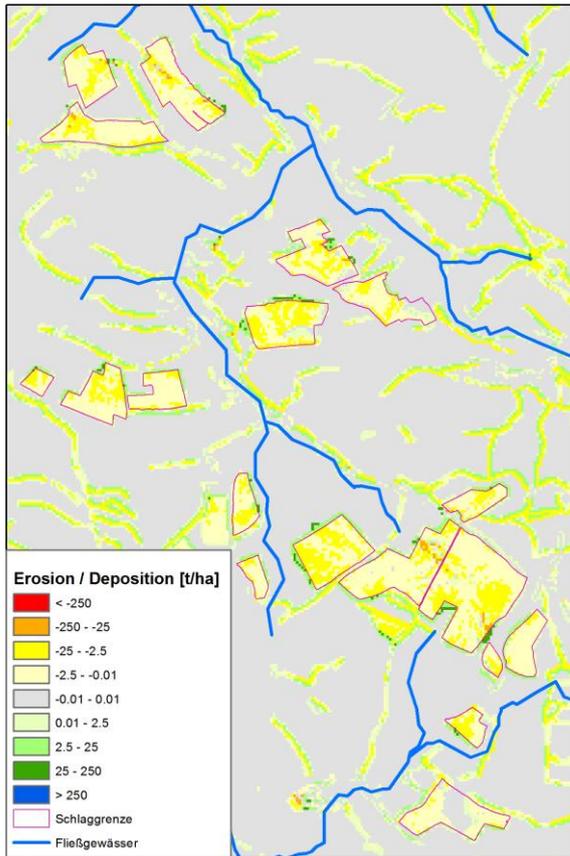
8.2.2 Auswirkungen auf Erosion und Deposition

Die folgenden Abbildungen 53 bis 55 zeigen die Ergebniskarten für die Szenarien für

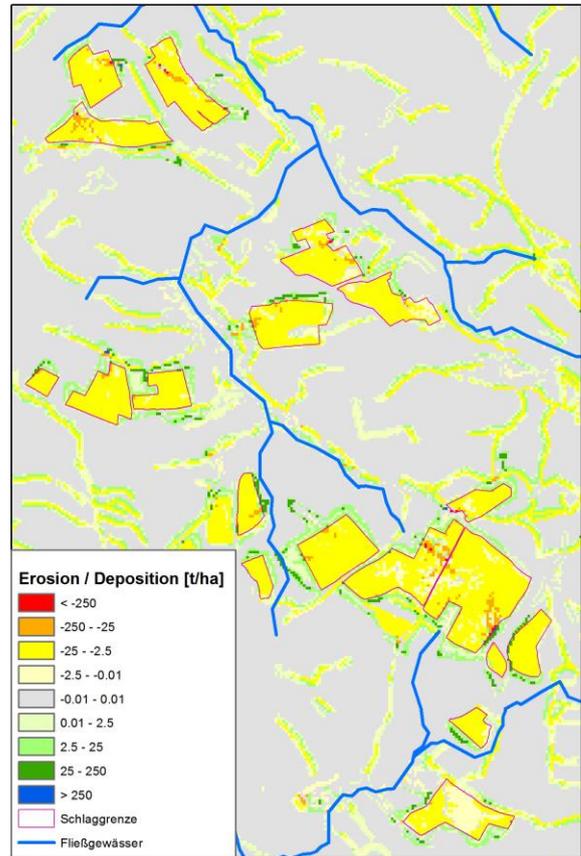
- den zellbezogenen Bodenabtrag bzw. Deposition (Abbildung 53),
- den schlagbezogenen gemittelten Bodenabtrag (Abbildung 54) und
- die durch die Zelle bewegte Sedimentmasse (Abbildung 55).

Ohne Dämme / Parametrisierung PKS

Normale Bodenfeuchte

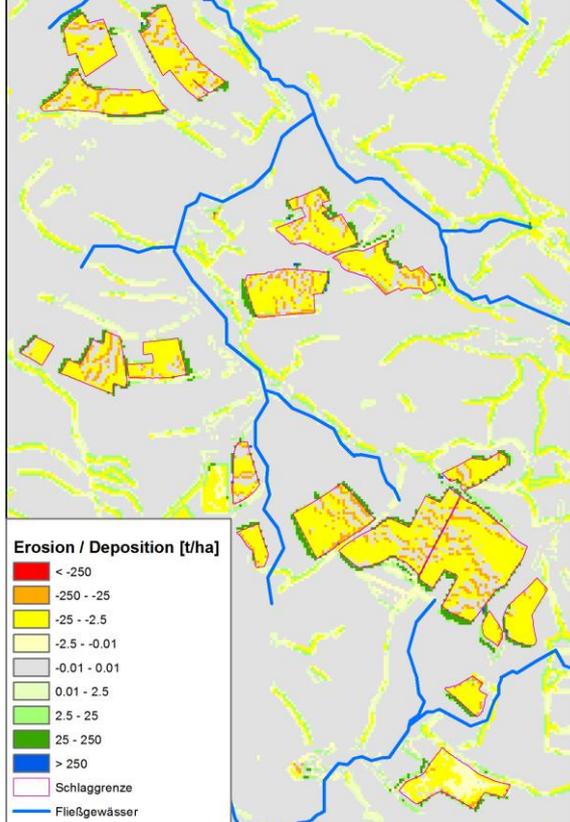


Hohe Bodenfeuchte



Mit Dämmen / Parametrisierung Messung

Normale Bodenfeuchte



Hohe Bodenfeuchte

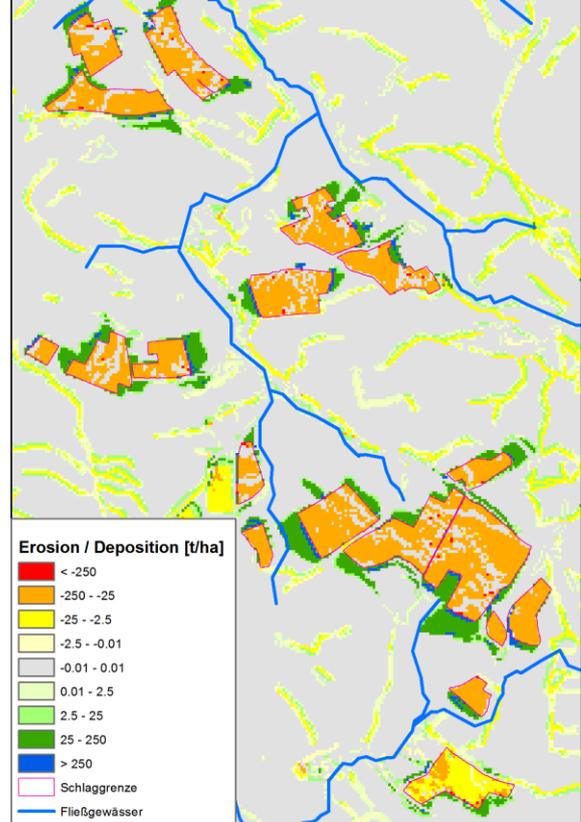
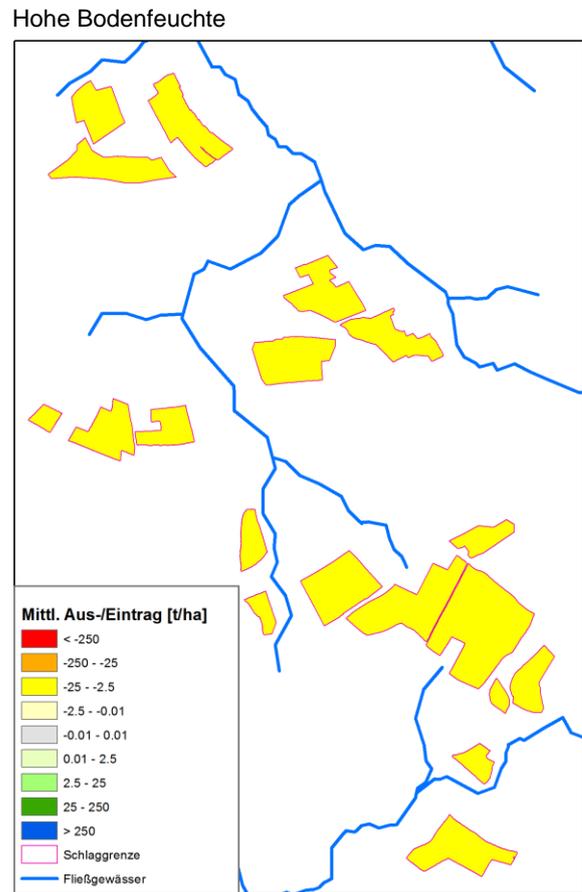
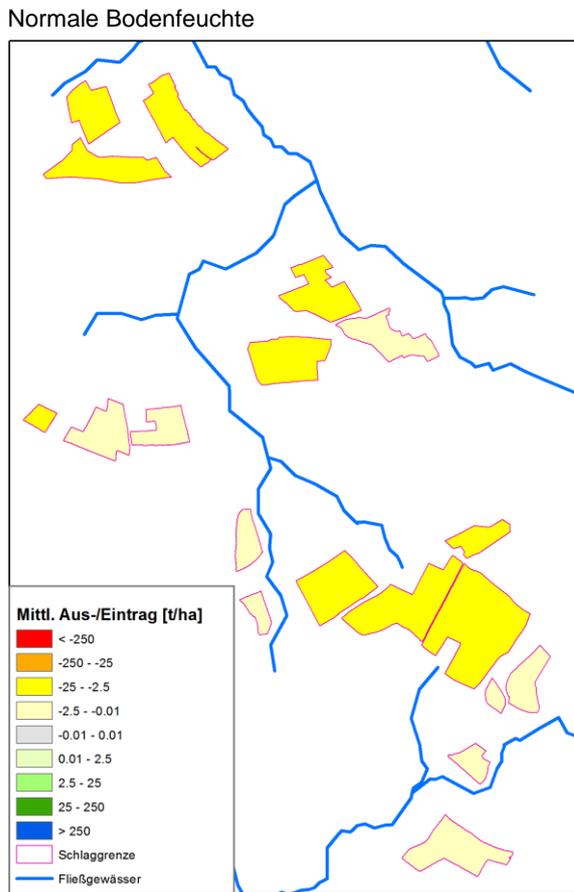


Abbildung 53: Prognosekarten der Bodenerosion für das 10-jährliche Starkregenereignis

Ohne Dämme / Parametrisierung PKS



Mit Dämmen / Parametrisierung Messung

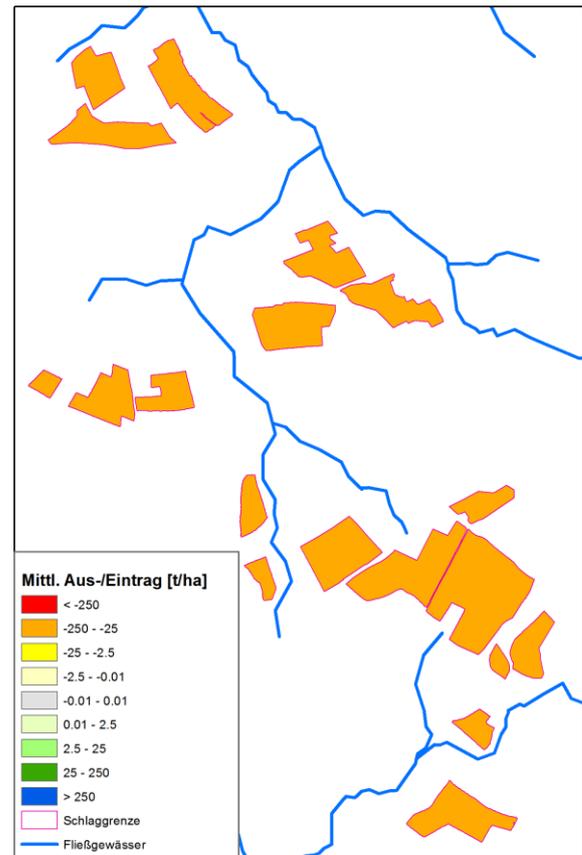
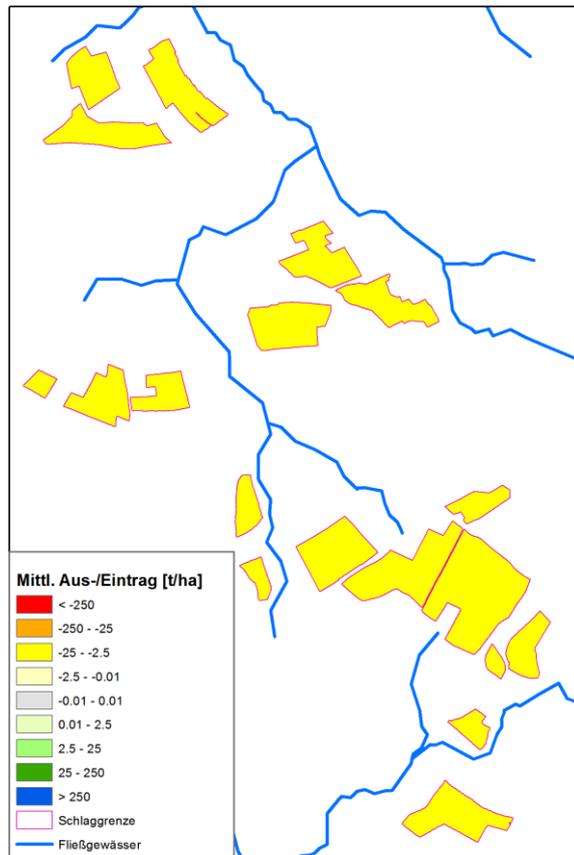
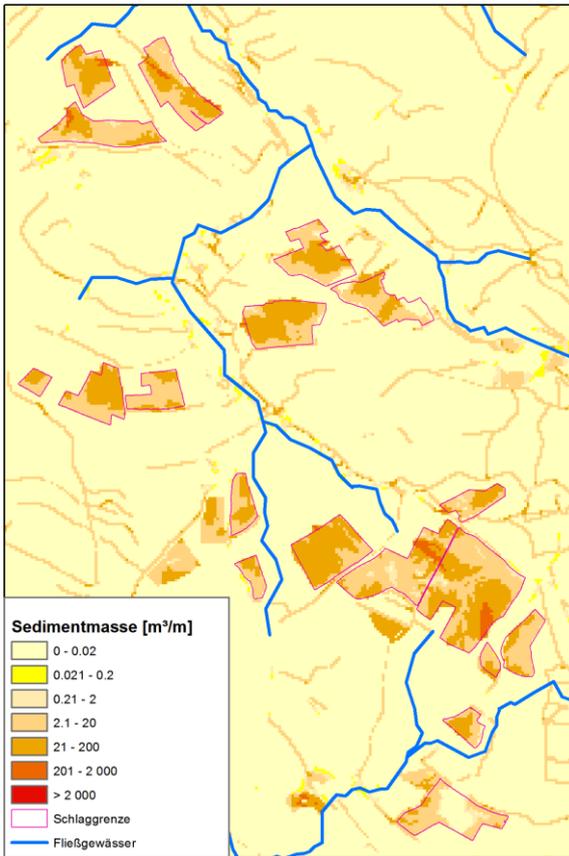


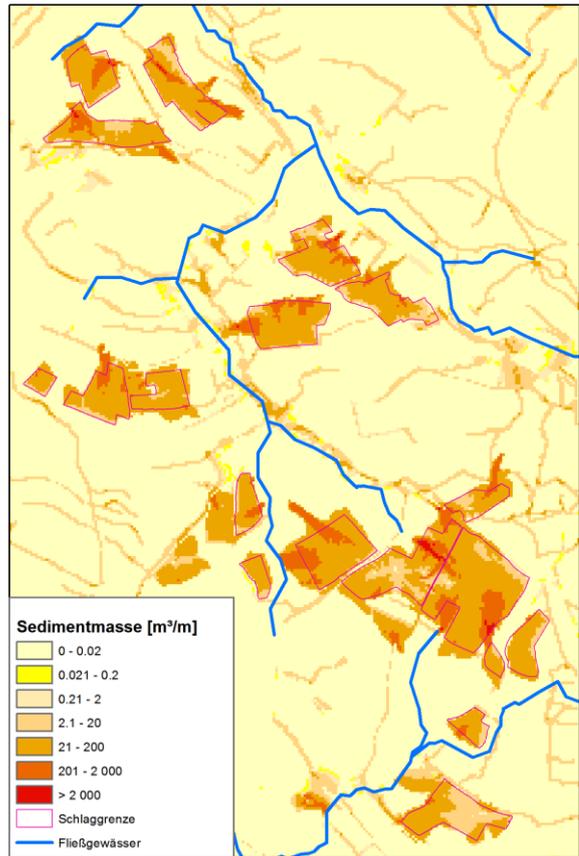
Abbildung 54: Prognosekarten des mittleren schlagbezogenen Bodenabtrags für das 10-jährliche Starkregenereignis

Ohne Dämme / Parametrisierung PKS

Normale Bodenfeuchte

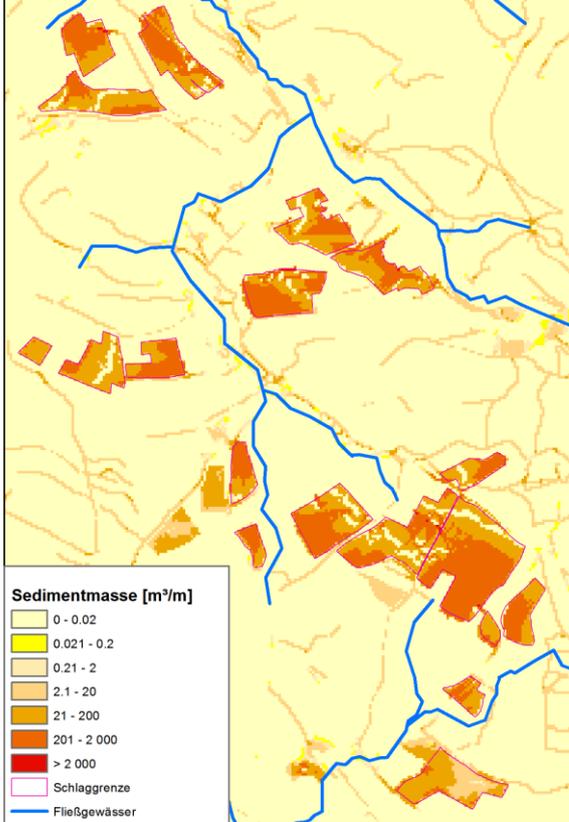


Hohe Bodenfeuchte



Mit Dämmen / Parametrisierung Messung

Normale Bodenfeuchte



Hohe Bodenfeuchte

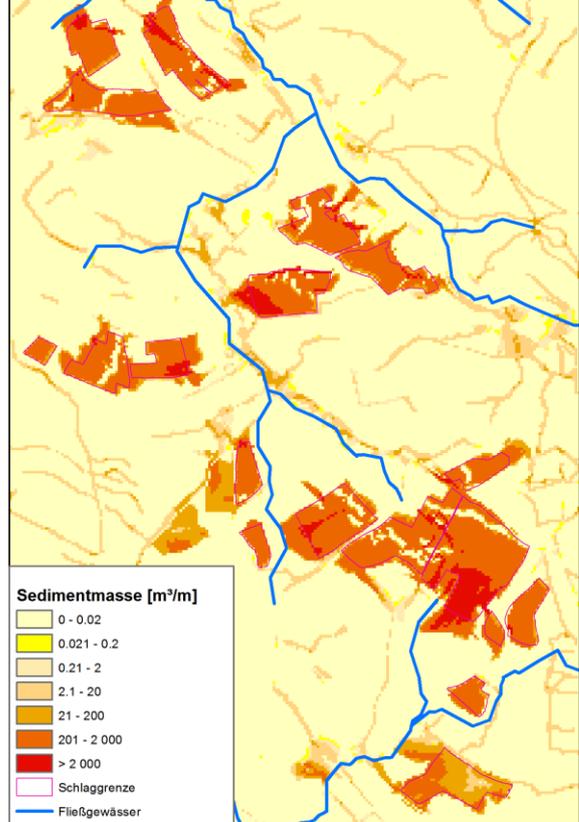


Abbildung 55: Prognosekarten der transportierten Sedimentmenge für das 10-jährliche Starkregenereignis

Auch beim Abtrag zeigen die Abbildungen bei allen untersuchten Schlagflächen untereinander ein nahezu identisches Verhalten.

Bei den Simulationsrechnungen mit Kartoffeldämmen ist ein Ansteigen des Bodenabtrags zu verzeichnen. Dieses Verhalten ist sowohl in den Karten (Abbildung 53) als auch in den Diagrammen (Abbildung 56, Abbildung 57, Abbildung 58) sichtbar. Der Grund hierfür ist nicht nur der geringere Erosionswiderstand, sondern dass beim Furchenanbau die gleiche Abflussmenge über einen verringerten Querschnitt geleitet wird. Dies führt zu einer Erhöhung von Abflusshöhe und -geschwindigkeit und somit zu einem starken Anstieg des Abtrages.

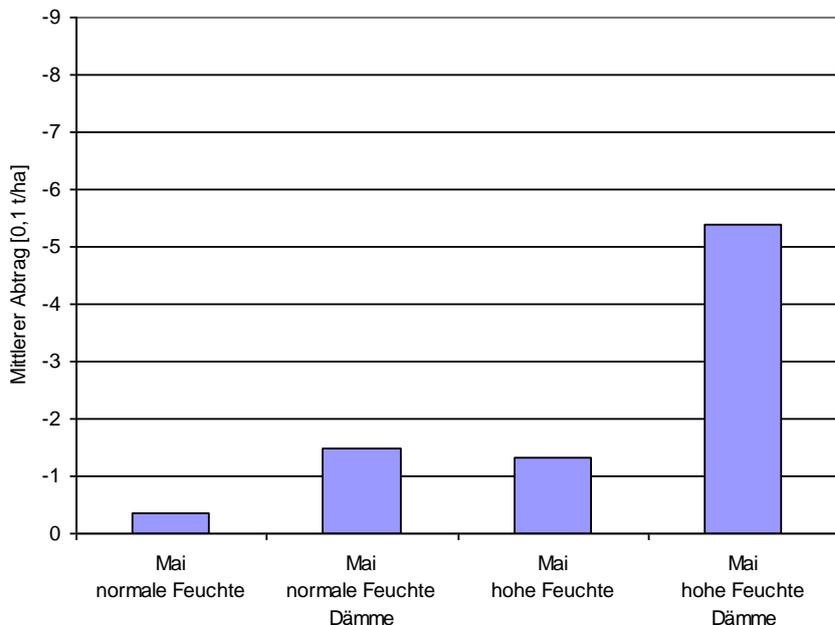


Abbildung 56: Mittlerer Abtrag auf Schlag 3 bei jeweils vier Szenarien

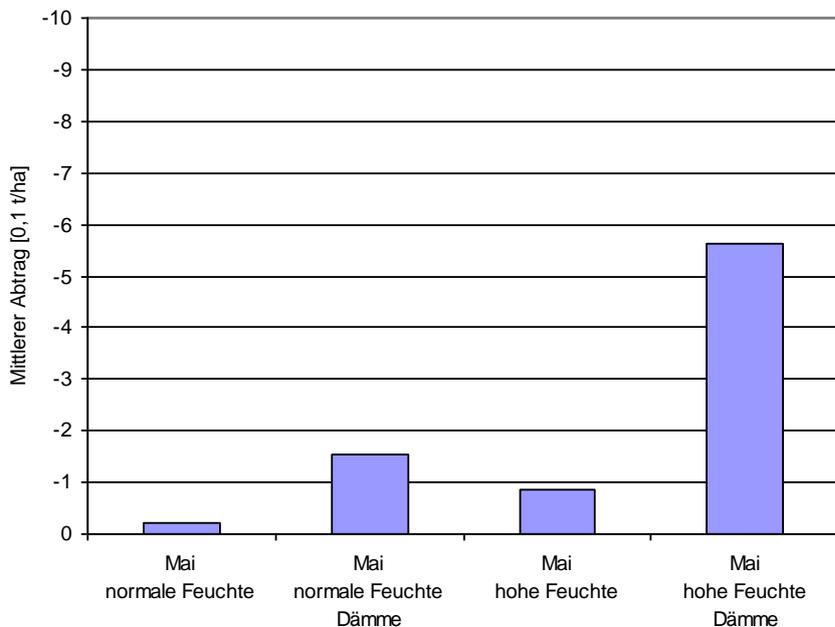


Abbildung 57: Mittlerer Abtrag auf Schlag 7 bei jeweils vier Szenarien

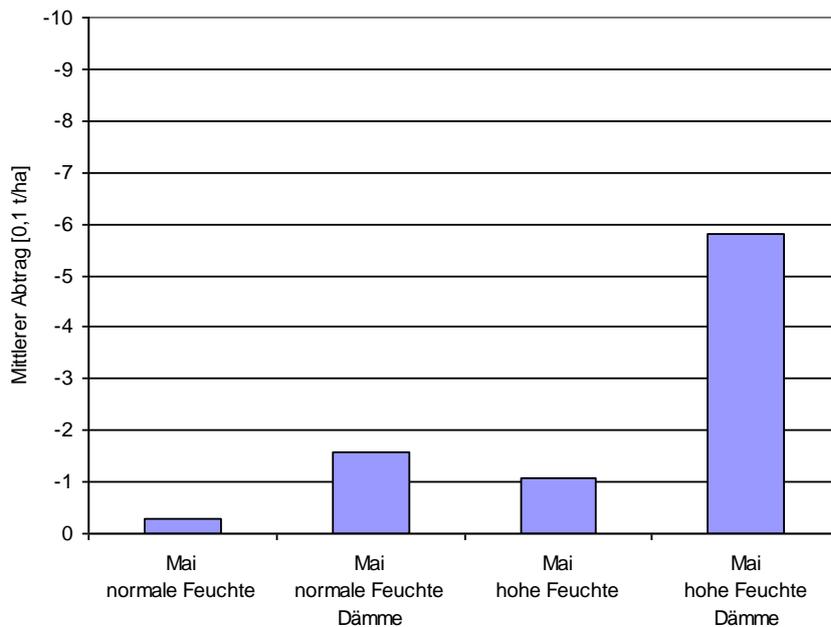


Abbildung 58: Mittlerer Abtrag auf Schlag 15 bei jeweils vier Szenarien

9 EROSION-3D-Anwendung zur Planung von Maßnahmen gegen Wassererosion auf Kartoffelflächen

Das für die Erosionssimulation für Kartoffelschläge entwickelte EROSION-3D-Modul wurde an mit Kartoffeln bestellten Ackerschlägen eines Landwirtschaftsbetriebes im Raum Glauchau zur Anwendung gebracht (s. Abbildung 59 bis 67). Zielsetzung war, mit Hilfe von EROSION-3D Konzepte für die künftige erosionsmindernde Bewirtschaftung der Kartoffelflächen zu entwickeln und festzulegen. Eine Veränderung der Anbautechnologie (Verzicht auf Absiebtechnik, Dammbegrünung mit Zwischenfrüchten nach konservierender Bodenbearbeitung) kam für den Betrieb aus arbeitstechnischen und ökonomischen Gründen nicht in Frage. Mit der EROSION-3D-Modellierung sollte deshalb herausgearbeitet werden, wie durch Anpassungen der Schlaggeometrien, insbesondere in Form der Begrünung von Teilbereichen der Kartoffelschläge z. B. mit Klee gras, das Ausmaß der Wassererosionsschäden sowohl auf als auch außerhalb der Kartoffelflächen gemindert werden kann. Die für den Kartoffelanbau ausgewählten (Teil)schläge des Betriebes sind in der Abbildung 59 (Schläge im westlichen Gebiet des Betriebes) und der Abbildung 60 (Schläge im östlichen Gebiet des Betriebes, jeweils Ist-Zustände der Kartoffelschläge vor der EROSION-3D-Modellierung) dargestellt.

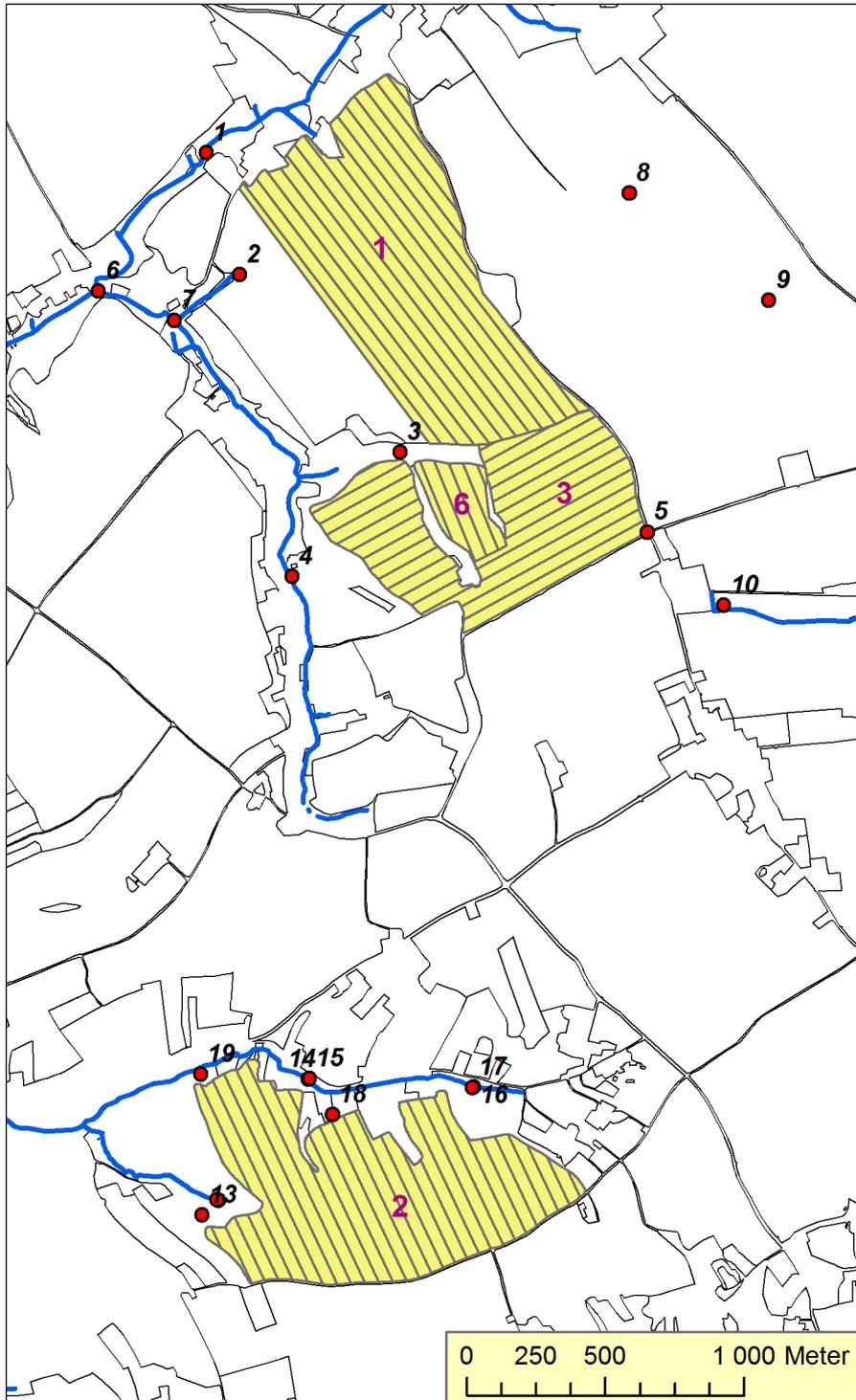


Abbildung 59: Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: Kartoffelschläge 1, 2, 3 und 6 (Ist-Zustand = Szenario 1) im westlichen Gebiet eines Beispielbetriebes; Bearbeitungsrichtung (Schraffur), Schlagnummern (violette Schrift) und Testpunkte für die Bodenabtragsabschätzung mit EROSION-3D (rote Punkte mit schwarzer Schrift)

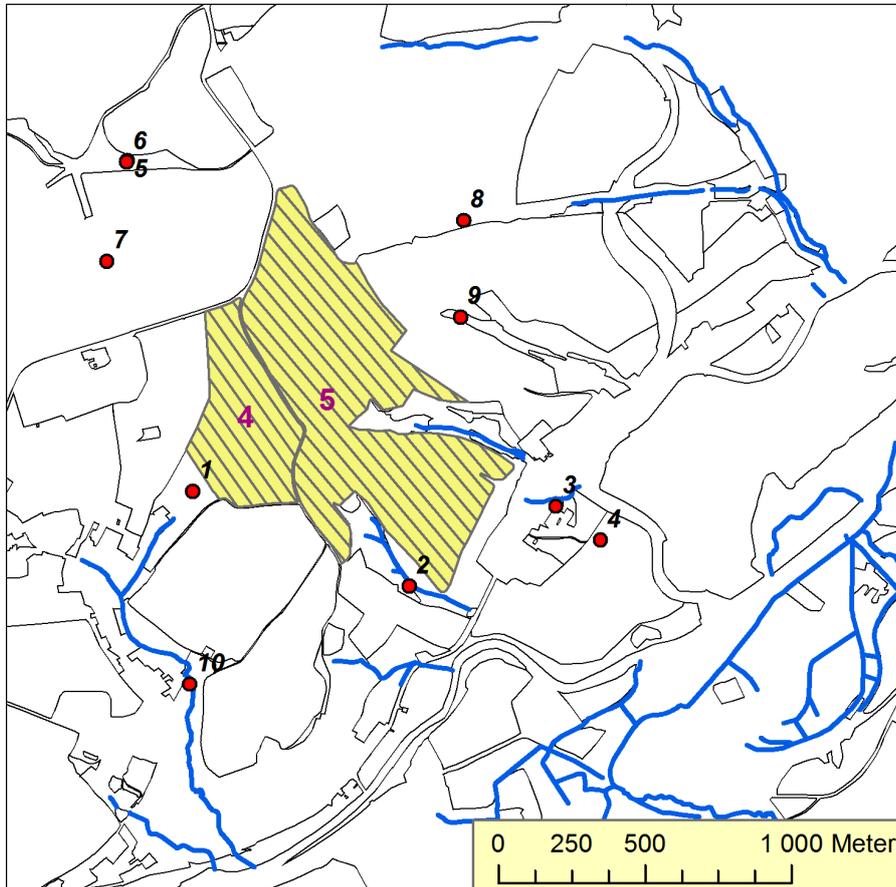


Abbildung 60: Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: Kartoffelschläge 4 und 5 (Ist-Zustand = Szenario 1) im östlichen Gebiet eines Beispielbetriebes; Bearbeitungsrichtung (Schraffur), Schlagnummern (violette Schrift) und Testpunkte für die Bodenabtragsabschätzung mit EROSION-3D (rote Punkte mit schwarzer Schrift)

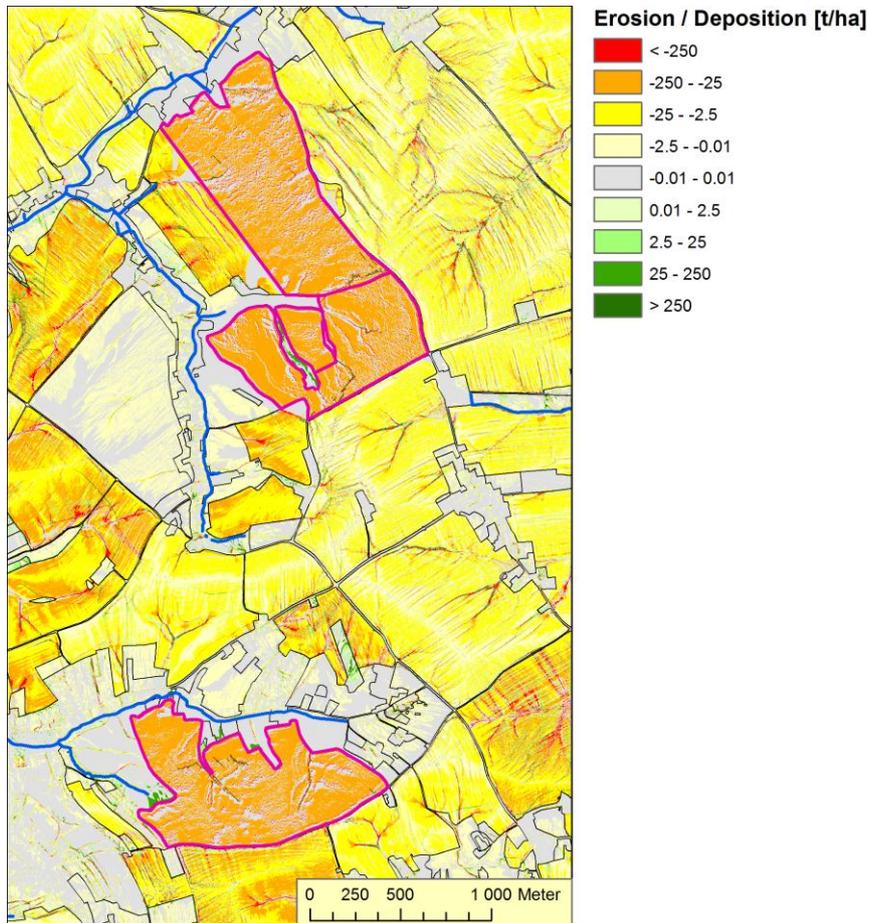


Abbildung 61: Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: EROSION-3D-Prognosekarte der Bodenerosion durch Wasser für ein Starkregenereignis mit 10-jähriger Wiederkehrzeit und dem Nutzungszustand/Ist-Zustand Mai 2012 (Szenario 1) für die Kartoffelschläge 1, 2, 3 und 6 (s. a. Abbildung 59) im westlichen Gebiet eines Beispielbetriebes

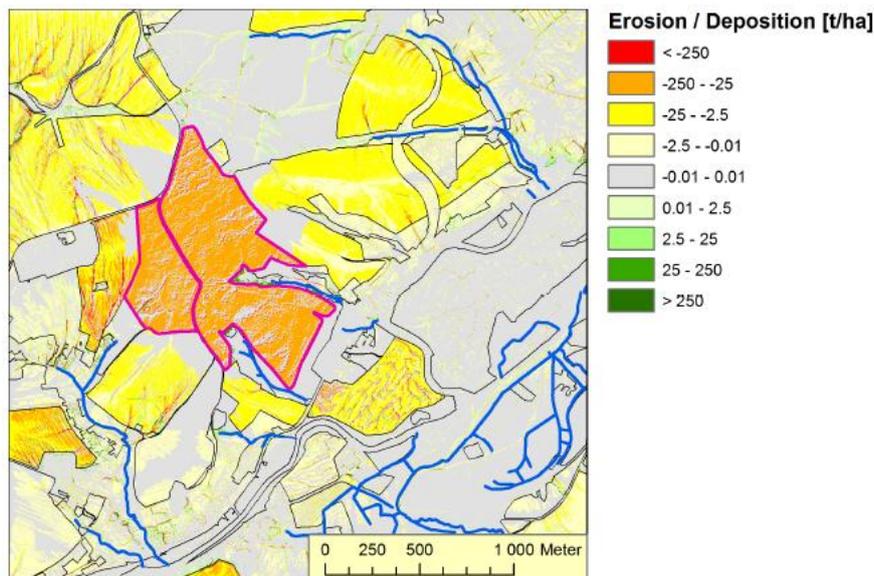


Abbildung 62: Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: EROSION-3D-Prognosekarte der Bodenerosion durch Wasser für ein Starkregenereignis mit 10-jähriger Wiederkehrzeit und dem Nutzungszustand/Ist-Zustand Mai 2012 (Szenario 1) für die Kartoffelschläge 4 und 5 (s. a. Abbildung 60) im östlichen Gebiet eines Beispielbetriebes

In Abbildung 61 und Abbildung 62 sind die mit EROSION-3D für ein 10-jährliches Starkregenereignis ermittelten Erosions- und Sedimentationswerte für die im Ist-Zustand (= Szenario 1) befindlichen westlich (Abbildung 61) und östlich (Abbildung 62) gelegenen Kartoffelflächen des Beispielsbetriebes dargestellt. Anhand dieser Modelldurchläufe mit EROSION-3D und auf Grundlage der dabei ermittelten Sedimentmassentransporte je m Ackerfläche (Ergebnisse nicht dargestellt) wurden die besonders kritischen Bereiche der Kartoffelschläge identifiziert. Diese Bereiche wurden durch eine Begrünung mit Klee gras aus dem Kartoffelanbau herausgenommen, wodurch dieser auf die weniger gefährdeten Teile der Ackerschläge beschränkt wurde. Die im westlichen und östlichen Gebiet des Betriebes gelegenen Kartoffelschläge wurden dabei zusätzlich unterteilt. Die Ergebnisse dieser planerischen Schlagumgestaltungen und -teilungen sind in Abbildung 63 und Abbildung 64 dargestellt.

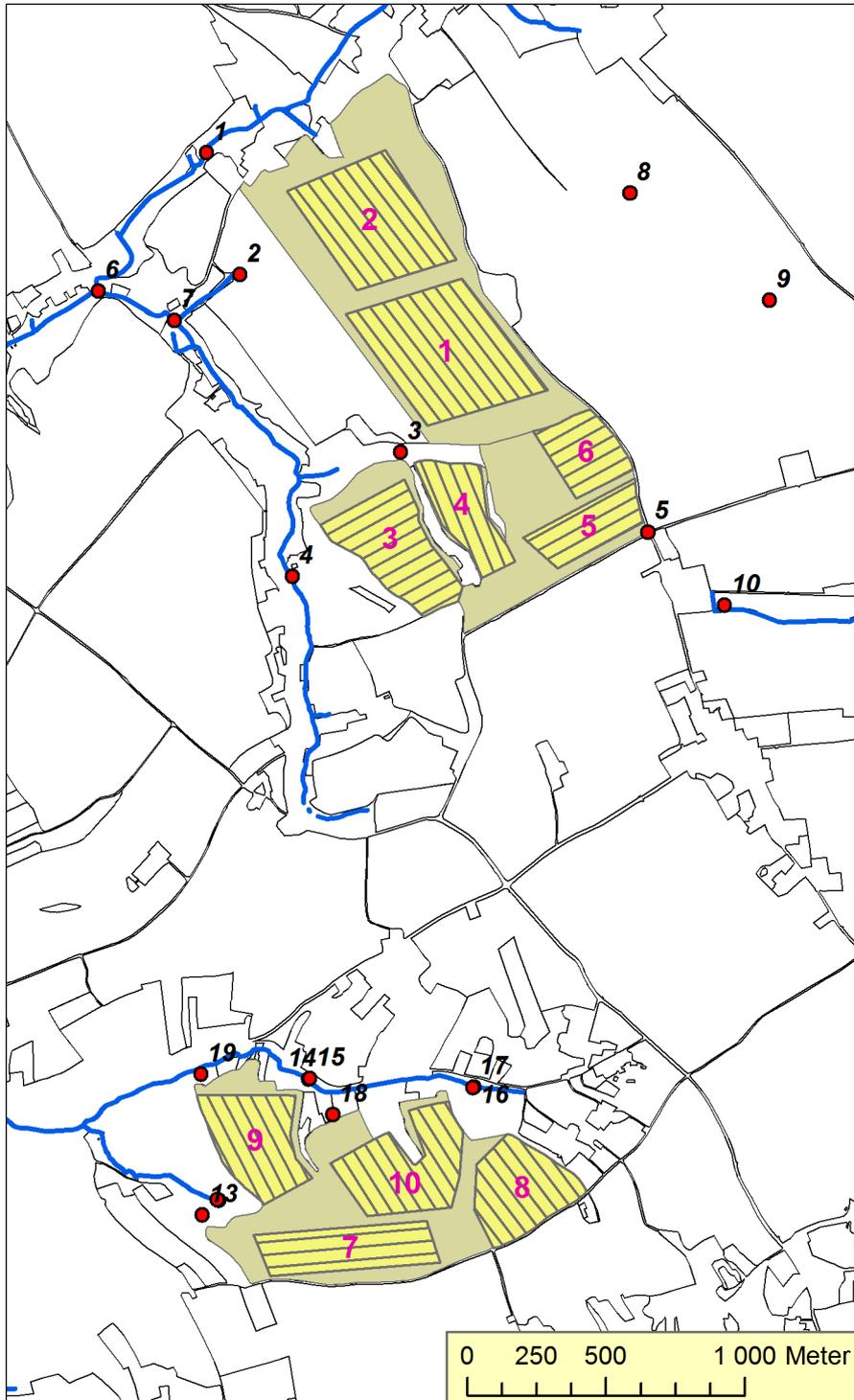


Abbildung 63: Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: Szenario 2 - Kartoffelschläge im westlichen Gebiet eines Beispielbetriebes nach Anlage von Klee-gras-teilflächen (graugrüne Flächen) in Kombination mit Schlagteilungen der ursprünglichen Kartoffelflächen 1 bis 4 und 6 (s. Abbildung 59) (mit Darstellung der Bearbeitungsrichtung [Schraffur], der Schlagnummern [violette Schrift] und der Testpunkte für die Bodenabtragsabschätzung mit EROSION-3D [rote Punkte mit schwarzer Schrift])

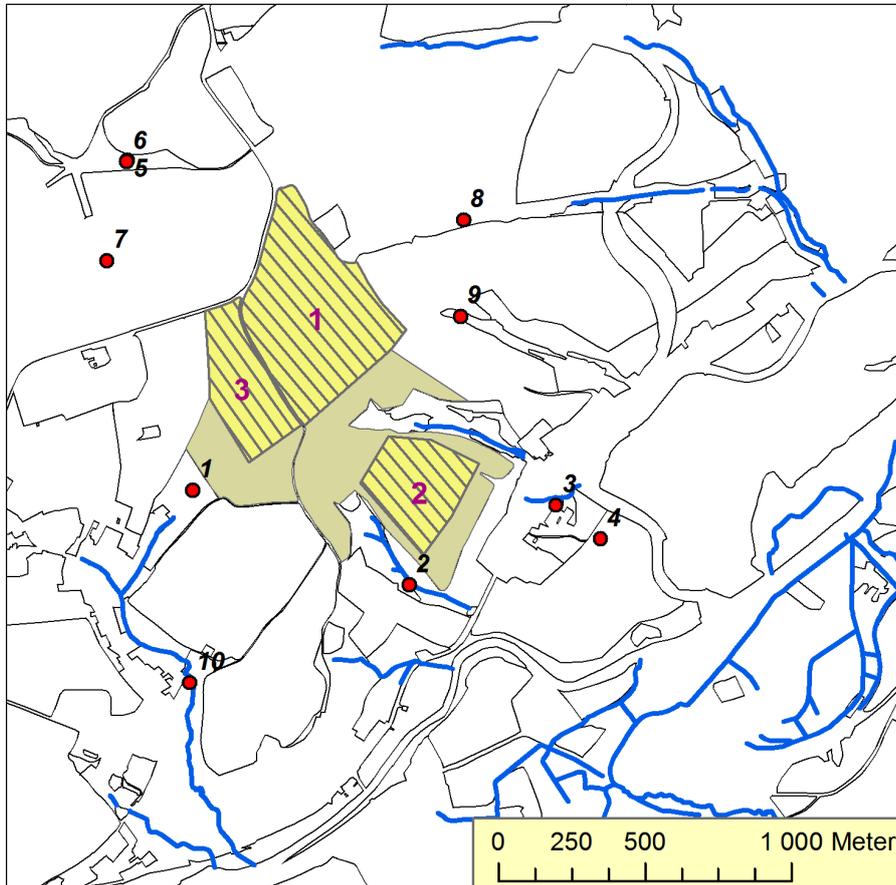


Abbildung 64: Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: Szenario 2 - Kartoffelschläge im östlichen Gebiet eines Beispielbetriebes nach Anlage von Kleegrasteilflächen (graugüne Flächen) in Kombination mit Schlagteilungen der ursprünglichen Kartoffelfläche 5 (Szenario 1, Abbildung 60) (mit Darstellung der Bearbeitungsrichtung [Schraffur], der Schlagnummern [violette Schrift] und der Testpunkte für die Bodenabtragsabschätzung mit EROSION-3D [rote Punkte mit schwarzer Schrift])

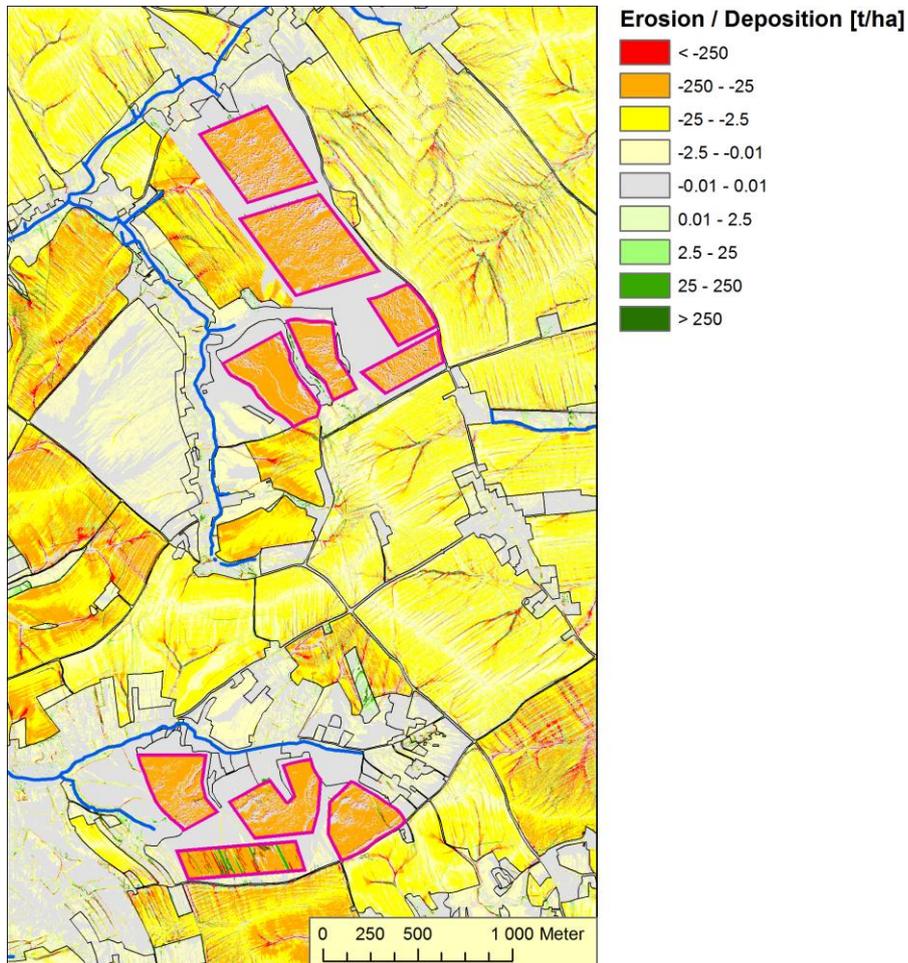


Abbildung 65: Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: EROSION-3D-Prognosekarte der Bodenerosion durch Wasser für ein Starkregenereignis mit 10-jähriger Wiederkehrzeit nach Anpassung der Schlaggeometrien (Anlage von Kleegrasteilflächen in Kombination mit Schlagteilungen der ursprünglichen Kartoffelflächen (= Szenario 2, s. Abbildung 64) im westlichen Gebiet eines Beispielbetriebes

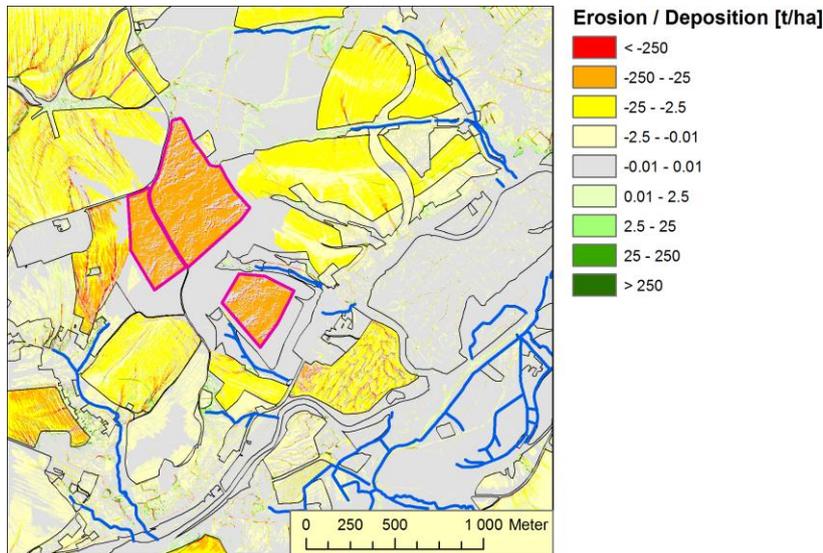


Abbildung 66: Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: EROSION-3D-Prognosekarte der Bodenerosion durch Wasser für ein Starkregenereignis mit 10-jähriger Wiederkehrzeit nach Anpassung der Schlaggeometrien (Anlage von Kleegrasteilflächen in Kombination mit Schlagteilungen der ursprünglichen Kartoffelflächen (= Szenario 2, s. Abbildung 64) im östlichen Gebiet eines Beispielbetriebes

Die Wirkungen dieser Teilschlagbegrünungen mit Klee gras und der Schlagteilungen (= Szenario 2) der westlich (Abbildung 63) und östlich (Abbildung 64) gelegenen Kartoffelflächen des Beispielbetriebes auf das Erosionsausmaß wurden mit EROSION-3D in einem zweiten Modelldurchlauf ermittelt (s. Abbildung 65 und Abbildung 66). Hierbei zeigten sich erhebliche Verringerungen der Erosions- und Sedimentmengen der angepasst bewirtschafteten Kartoffelflächen (s. Abbildung 67). Danach konnten auf fünf der sechs untersuchten Kartoffelflächen durch die Flächenneuzuschnitte deutliche Minderungen der Erosionsgefährdung erreicht werden (Abbildung 67). Auf der sechsten Fläche liegen die Bodenabträge im Vergleich zu den anderen Kartoffelflächen von vornherein auf einem niedrigen Niveau. Hier ist die Notwendigkeit ergänzender Schutzmaßnahmen (Unterbrechung der Kartoffelreihen durch Grünstreifen, Herausnahme einer weiteren Teilfläche) zu prüfen.

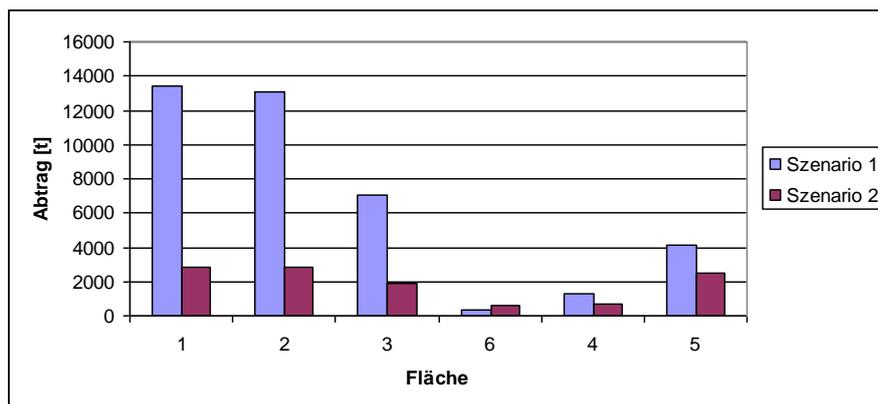


Abbildung 67: Konzeptentwicklung mit EROSION-3D für die Erosionsminderung auf Kartoffelflächen: Darstellung der mit EROSION-3D für die im westlichen und östlichen Gebiet des Beispielbetriebes gelegenen Kartoffelflächen 1 bis 6 ermittelten erosionsbedingten Bodenabträge (Bodenabtrag in t/ha) vor (Szenario 1 = Ist-Zustand, Abbildung 59 und Abbildung 60) und nach der Anpassung der Schlaggeometrie (Szenario 2 = Klee grassanbau auf Teilflächen und neue Schlageinteilung, Abbildung 63 und Abbildung 64)

10 Zusammenfassung

Zur Abschätzung der Wirkungen von Kartoffeldämmen auf Oberflächenabfluss und Erosion als Grundlage zur Entwicklung von Wassererosionsschutzkonzepten für Kartoffelflächen wurde das Modell EROSION-3D durch ein entsprechendes Softwaremodul erweitert. Um die Zahl der zusätzlich erforderlichen Modelleingangsgrößen möglichst klein zu halten und zur Vereinfachung der Berechnungsgrundlagen, wird ein V-förmiger Querschnitt der Dämme unterstellt. Aus der Richtung der Dämme ermittelt das Modell zunächst das Gefälle in den Furchen. Anschließend wird aus der Höhe und dem Abstand der Dämme die Abflusstiefe und -breite berechnet, woraus schließlich die mittlere Fließgeschwindigkeit des Oberflächenwassers zwischen den Dämmen abgeleitet wird. Die weitere Modellierung zur Ablösung und zum Transport von Bodenpartikeln folgt dann entsprechend der bereits in EROSION-3D implementierten Algorithmen. Dementsprechend gehen neben den Angaben zu Richtung, Höhe und Abstand der Dämme die sonst üblichen Bodenparameter in die Simulationsrechnung ein.

Das Modell EROSION-3D berücksichtigt folgende Veränderungen, die sich durch den bei Kartoffeln üblichen Dammanbau ergeben:

- Veränderung des Einzugsgebiets der Rasterzelle
- Konzentration des Abflusses in parallelen Rinnen
- Erhöhung von Abflusshöhe und -geschwindigkeit
- Erhöhung des Abtrages
- Gefahr des Überstaus von Dämmen
- Verflachung der Hangneigung

Hinsichtlich des neu entwickelten Kartoffelmoduls für EROSION-3D gibt es folgende Einschränkungen:

- Die Dammgeometrien werden nicht exakt wiedergegeben, um die Anzahl der Modellparameter gering zu halten.
- Beim Formen der Dämme werden grobe Partikel bei der heute üblichen Bodenseparierung/-absiebung ausgesiebt und in der Fahrspur gesammelt. Beide Bereiche besitzen somit eine unterschiedliche Korngrößenzusammensetzung und Lagerungsdichte. Hieraus ergibt sich in der Realität eine starke Inhomogenität zwischen Damm und Furche hinsichtlich Infiltrations- und Erosionsverhalten, was sich nur mit großem Parametrisierungsaufwand im Modell darstellen ließe.

Zum Testen des neu entwickelten Moduls wurden mit den Werten des Parameterkataloges Sachsen (d. h. alte Kartoffelanbaumethode ohne Bodenseparierung) Vergleichsrechnungen durchgeführt. Jeweils für die Monate Juni und September wurden Varianten für normale und hohe Bodenfeuchte sowie ohne und mit Berücksichtigung der Dammgeometrie berechnet. Dabei wurde bei den Dammvarianten neben Abfluss und Abtrag auch das Durchbrechen der Dämme untersucht.

Hierbei schnitten die beiden Bearbeitungsvarianten in Bezug auf den Abfluss identisch ab. Bei den Dammvarianten ergab sich jedoch ein erheblich höherer Abtrag, weil die Veränderung der Geometrie der Bodenoberfläche infolge der Dammformung eine Erhöhung des Abflussfilms und eine Steigerung der Abflussgeschwindigkeit in den Furchen zwischen den Dämmen bewirkt.

Die heute im Rahmen der Kartoffeldammformung durchgeführte Bodenseparierung und das damit verbundene Bodenabsieben bewirkt eine starke Lockerung des Bodens. Daraus ergibt sich aufgrund der geringen Lagerungsdichte zunächst eine höhere Infiltration und ein etwas geringerer Abfluss gegenüber dem früheren Bearbeitungsverfahren. Nach einiger Zeit – insbesondere bei hoher Bodenfeuchte – setzt jedoch eine Verschlammung der Bodenoberfläche ein, die den Abfluss und den Bodenabtrag bei der Bodenseparierung deutlich erhöhen.

Für die Modellierung der Wassererosionsprozesse derartig bearbeiteter Kartoffelflächen mit EROSION-3D war die Ermittlung entsprechender Modellierungsparameter erforderlich. Dazu wurden im Mai 2010 auf einer Kartoffelfläche in Sachsen drei Beregnungsversuche mit einer Kleinberegnungsanlage durchgeführt. Die Versuche fanden rund zwei Wochen nach dem Kartoffellegen in separierte Kartoffeldämme statt. Die Versuche ergaben neue Parameterwerte hinsichtlich des Skinfaktors und des Erosionswiderstandes einer Kartoffelfläche nach Dammformung mit Bodenseparierung.

In weiteren Szenarienmodellierungen mit EROSION-3D wurde für eine Ackerfläche für den Bodenzustand im Monat Mai ein Vergleich mit der Parametrisierung nach Parameterkatalog ohne Kartoffeldämme und auf Grundlage der in den Beregnungsversuchen neu erarbeiteten Parametern mit Kartoffeldämmen nach Bodenseparierung durchgeführt. Der geringere Erosionswiderstand abgesiebter Kartoffeldämme führte in Kombination mit der Veränderung der Geometrie in den EROSION-3D-Simulationsrechnungen zu einer Steigerung der Abtragswerte gegenüber dem früheren Kartoffelanbauverfahren ohne Absieben der Dämme.

Im Rahmen des Projektes wurden abschließend mit dem um das Kartoffelmodul erweiterten Modell EROSION-3D für von Wassererosion betroffene Kartoffelschläge eines Landwirtschaftsbetriebes in Sachsen Erosionssimulationen zur Erarbeitung von Erosionsschutzkonzepten durchgeführt. Dabei wurden vorrangig die Schlaggeometrien der Kartoffelflächen u. a. durch die teilweise Kleegrasbegrünung von Teilflächen, durch die Änderung der Bearbeitungsrichtung usw. erosionsmindernd angepasst bzw. optimiert. Damit verbunden war eine erhebliche Minderung der Wassererosion auf den Kartoffelflächen.

Die praktische Anwendung zeigt, dass mit dem im Projekt um das Kartoffelmodul erweiterten EROSION-3D-Modell für Landwirtschaftsbetriebe Erosionsschutzkonzepte für Kartoffelflächen erarbeitet werden können. Im Rahmen der Facharbeit des LfULG soll dies für die kartoffelerzeugenden Betriebe Sachsens im Sinne eines vorsorgenden Wassererosionsschutzes auf Kartoffelflächen in den nächsten Jahren erfolgen.

11 Literatur

- Ad-Hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. verbesserte und erweiterte Auflage, Hannover, 483 pp.
- ASTALOSCH, R. (1990): Beregnungsversuche zur Parameterbestimmung zeitlich differenzierter Erosionsmodelle. Vertiefungsarbeit Thesis, TU Karlsruhe, Karlsruhe.
- AUERSWALD, K.; KAINZ, M.; SCHRÖDER, D. & MARTIN, W. (1992): Comparison of German and Swiss rainfall simulators - Experimental setup. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 155: 1-5.
- BORNKAMPF, S. (2006): Abschätzung der Bodenerosion durch Wasser auf Kartoffelflächen mit EROSION 3D als Grundlage für die Erarbeitung umfassender Erosionsschutzkonzepte. Diplomarbeit TU Freiberg.
- BRANDT, C. J. (1989): Simulation of kinetic energy of rainfall under vegetation, Brit. Geom. Res. Group Symp. on Vegetation and Geomorphology, Bristol, UK.
- DIEM, M. (1971): Typen der Regentropfenspektren II: Abhängigkeit von der Regenintensität. Meteorologische Rundschau 24. Jhg. Heft 1.
- DWD-KOSTRA 2000 (2000): Digitale Koordinierte Starkregen-Auswertung des Deutschen Wetterdienstes, Ausgabe 2000ff. (Software-Paket). Institut für wissenschaftlich-technische Hydrologie, Hannover.
- FOSTER, G. R.; NEIBLING W. H. & NATTERMAN, R. A. (1982): A programmable rainfall simulator. ASAE Paper, 82-2570.
- GERLINGER, K. (1997): Erosionsprozesse auf Lössböden, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Grimme Landmaschinenteknik (2007): Formen, separieren, legen im Beet-Anbauverfahren
- HASSEL, J. M. & RICHTER, G. (1992): Ein Vergleich deutscher und schweizerischer Regensimulatoren nach Regenstruktur und kinetischer Energie. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 155(3): 185-190.
- KAINZ, M.; AUERSWALD, K. & VÖHRINGER, R. (1992): Comparison of German and Swiss Rainfall Simulators - Utility, Labour Demands and Costs. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 155(1): 7-11.
- MICHAEL, A.; SCHMIDT, J. & SCHMIDT, W. (1996): EROSION 2D ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser - Band II Parameterkatalog, Freiberg.
- SCHRAMM, M. (1994): Ein Erosionsmodell mit räumlich und zeitlich veränderlicher Rillenmorphologie. Dissertation Thesis, Universität Fridericiana zu Karlsruhe Karlsruhe, 196 pp.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, H. D. (1978): Predicting Rainfall Erosion Losses, Agriculture Handbook United States Dept. of Agriculture, Washington, D.C.
- ZIMMERMANN, T. (1989): Effekte der kinetischen Energie natürlicher Starkregen - Konsequenzen für die technische Gestaltung von Regensimulatoren zur kleinflächigen Infiltrationsmessung, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft. Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

12Anhang

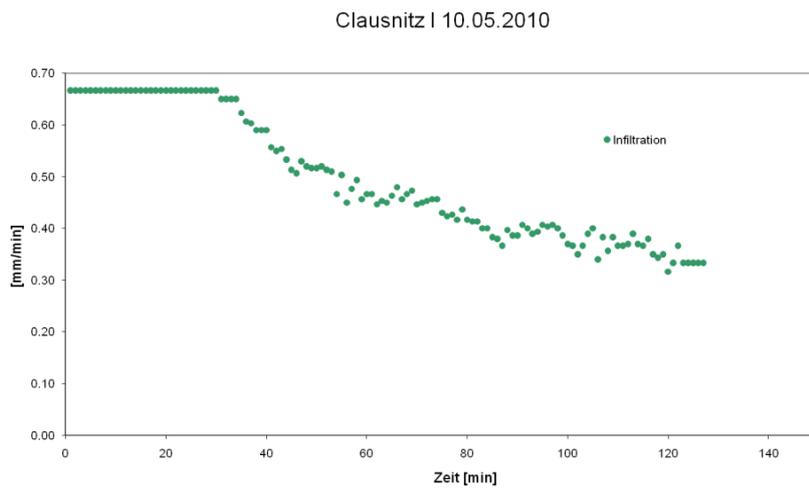


Abbildung 68: Infiltrationsverlauf Beregnungsversuch Clausnitz I

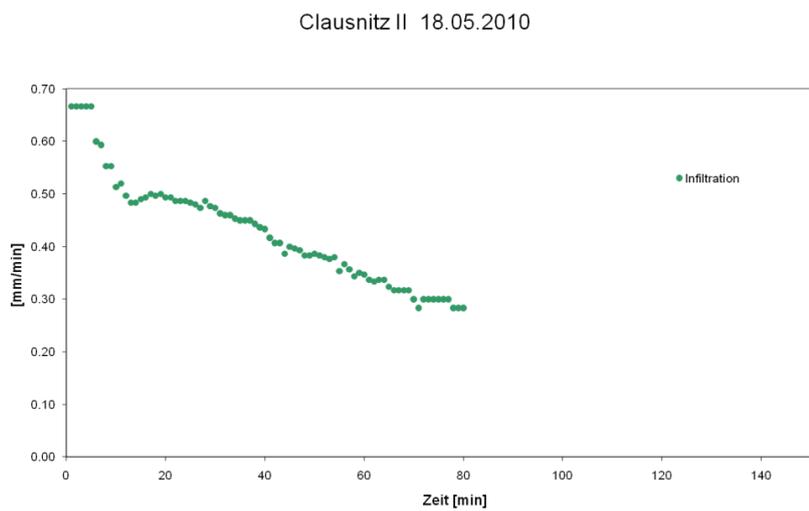


Abbildung 69: Infiltrationsverlauf Beregnungsversuch Clausnitz II

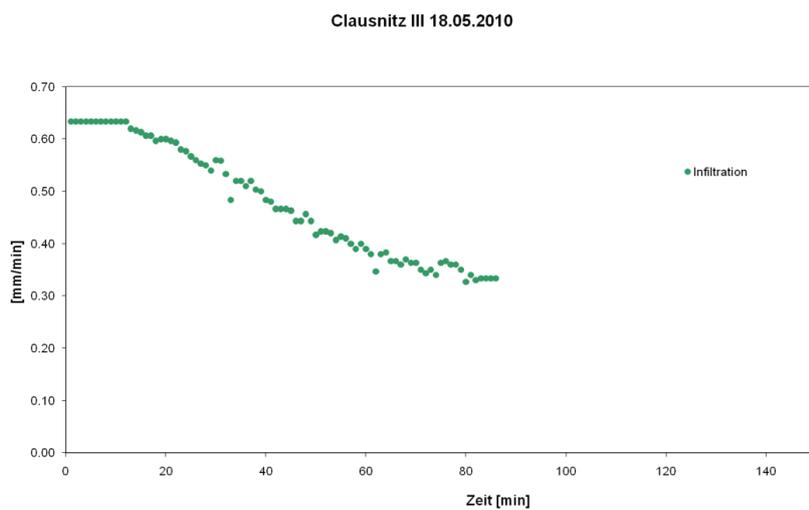


Abbildung 70: Infiltrationsverlauf Beregnungsversuch Clausnitz III

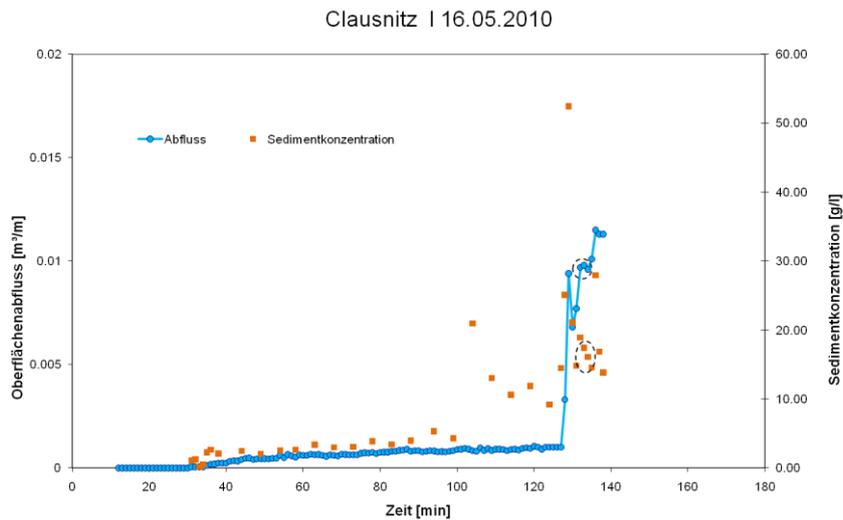


Abbildung 71: Oberflächenabfluss und Sedimentkonzentration Beregnungsversuch Clausnitz I (Kreise markieren verwendete Daten)

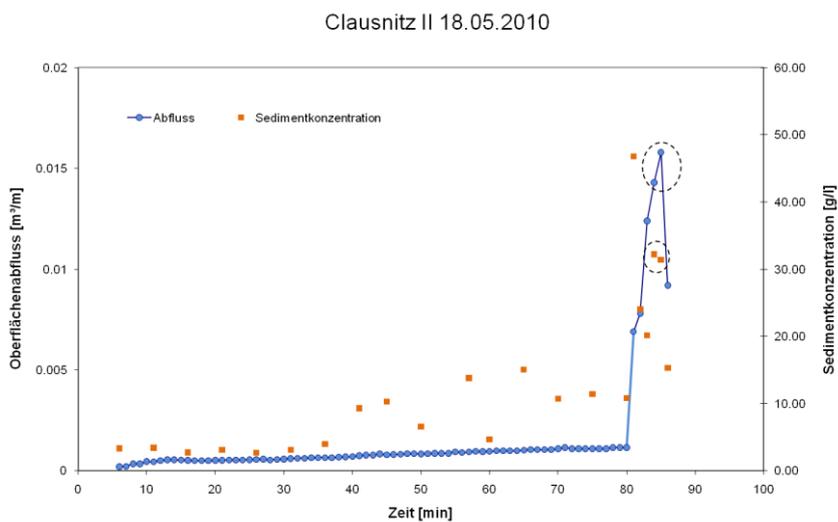


Abbildung 72: Oberflächenabfluss und Sedimentkonzentration Beregnungsversuch Clausnitz II (Kreise markieren verwendete Daten)

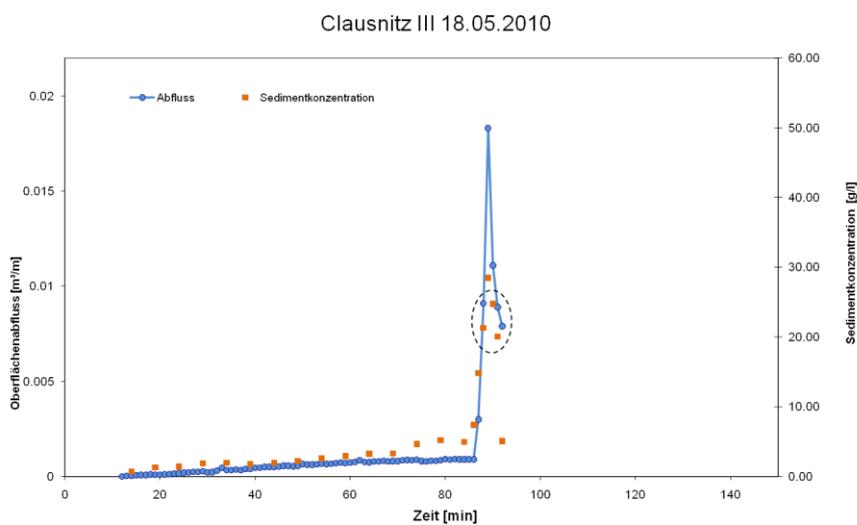


Abbildung 73: Oberflächenabfluss und Sedimentkonzentration Beregnungsversuch Clausnitz III (Kreise markieren verwendete Daten)

1. Lage	x-Koordinate (Gauss Krüger):	4604089	Probenbez.:	Cl_I
	y-Koordinate (Gauss-Krüger):	5625759	Ort:	Clausnitz

2. Standort	Bodenart:	Uls		
	Nutzung:	Kartoffeln, gelegt		
	Bearbeitung:	konventionell		
	Feldzustand:	frisch		
	Versuchsfläche:	Länge [m]:	3	
		sim. Länge [m]:	30	
		Breite [m]:	1	
		Neigung [-]:	10	

3. Bodendaten	Körnung [%]:	fein	mittel	grob	Summe:
	Ton:	0	9	0	9
	Schluff:	9	14	12	35
	Sand:	16	20	20	56
	Kontrollsumme:				100
	Endinfiltrationsrate [mm/min]:				0.33
	Lagerungsdichte in 20-25 cm Tiefe [kg/m ³]:				1220
	Corg im Oberboden [%]:				3.78
	Anfangswassergehalt [Vol.-%]:				30
	Erosionswiderstand [N/m ²]:				0.00102
	Bedeckungsgrad [%]:				18
	Rauigkeit [s/m ^{1/3}] (Tracerversuch):				0.0100
	Skinfaktor:				0.087
	Gesamtabfluss bis Überstau (Q1ges) [m ³ /m]:				0.64
	Abflussmenge 1 min Überstau (Q2) [m ³ /m]:				0.01
	Sedimentkonzentration [g/l] ohne Überstau:				7.63
	Sedimentkonzentration [g/l] mit Überstau:				17.46

4. Niederschlag:	Dauer:	127
	Intensität:	0.67

1. Lage			
x-Koordinate (Gauss Krüger):	4604063	Probenbez.:	Cl_I
y-Koordinate (Gauss-Krüger):	5625737	Ort:	Clausnitz

2. Standort		Bodenart:	Us
	Nutzung:	Kartoffeln, gelegt	
	Bearbeitung:	konventionell	
	Feldzustand:	frisch	
	Versuchsfläche:	Länge [m]:	3
		sim. Länge [m]:	39
		Breite [m]:	1
		Neigung [-]:	8

3. Bodendaten		Körnung [%]:	fein	mittel	grob	Summe:
	Ton:		0	6	0	6
	Schluff:		8	14	12	34
	Sand:		16	21	23	60
	Kontrollsumme:					100
	Endinfiltrationsrate [mm/min]:					0.28
	Lagerungsdichte in 20-25 cm Tiefe [kg/m ³]:					1220
	Corg im Oberboden [%]:					3.24
	Anfangswassergehalt [Vol.-%]:					32
	Erosionswiderstand [N/m ²]:					0.00053
	Bedeckungsgrad [%]:					14
	Rauigkeit [s/m ^{1/3}] (Tracerversuch):					0.0130
	Skinfaktor:					0.072
	Gesamtabfluss bis Überstau (Q _{1ges}) [m ³ /m]:					0.75
	Abflussmenge 1 min Überstau (Q ₂) [m ³ /m]:					0.015
	Sedimentkonzentration [g/l] ohne Überstau:					7.19
	Sedimentkonzentration [g/l] mit Überstau:					31.79

4. Niederschlag:		Dauer:	80
		Intensität:	0.67

1. Lage

x-Koordinate (Gauss Krüger):	4604063	Probenbez.:	Cl_I
y-Koordinate (Gauss-Krüger):	5625737	Ort:	Clausnitz

2. Standort

Bodenart:	Uls		
Nutzung:	Kartoffeln, gelegt		
Bearbeitung:	konventionell		
Feldzustand:	frisch		
Versuchsfläche:	Länge [m]:	3	
	sim. Länge [m]:	32	
	Breite [m]:	1	
	Neigung [-]:	10	

3. Bodendaten

Körnung [%]:	fein	mittel	grob	Summe:
Ton:	0	9	0	9
Schluff:	8	14	12	34
Sand:	13	20	24	57
Kontrollsumme:				100

Endinfiltrationsrate [mm/min]:	0.33
Lagerungsdichte in 20-25 cm Tiefe [kg/m ³]:	1220
Corg im Oberboden [%]:	1.25
Anfangswassergehalt [Vol.-%]:	32
Erosionswiderstand [N/m ²]:	0.0085
Bedeckungsgrad [%]:	14
Rauigkeit [s/m ^{1/3}] (Tracerversuch):	0.0110
Skinfaktor:	0.155
Gesamtabfluss bis Überstau (Q _{1ges}) [m ³ /m]:	0.431
Abflussmenge 1 min Überstau (Q ₂) [m ³ /m]:	0.01
Sedimentkonzentration [g/l] ohne Überstau:	3.11
Sedimentkonzentration [g/l] mit Überstau:	22.02

4. Niederschlag:

Dauer:	86
Intensität:	0.63

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
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Dr. Michael von Werner
GeoGnostics Boden- und Gewässerschutz
Bekassinenweg 30, 13503 Berlin
Telefon: + 49 30 43668137
Telefax: + 49 30 43668138
E-Mail: michael.von.werner@geognostics.de
Internet: <http://www.geognostics.de>
Dr. Markus Schindewolf, Prof. Jürgen Schmidt
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Agricolastr. 22, 09599 Freiberg
Telefon: +49 3731 392581
Telefax: +49 3731 392502
E-Mail: j.schmidt@tu-freiberg.de
Internet: <http://www.tu-freiberg.de>

Redaktion:

Ulf Jäckel
LfULG, Abteilung Landwirtschaft/Referat Pflanzenbau
Telefon: + 49 35242 631-7210
Telefax: + 49 35242 631-7299
E-Mail: ulf.jaeckel@smul.sachsen.de

Titelfoto:

Dr. Michael von Werner

Redaktionsschluss:

14.01.2014

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> 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 Parteinarbeitung 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.