



Phosphoreinträge durch Erosion in Sachsen

Schriftenreihe, Heft 11/2012



Abschätzung der erosionsbedingten Nährstoffeinträge in Oberflächen- wasserkörper nach EU-WRRL in Sachsen mit Hilfe des Modells EROSION 3D

Marcus Schindewolf

Projektleitung: Dr. Walter Schmidt

1	Motivation und Zielstellung	7
1.1	Wissenschaftliche Arbeitsziele	8
1.2	Technische Arbeitsziele	8
1.3	Ergebnisverwertung	8
2	Material und Methoden	8
2.1	Untersuchungsgebiet	8
2.1.1	Allgemeine Charakteristik	8
2.1.2	Flächennutzung	9
2.1.3	Boden und Relief	9
2.1.4	Gewässer.....	12
2.1.5	Klima.....	12
2.2	Verwendete Software.....	12
2.2.1	Simulationsmodell EROSION 3D.....	12
2.2.2	Datenbankprozessor DPROC	14
2.3	Daten und Datenaufbereitung	16
2.3.1	GIS-Daten.....	16
2.3.2	Daten aus eigenen Erhebungen	17
2.3.3	Daten zur Modellvalidierung	21
2.4	Bodenabtragssimulation	22
2.4.1	Worst-Worst-Case-Szenario	22
2.4.2	Best-Worst-Case-Szenario	22
2.4.3	Risikoabschätzung.....	23
2.5	Modellvalidierung	26
2.5.1	Gebietsauswahl	26
2.5.2	Ermittlung der P-Spenden aus Messwerten.....	26
2.5.3	Modellparametrisierung	27
3	Ergebnisse	30
3.1	Regionalisierte Phosphor-Gehalte	30
3.1.1	Kriging-Interpolation.....	30
3.1.2	Validierung der BSA-Phosphor-Gehalte	31
3.1.3	Oberboden-P-Gehalte der Oberflächenwasserkörper.....	32
3.2	Fraktionsabhängige Phosphorverteilung.....	34
3.2.1	Allgemeine Charakteristik	34
3.2.2	Partikelabhängige P-Konzentration und -Anreicherung	35
3.3	Bodenabtragssimulation	39
3.3.1	Sedimentlieferflächen	39
3.3.2	Gefährdete Oberflächenwasserkörper	53
3.4	Modellvalidierung	60
3.4.1	Abflussereignisse.....	60
3.4.2	Referenzjahre	62
4	Zusammenfassung und Ausblick	64
5	Quellenverzeichnis	65
6	Anhang	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Landnutzungsverteilung Sachsen	9
Abbildung 2:	Bodenregionen des Freistaates Sachsen	10
Abbildung 3:	Arbeitsweise des Datenbankprozessors DPROC	15
Abbildung 4:	Überlagerung von verschiedenen Datenhierarchien (Beispiel)	16
Abbildung 5:	Untersuchungsgebiete zur Phosphor- und Schwermetallbeprobung	18
Abbildung 6:	Probepunkte Bodenatlas Sachsen Teil 3 (BSA) und TU Bergakademie Freiberg (TUBA) im Einzugsgebiet der Talsperre Bautzen	19
Abbildung 7:	Probepunkte der TU Bergakademie Freiberg (TUBA) im Einzugsgebiet der Talsperre Saldenbach	20
Abbildung 8:	Durchführung des modifizierten Atterberg-Verfahrens	20
Abbildung 9:	Erosive Bodenarten und räumliche Verteilung in Sachsen	21
Abbildung 10:	Hierarchisch geschachtelte Analyse abtragsgefährdeter Planungseinheiten (Beispiel)	24
Abbildung 11:	Ermittlung der Sedimenteintragspunkte (Beispiel)	25
Abbildung 12:	Niederschlagsmenge der Ereignisse im Referenzjahr Subregion 7	29
Abbildung 13:	Interpolierte Oberboden-P-Gehalte sächsischer Ackerflächen	30
Abbildung 14:	Direktvergleich der Oberboden-P-Gehalte Bodenatlas Sachsen und TU Bergakademie Freiberg im Einzugsgebiet der Talsperre Bautzen	31
Abbildung 15:	P-Mineraldüngereinsatz im Freistaat Sachsen 1999-2009 (ERNST & FÖRSTER 2009)	32
Abbildung 16:	Auf OWK gemittelte Oberboden-P-Gehalte der Ackerflächen in sächsischen OWK	33
Abbildung 17:	Bodenarten der Bodenproben (fetter Rand: prioritäre Bodenarten)	34
Abbildung 18:	Grobfraktionsabhängige P-Anreicherungsfaktoren der untersuchten Bodenproben	37
Abbildung 19:	Zusammenhang zwischen P-Anreicherung im Ton und Tonanteil	37
Abbildung 20:	Zusammenhang zwischen P-Anreicherung im Schluff und Gesamt-P-Anteil	38
Abbildung 21:	Anteil des Oberboden-P auf Ackerstandorten (links) und Anteil des ausgetragenen Phosphors an den Kornfraktionen in Sachsen auf Basis des Worst-Worst-Case-Szenarios (rechts)	38
Abbildung 22:	Bodenabträge in Sachsen für das Worst-Worst-Case-Szenario	43
Abbildung 23:	Über Feldblöcke gemittelte Bodenabträge in Sachsen für das Worst-Worst-Case-Szenario	44
Abbildung 24:	Über OWK gemittelte Bodenabträge in Sachsen für das Worst-Worst-Case-Szenario	45
Abbildung 25:	Sedimentfracht aus OWK in Sachsen für das Worst-Worst-Case-Szenario	46
Abbildung 26:	Sedimentausttrag aus OWK in Sachsen für das Worst-Worst-Case-Szenario	47
Abbildung 27:	Bodenabträge in Sachsen für das Best-Worst-Case-Szenario	48
Abbildung 28:	Über Feldblöcke gemittelte Bodenabträge in Sachsen für das Best-Worst-Case-Szenario	49
Abbildung 29:	Über OWK gemittelte Bodenabträge in Sachsen für das Best-Worst-Case-Szenario	50
Abbildung 30:	Sedimentfracht aus OWK in Sachsen für das Best-Worst-Case-Szenario	51
Abbildung 31:	Sedimentausttrag aus OWK in Sachsen für das Best-Worst-Case-Szenario	52
Abbildung 32:	Sedimentausttrag und Ton-Anreicherung für das Referenzjahr 1994 im Hölzelbergbach-Einzugsgebiet	55
Abbildung 33:	Sedimenteintragsverhältnis (SDR) in sächsische OWK für das Worst-Worst-Case-Szenario	56
Abbildung 34:	Partikuläre Phosphorausträge aus OWK in Sachsen für das Worst-Worst-Case-Szenario	57
Abbildung 35:	Partikuläre Phosphorausträge aus OWK in Sachsen für das Best-Worst-Case-Szenario	58
Abbildung 36:	Abfluss-Phosphorkonzentration-Hysteresekurven der untersuchten Ereignisse	61
Abbildung 37:	Abflussganglinie Hölzelbergbach 31.03.-30.04.1995	61
Abbildung 38:	Abschätzung der partikulären P-Jahresausträge basierend auf Messwerten und Simulation für das Teil-EZG Hölzelbergbach	62
Abbildung 39:	Zusammenhang zwischen Durchfluss und partikulärer P-Konzentration (Extremwerte markiert)	63
Abbildung 40:	Zusammenhang zwischen P-Anreicherungsfaktor im Schluff und Sandgehalt (links) bzw. Tongehalt (rechts) ...	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bodenregionen und Bodenlandschaften Sachsens.....	11
Tabelle 2: Ein- und Ausgabeparameter von EROSION 3D.....	13
Tabelle 3: Datengrundlagen der Simulationsszenarien.....	22
Tabelle 4: Randbedingung der Simulationsszenarien.....	23
Tabelle 5: Parametrisierungsannahmen der Validierungsszenarien.....	28
Tabelle 6: Oberboden-P-Gehalte auf den Ackerflächen der Teilbearbeitungsräume.....	34
Tabelle 7: Korngrößenanteile und Gesamt-P-Gehalt der untersuchten Böden (Sai: Saidenbach; Bau: Bautzen).....	35
Tabelle 8: Fraktionsabhängige P-Konzentration und entsprechende P-Anreicherungsfaktoren (Sai: Saidenbach; Bau: Bautzen).....	36
Tabelle 9: Statistische Auswertung des Worst-Worst-Case-Szenarios.....	39
Tabelle 10: Mittlerer Bodenabtrag der Bodenregionen für das WWC-Szenario (geordnet nach Mittelwert).....	40
Tabelle 11: Bodenabtrag in den sächsischen Teilbearbeitungsräumen für das Worst-Worst-Case-Szenario.....	41
Tabelle 12: Statistische Auswertung des Best-Worst-Case-Szenarios.....	42
Tabelle 13: Bodenabtrag in den sächsischen Teilbearbeitungsräumen für das Best-Worst-Case-Szenario.....	42
Tabelle 14: Statistische Auswertung der Sediment- und Phosphorausträge aus sächsischen OWK (WWC: Worst-Worst-Case-Szenario; BWC: Best-Worst-Case-Szenario).....	53
Tabelle 15: Phosphor-Austrag aus sächsischen OWK für das WWC-Szenario (geordnet nach Mittelwert).....	54
Tabelle 16: Phosphor-Austrag aus sächsischen OWK für das BWC-Szenario (geordnet nach Mittelwert).....	54
Tabelle 17: Vergleich der P-Austräge aus sächsischen OWK mit den Ergebnissen anderer Autoren (Referenzjahre/Jahresmittelwerte).....	59
Tabelle 18: Vergleich der P-Austräge mit den Ergebnissen anderer Autoren (Ereignisse).....	60
Tabelle 19: Ergebnisse der Modellvalidierung.....	62
Tabelle 20: pH-Werte, C _{org} -Gehalte und P-Gehalte der Bodenproben im Einzugsgebiet der Talsperre Saidenbach.....	69
Tabelle 21: pH-Werte, C _{org} -Gehalte und P-Gehalte der Bodenproben im Einzugsgebiet der Talsperre Bautzen.....	70
Tabelle 22: Statistische Auswertung der Atterbergproben.....	71
Tabelle 23: Mittlerer Bodenabtrag der Bodenregionen für das BWC-Szenario (geordnet nach Mittelwert).....	72

Verzeichnis verwendeter Symbole und Abkürzungen

AF	Anreicherungsfaktor
ATKIS-DGM	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem – Digitales Geländemodell
ATKIS-DLM	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem – Digitales Landschaftsmodell
BK 50	Bodenkarte 1:50.000
BSA	Bodenatlas des Freistaates Sachsen
BSA3	Bodenatlas des Freistaates Sachsen - Teil 3: Bodenmessprogramm Dresden
BWC	Best-Worst-Case
$C_{(ti)}$	Konzentration am Probenahmetag
DPROC	Datenbankprozessor
DPROC-DB	Datenbank des Datenbankprozessors
EZG	Einzugsgebiet
EU-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
EW	Einwohner
F	Jahresspende [kg]
FK	Feldkapazität
GeoSN	Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen
GKZ	Gewässerkennzahl
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
L	Korngrößenanteil [%]
L_S	Korngrößenanteil Sand [%]
L_U	Korngrößenanteil Schluff [%]
L_T	Korngrößenanteil Ton [%]
M	Sedimentmenge
M_S	Sedimentmenge der Sandfraktion
M_U	Sedimentmenge der Schlufffraktion
M_T	Sedimentmenge der Tonfraktion
MW	arithmetisches Mittel
N	Anzahl der Probenahmetage
OWK	Oberflächenwasserkörper
P	Phosphor
PAF	Phosphoranreicherungsfaktor
$PAF_{Schluff}$	Phosphor-Anreicherungsfaktor in der Schlufffraktion
PAF_{Sand}	Phosphor-Anreicherungsfaktor in der Sandfraktion
PAF_{Ton}	Phosphor-Anreicherungsfaktor in der Tonfraktion
PKS	Parameterkatalog Sachsen
PO_4	Phosphat
Ortho- PO_4	Ortho-Phosphat
Q	Durchfluss [m^3/s]
Q_{Jahr}	mittlerer Jahresdurchfluss [m^3/s]
Q_{Probe}	Mittelwert der Durchflüsse aller Probenahmetage [m^3/s]
$Q_{(ti)}$	Durchfluss am Probenahmetag
RBS	Reichsbodenschätzung
S	Sand
SDR	Sedimenteintragsverhältnis (engl. Sediment Delivery Ratio)
T	Ton
TUBA	Technische Universität Bergakademie Freiberg
U	Schluff
WWC	Worst-Worst-Case
σ	Standardabweichung

1 Motivation und Zielstellung

Die nachhaltige Bewirtschaftung der Ressourcen Wasser und Boden ist zu einer der großen umweltpolitischen Herausforderungen dieses Jahrhunderts geworden. Auf europäischer Ebene zielt die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) (EG 2000) auf den Erhalt bzw. das Erreichen eines guten Gewässerzustandes. Hierbei stehen neben nachteiligen Veränderungen der Gewässermorphologie vor allem schädliche Stoffeinträge in die Gewässer im Zentrum des Interesses. Dies gilt insbesondere für den Eintrag von Phosphor (P), der als Pflanzennährstoff zu einer erhöhten Primärproduktion in Oberflächengewässern führt. Die anschließende Zersetzung abgestorbener Pflanzen verbraucht Sauerstoff. Sinkt der Sauerstoffgehalt im Gewässer unter einen kritischen Wert, treten anaerobe Zersetzungsprozesse in den Vordergrund. Diese haben die Bildung giftiger Stoffe zur Folge, die eine Verschlechterung des Gewässerzustandes bewirken können.

Weil Phosphor als Phosphat überwiegend in partikelgebundener Form vorliegt, ist der Eintragungspfad Erosion bei dieser Problematik von zentraler Bedeutung. Eine Zielerreichung der EG-WRRL setzt damit die Planung und Dimensionierung von Erosionsschutzmaßnahmen auf Einzugsgebietsebene voraus. Erster Schritt dieser Maßnahmenplanung ist die Identifikation erosionsgefährdeter Flächen und Feststoffeintragspfade in Gewässer. Die bisherige Kenntnis (HALBFAß et al. 2009) der Austräge an partikelgebundenem P basiert im Wesentlichen auf monatlich oder jährlich gemessenen P-Frachten im Gewässer oder auf hierauf kalibrierten Simulationsrechnungen mit empirischen Modellen (z. B. USLE).

Weil die Bodenerosion als vorrangig nichtkontinuierlicher Prozess stets an das Auftreten einzelner Starkniederschlagsereignisse gekoppelt ist, liefert die nicht ereignisgebundene Messung bzw. Simulation der P-Fracht lediglich eine Aussage zur P-Grundlast des Gewässers, sofern nicht zufällig ein Ereignis beprobt wird. Über den tatsächlichen Austrag geben daher weder die monatlichen Messungen noch die bisherigen Simulationen einen annähernd hinreichenden Aufschluss. Dies kann nur eine ereignisbezogene Betrachtung liefern. Deshalb basiert die vorliegende Studie auf dem ereignisbezogenen Modell EROSION 3D. Dieses Modell bildet im Unterschied zu den vorhandenen Messdaten bzw. Berechnungsergebnissen Spitzenlasten in hoher zeitlicher Auflösung ab.

Da die Stoffkonzentration der Partikel mit abnehmendem Korndurchmesser zunimmt, muss zur Abschätzung partikelgebundener Stoffeinträge in Oberflächengewässer die Verteilung der Kornfraktionen im eingetragenen Sediment bekannt sein. Dieser Forderung wird das Modell EROSION 3D gerecht, indem es sowohl die Menge als auch die Korngrößenverteilung des ausgetragenen Sediments physikalisch basierend beschreiben kann.

Im September 2009 wurde das Vorhaben „Abschätzung der erosionsbedingten Nährstoffeinträge in Oberflächenwasserkörper nach EG-WRRL in Sachsen mit Hilfe des Modells EROSION 3D“ vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie an die TU Bergakademie Freiberg vergeben. Die flächendeckende landesweite Modellanwendung des EROSION 3D-Modells erfordert einen konsistenten Eingangsdatensatz, der im Vorprojekt erzeugt werden konnte. Damit gelang es, die EROSION 3D-Parametrisierungssoftware DPROC flächendeckend für Sachsen einzusetzen und für Szenarienrechnungen auszuwerten. Diese Methodik erlaubt ereignisbezogene Simulationen der Bodenerosion und des Sedimenteintrages in Oberflächengewässer unter reproduzierbaren und vergleichbaren Bedingungen.

Ziel des Vorhabens ist es, den partikelgebundenen Phosphoraustrag aus Oberflächenwasserkörper nach EG-WRRL für den Fall ereignisbezogener Spitzenlasten zu simulieren. Daraus ergeben sich folgende Teilziele für das Projekt:

- Durchführung sachsenweiter Bodenabtragssimulationen für zwei Nutzungsszenarien (Worst-Worst-Case- und Best-Worst-Case-Szenario) mit dem Simulationsmodell EROSION 3D
- Berechnung ereignisbezogener Phosphorausträge in Oberflächenwasserkörper für die entsprechenden Nutzungsszenarien (Worst-Worst-Case- und Best-Worst-Case-Szenario)
- Validierung der Modellergebnisse für ein hydrologisches Einzugsgebiet unter Bezug auf Einzelereignisse und ein Referenzjahr

1.1 Wissenschaftliche Arbeitsziele

Die wissenschaftlichen Arbeitsziele des Vorhabens sind:

- Berechnung korngößendifferenzierter Sedimentausträge aus Oberflächenwasserkörpern und Identifizierung von Sedimentaustragsflächen und Sedimentübertrittspunkten in Gewässer
- Interpolation punktbezogener Oberboden-Phosphorgehalte aus dem Bodenmessprogramm Sachsen und Validierung auf Basis selbst ermittelter Vergleichsdaten
- Ermittlung der korngößenabhängigen Elementverteilung für Phosphor
- Berechnung sedimentgebundener Phosphorausträge aus Oberflächenwasserkörpern

1.2 Technische Arbeitsziele

Die technischen Arbeitsziele des Vorhabens sind:

- Erstellung sachsenweiter Karten zum Bodenabtrag und korngößenabhängigen Sedimentaustrag aus Oberflächenwasserkörpern für zwei Landnutzungsszenarien (Worst-Worst-Case- und Best-Worst-Case-Szenario)
- Hierarchische Identifizierung von Sedimentaustragsflächen und Sedimentübertrittspunkten in Gewässer
- Erstellung von Karten zu Phosphorgehalten in Oberböden und Generalisierung auf Ebene der Oberflächenwasserkörper
- Erstellung von Karten zum Phosphoraustrag aus Oberflächenwasserkörpern für zwei Landnutzungsszenarien
- Ermittlung des ereignisbezogenen Phosphoraustrages aus einem hydrologischen Einzugsgebiet für Einzelereignisse und Referenzjahre

1.3 Ergebnisverwertung

Die im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse finden Anwendung in der

- Zielerreichung der EG-WRRL auf Landesebene,
- verbesserten Beschreibung des selektiven P-Transports und
- Planung und Durchführung angepasster Einzugsgebietsmanagement-Strategien zur P-Austragsminimierung auf Landesebene.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

2.1.1 Allgemeine Charakteristik

Der Freistaat Sachsen umfasst eine Gesamtfläche von 18.400 km². Im Norden grenzt er an Brandenburg, im Osten an Polen, im Süden an die Tschechische Republik, im Südwesten an den Freistaat Bayern und im Westen an Thüringen und Sachsen-Anhalt. Sachsen wird nach MANNFELD & SYRBE (2008) in drei Naturraumeinheiten gegliedert:

- Sächsisch-Niederlausitzer Heideland
- Sächsisches Lössgefülle
- Sächsisches Bergland und Mittelgebirge

2.1.2 Flächennutzung

Von den 56 % landwirtschaftlich genutzten Flächen Sachsens (vgl. Abbildung 1) sind 79 % Ackerland und 21 % Grünland (STLA 2010). Die flächenmäßig intensivste Ackernutzung erfolgt im sächsischen Lössgebiet, dort liegt der Ackerflächenanteil bei 52 %, der Waldanteil mit nur 17 % weit unter dem Landesdurchschnitt. Die Waldanteile liegen in den Mittelgebirgen und im Tiefland bei ca. 40 %. In den Mittelgebirgen macht Grünland fast 40 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche aus und ist damit doppelt so hoch wie im Tiefland und den Lössgebieten (HALBFAß et al. 2009).

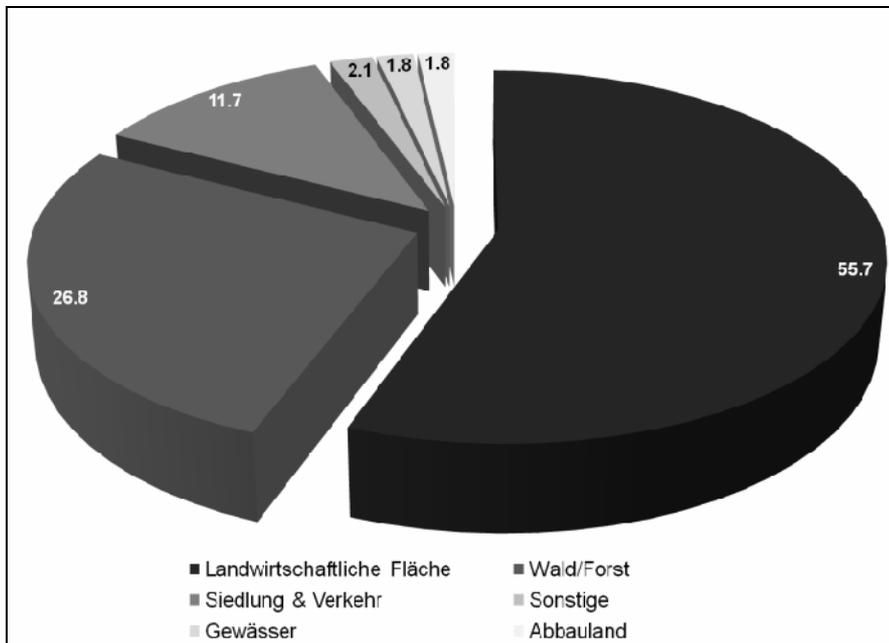


Abbildung 1: Landnutzungsverteilung Sachsen

2.1.3 Boden und Relief

Sachsen kann in sechs Bodenregionen (vgl. Tabelle 1) unterteilt werden. Diese Bodenregionen orientieren sich an den Naturraumeinheiten nach MANNFELD & SYRBE (2008). Im Norden befinden sich die Fluss- und Altmoränenlandschaften aus fluvialen und glazialen Sedimenten. In den Flusslandschaften sind darüber hinaus Flugsandgebiete charakteristisch. Ackerflächen sind in diesen Gebieten im Mittel zwischen 0,9-3,0 % geneigt (vgl. Tabelle 1 und Abbildung 2). In südlicher Richtung, im Übergang zwischen Tief- und Hügelland, nimmt die Verbreitung und Mächtigkeit äolischer Sedimente in den Löss- und Sandlösslandschaften zu und erreicht im Mittelsächsischen Lössgebiet ihr Maximum. Dort liegen die mittleren Hangneigungen der Ackerflächen zwischen 0,9 und 5,8 %. Im Übergang zum Bergland sinkt die Mächtigkeit der Lössdecke wieder ab. Diese Bergländer werden hinsichtlich des Ausgangsmaterials der Bodenbildung nochmals in drei Gruppen unterschieden. Im Berg- und Hügelland aus nichtmetamorphen Sand- und Tonsteinen ist ein engräumiger Wechsel von lössbedingten Substraten der Ebenheiten und sandigen Substraten der Tafelberge und Felsbildungen anzutreffen (vgl. Tabelle 1).

Die Sächsischen Mittelgebirge gehören den Berg- und Hügelländern mit hohem Anteil an Magmatiten und Metamorphiten, Südwestsachsen den Berg- und Hügelländern mit hohem Anteil an Ton- und Schluffschiefern an. In beiden Regionen dominieren schluffig sandige Substrate (LfUG 2007a). In den Mittelgebirgen nehmen die Hangneigungen deutlich zu und betragen im Mittel zwischen 5,4 und 8,5 %. Aufgrund der hohen Verbreitung schluffreicher Böden sind ca. 60 % der sächsischen Ackerböden erosionsgefährdet (SCHMIDT et al. 1996).

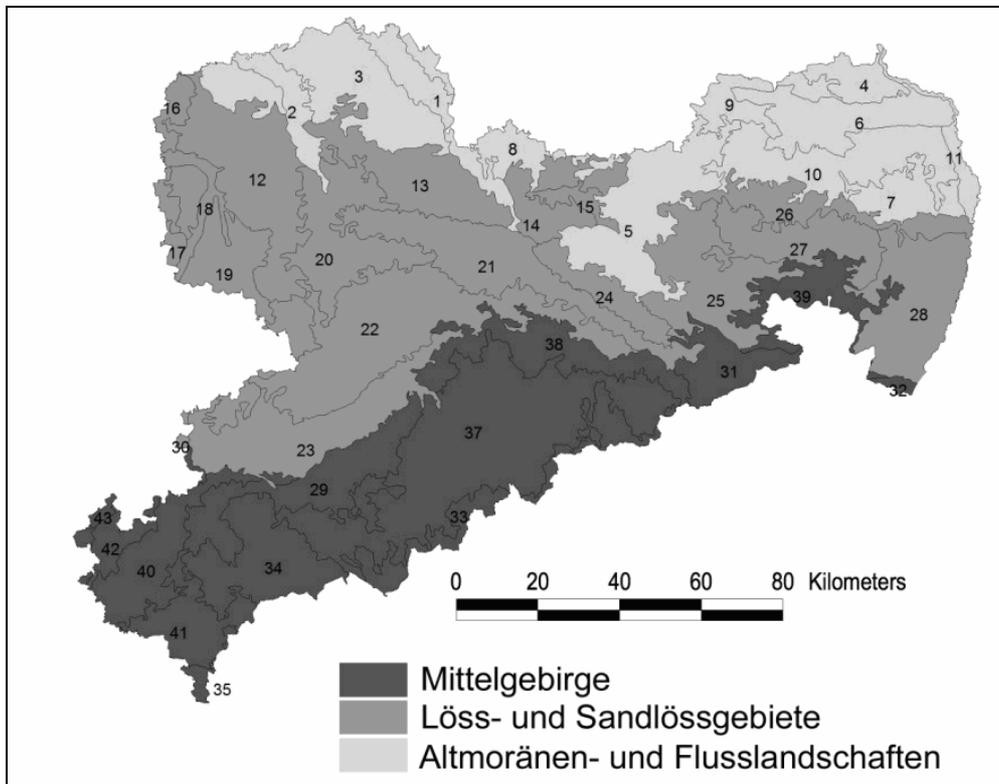


Abbildung 2: Bodenregionen des Freistaates Sachsen

Tabelle 1: Bodenregionen und Bodenlandschaften Sachsens

Bodenregion	Bodenlandschaft	ID	Fläche	Flächenanteil Ackerland	mittlere Hangneigung Ackerland	
			[km ²]	[%]	[%]	
Flusslandschaften	Riesa-Torgauer Elbtal	1	293,7	63,5	1,1	
	Tal der Vereinigten Mulde	2	200,3	47,4	1,1	
Altmoränenlandschaften	Düben-Dahlener Heide	3	813,3	47,2	1,8	
	Niederlausitzer Grenzwall	4	174,0	17,4	1,3	
	Westlausitzer Heide- und Kuppenland	5	763,6	23,0	3,0	
	Muskauer Heide	6	472,7	14,1	1,2	
	Nieskyer Platten	7	254,4	36,3	2,5	
	Elsterwerda-Herzberger Elsterniederung	8	249,1	42,3	1,3	
	Senftenberger Heide- und Seengebiet	9	230,0	18,4	0,9	
	Oberlausitzer Heide- und Teichlandschaft	10	653,0	29,8	1,5	
	Rothenburger Neißetal und Muskauer Durchbruch	11	111,7	41,1	1,2	
	Mittelwert				34	1,7
	Löss- und Sandlösslandschaften	Leipziger Lössstiefland	12	956,7	57,3	1,6
Nordsächsisches Lössstief- und Plattenland		13	571,1	71,5	2,5	
Großenhainer Lössstiefland		14	323,7	70,7	2,4	
Großenhainer Rödertal		15	81,6	53,6	2,0	
Hallesches Lössstiefland		16	144,0	78,3	0,9	
Weißenfelscher Lössstiefland		17	34,6	62,7	1,5	
Elster-Luppe-Auen		18	353,0	7,4	1,2	
Bornaer Lössstiefland		19	318,4	43,0	1,6	
Nordwestsächsisches Lösshügel- und Vulkanitkuppenland		20	604,2	54,3	4,3	
Mittelsächsisches Lösshügelland		21	750,8	67,7	5,8	
Mulde-Lösshügelland		22	1215,9	55,4	5,2	
Vorerzgebirgisches Becken		23	772,2	41,4	5,8	
Dresdener Elbtalweitung		24	234,5	14,9	3,0	
Westlausitzer Lösshügelland		25	634,3	43,7	5,3	
Oberlausitzer Tieflandrand		26	358,5	51,0	3,3	
Bautzener Lösshügelland		27	447,8	62,3	4,2	
Oberlausitzer Lösshügelland		28	688,6	50,8	4,4	
Zeitz-Altenburger Lösshügelland		29	199,5	63,9	4,8	
Ronneburger Lösshügelland		30	12,2	50,6	3,8	
Mittelwert					53	3,9
Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an Sandstein;	Elbsandsteingebirge	31	297,2	12,9	5,4	
	Zittauer Gebirge	32	30,5	0,3	8,5	
Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an Magmatiten und Metamorphiten;	Erzgebirgskamm und obere Lagen	33	450,6	7,8	7,7	
	Höheres Westerzgebirge	34	589,1	12,7	6,6	
Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an Ton- und Schluffschiefern	Östliches Fichtelgebirge	35	39,3	21,9	7,8	
	Westlicher Erzgebirgsnordrand	36	586,6	35,6	7,6	
	Erzgebirgsnordabdachung	37	1876,9	34,1	7,4	
	Östlicher Erzgebirgsnordrand	38	536,4	45,7	5,9	
		39				
	Oberlausitzer Bergland		351,6	27,5	6,4	
	Vogtländisches Kuppenland	40	479,3	42,0	6,7	
	Elstergebirge	41	126,0	64,1	8,0	
	Mehlteuer Hochfläche	42	123,0	43,0	6,1	
	Thüringer Schiefergebirge	43	44,6	34,4	6,5	
	Mittelwert				31	6,9

2.1.4 Gewässer

Das Sächsische Gewässernetz ist 22.000 km lang. Das entspricht einer Gewässernetzdichte von ca. 1.2 km/km². Aufgrund des generellen Gefälles entwässern die meisten größeren Flüsse in nördliche Richtung. Die Mehrzahl der Flüsse Sachsens entwässert über die Elbe in die Nordsee. Die wichtigsten Elbezuflüsse mit ihren entsprechenden Nebenflüssen sind Schwarzer und Weißer Schöps, Spree, Schwarze Elster, Pulsnitz, Große Röder, Zwickauer Mulde, Freiburger Mulde, Vereinigte Mulde, Flöha, Zschopau, Chemnitz, Pleiße, Weiße Elster mit einem Einzugsgebietsanteil von mehr als 95 % an der Landesfläche. Lediglich im äußersten Osten entwässert die Lausitzer Neiße über die Oder in die Ostsee. Die größten Standgewässer sind Tagebaurestseen vor allem im Norden des Freistaates. Sachsen zählt zu den Bundesländern mit den meisten Talsperren (LTV 2010a), wovon die zwei größten, die Talsperren Quitzdorf und Bautzen im Osten des Landes, der Brauchwassergewinnung dienen. Die Mehrzahl der überwiegend zur Trinkwasserbereitstellung verwendeten Talsperren befindet sich im Erzgebirge.

2.1.5 Klima

Klimatisch gesehen befindet sich Sachsen in der außertropischen Westwindzone mit ausgeprägten Jahreszeiten. Die atmosphärische Zirkulation wird durch häufig ostwärts wandernde Tiefdruckgebiete (Zyklonen) bestimmt, die Sachsen das ganze Jahr über Niederschläge bescheren (MANNSFELD & SYRBE 2008). Die mittleren jährlichen Niederschlagsmengen betragen für Sachsen 785 mm. Davon fallen 55 % in den Sommermonaten (Mai-Oktober) und 45 % im Winterhalbjahr (November-April). Das Niederschlagsgeschehen wird maßgeblich vom Relief beeinflusst. So steigen die mittleren Jahresniederschläge von 686 mm im Tiefland bis auf 900 mm im Mittelgebirge an (SMUL 2008).

In Anlehnung an die naturräumliche Gliederung hat der Deutsche Wetterdienst acht Starkniederschlags-Subregionen ausgewiesen (MICHAEL et al. 1996). Dabei bilden die Subregionen Unteres Erzgebirge und Erzgebirgsvorland die Regionen höchster Niederschlagsintensitäten im Referenzjahr (max. 1.18 mm/min). Das LfUG (2005a) gibt an, dass sich die Eintrittswahrscheinlichkeit von Starkniederschlägen besonders in den Monaten Juli und August im Zuge des Klimawandels erhöht hat.

2.2 Verwendete Software

2.2.1 Simulationsmodell EROSION 3D

Das Erosionsmodell EROSION 3D basiert im Wesentlichen auf der von SCHMIDT (1991) erarbeiteten Hangprofilversion EROSION 2D.

Es ist ein rasterbasiertes, physikalisch begründetes und computergestütztes Modell zur Simulation von Bodenabtrag, Deposition und Sedimenteintrag in Fließgewässern. Unter Zuhilfenahme des Green-Ampt-Ansatzes (GREEN & AMPT 1911) wird die Infiltration berechnet. Die Partikelablösung und der Partikeltransport erfolgen über den Impulsstromansatz von SCHMIDT (1991; 1992; 1998). Das Modell EROSION 3D ist als Ein-Schicht-Infiltrationsmodell validiert und gut dokumentiert. Eine umfangreiche Datengrundlage zur Parametrisierung des Modells wurde im Rahmen des Bodenerosionsmessprogramms Sachsen geschaffen, die im Parameterkatalog Sachsen (MICHAEL et al. 1996) zusammengefasst ist.

Sensitivitätsanalysen hinsichtlich seiner Eingabeparameter wurden hinreichend durchgeführt (SCHMIDT 1996). Das Modell wurde in zahlreichen Einzugsgebieten verifiziert (HEBEL 2003; JETTEN et al. 1999; KLIK et al. 1998; MICHAEL et al. 2005; SCHILDE 2008; SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2009; SCHMIDT 1996; SCHMIDT et al. 1999; SCHOB et al. 2006; SEIDEL 2008).

Über die experimentell ermittelten Parameter Skinfaktor und Erosionswiderstand können die bearbeitungsbedingten Effekte auf die Prozesse Infiltration, Oberflächenabfluss und Partikelablösung abgebildet werden. EROSION 3D (Ver. 3.15) verfügt über mehrere obligatorische bzw. optionale Module. Im Folgenden werden nur die Module erläutert, die unmittelbar mit der Projektbearbeitung in Verbindung stehen.

Das Modul Digitale Reliefanalyse dient der Generierung hydrologisch essenzieller Rasterdaten aus vorhandenen DGM-Datensätzen. Dieses umfasst folgende Funktionen:

- Suche und Auffüllung abflussloser Senken
- Berechnung der flächenhaften Abflussverteilung und Abflusskonzentration
- Berechnung der zu jeder Rasterzelle gehörenden Einzugsgebietsfläche und Fließweglänge (Abflusskonzentration)
- Schwellenwertberechnung zur Bestimmung ephemerer Gerinne, die nur bei Starkniederschlägen wasserführend sind
- Bestimmung der Wasserscheidenlage und des Einzugsgebietsauslasses

Das Boden-/Landnutzungsmodul dient dem Einlesen und Weiterverarbeiten von im Vorfeld generierten Eingabedatensätzen. Darüber hinaus ermöglicht es die Abbildung des Infiltrationsverlaufs in Abhängigkeit von Boden- und Bearbeitungseigenschaften.

Im Niederschlagsmodul können im Voraus erstellte Niederschlagsdaten weiterverarbeitet werden. Eine räumliche Verteilung von Niederschlagsdaten, z. B. für Einzugsgebiete, wird über Zonenraster und Niederschlagstabellen ermöglicht. Zur Ermittlung des flächenspezifischen Oberflächenabflusses, des Bodenabtrags und der Deposition werden im Infiltrationsmodul folgende modellinterne hydrologische, hydraulische und bodenphysikalische Berechnungen durchgeführt:

- Niederschlagsinfiltration (Green-Ampt-Ansatz) mit der Annahme inhomogener Eigenschaften im Bodenprofil und Diskretisierung des Profils in mehrere Schichten
- Berechnung der Infiltration in gefrorenen Böden¹
- Abflussbildung (Niederschlagsüberschuss)

Im Erosionsmodell werden folgende Berechnungen durchgeführt:

- Ablösung der Bodenpartikel von der Bodenoberfläche als Folge des Aufschlags der Regentropfen (Splash) und der Scherkraft des Oberflächenabflusses
- Partikeltransport sowie Deposition (differenziert nach neun Bodenartenklassen) in Abhängigkeit von der Transportkapazität des Oberflächenabflusses
- Partikelanreicherung entlang des Transportweges durch selektive Deposition

Darüber hinaus besteht mit dem Modell Erosion 3D die Möglichkeit, die Prozesse hydrodynamische Abflussverzögerung und Schneeschmelze zu simulieren. Die zu diesen Beschreibungen notwendigen Teilmodule Abflussmodul und Schneeschmelzmodul werden zur Validierung des Modells benötigt und in Kapitel 3.4 detailliert erläutert. Die im Vorhaben benötigten Ein- und Ausgabeparameter des Modells EROSION 3D sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Ein- und Ausgabeparameter von EROSION 3D

	Bodenparameter	Maßeinheit	
Eingabeparameter	Lagerungsdichte	kg/m ³	
	Anfangswassergehalt	V.-%	
	Organischer Kohlenstoffgehalt	M.-%	
	Bodenbedeckungsgrad	%	
	Korngrößenverteilung für 9 Bodenarten	M.-%	
	Erosionswiderstand	N/m ²	
	Hydraulische Rauigkeit n	s/m ^{1/3}	
	Skinfaktor	-	
	Reliefparameter		
		x, y, z-Koordinaten	m

¹ Anwendung wird im Kapitel 3.4 Validierung benötigt

Niederschlagsparameter		
Niederschlagsdauer		min
Niederschlagsintensität		mm/min
Flächenbezogene Parameter		
Erosion, Deposition (Sedimentbilanz)		kg/m ²
Sedimentkonzentration		kg/m ³
Nettoerosion im Einzugsgebiet des Vorfluternetzes		t/ha
Durchschnittlicher Abtrag innerhalb des jeweiligen Zelleinzugsgebietes		t/ha
Durchschnittliche Deposition innerhalb des jeweiligen Zelleinzugsgebietes		t/ha
Durchschnittlicher Austrag (Nettoerosion) aus dem jeweiligen Zelleinzugsgebiet		t/ha
Nettoerosion im Einzugsgebiet des Vorfluternetzes		t/ha
Querschnittsbezogene Parameter		
Oberflächenabflussvolumen		m ³ /m
Zufluss aus dem jeweiligen Einzugsgebiet		m ³ /m
Sedimentzufluss aus dem jeweiligen Einzugsgebiet		kg/m
Tonanteil des transportierten Sediments		kg/m
Schluffanteil des transportierten Sediments		kg/m
Gesamtaustrag aus dem Zelleinzugsgebiet, differenziert nach 9		kg/m
Zelleinzugsgebiet		kg/m
Vorfluterabflussvolumen		m ³ /m
Transportiertes Sediment im Vorfluter		kg/m

Ausgabeparameter

2.2.2 Datenbankprozessor DPROC

Der Datenbankprozessor DPROC wurde von der Firma GeoGnostics Berlin im Rahmen eines FuE-Vorhabens entwickelt (LfL und GeoGnostics 2005).

Es handelt sich um ein PC-gestütztes, interaktives Software-Werkzeug, das über Datenbankabfragen aus den verfügbaren Geo-Basisdaten (digitale Relief-, Boden- und Landnutzungsdaten) flächendeckende Eingabewerte für die spezifischen Boden- und Landnutzungsparameter des Prognosemodells EROSION 3D generiert (LfL und GeoGnostics 2005) (vgl. Abbildung 3).

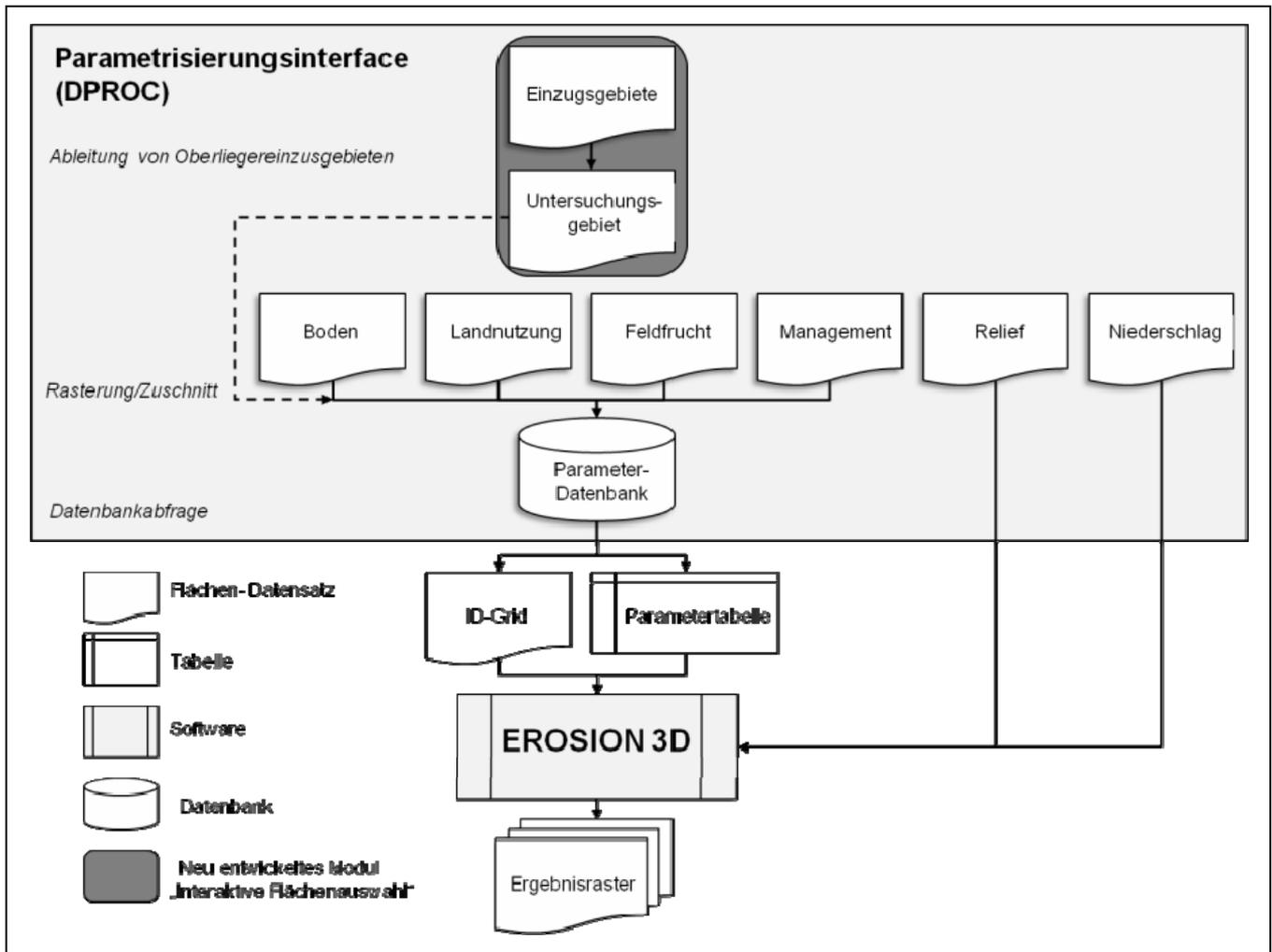


Abbildung 3: Arbeitsweise des Datenbankprozessors DPROC

Die Grundlage dieser Software bildet der Parameterkatalog Sachsen (MICHAEL et al. 1996). Auf dieser Basis entwickelte KÖHLER (2000) eine Datenbankanwendung, die es ermöglicht, aus den Primärinformationen zu Landnutzung und Boden die notwendigen Eingangsparameter für EROSION 3D abzuleiten. Bei diesen Primärinformationen handelt es sich um verfügbare oder selbst erhobene Raumdaten (Boden- und Landnutzungsdaten), zumeist um Vektor-Daten, die ggf. mit sekundären Tabellen gekoppelt sind (LfL und GeoGnostics 2005). Je nach Aussagekraft bzw. Flächendeckung können diese Daten hierarchisch geordnet werden. Dabei erstellt der Datenbankprozessor jeweils aus den unterschiedlichen Primärinformationen ein Landnutzungs- und ein Bodenraster, das im weiteren Verlauf zu einem Elementarflächenraster verarbeitet wird. Abbildung 4 stellt beispielhaft eine mögliche hierarchische Ordnung offizieller und selbst erhobener Daten dar.

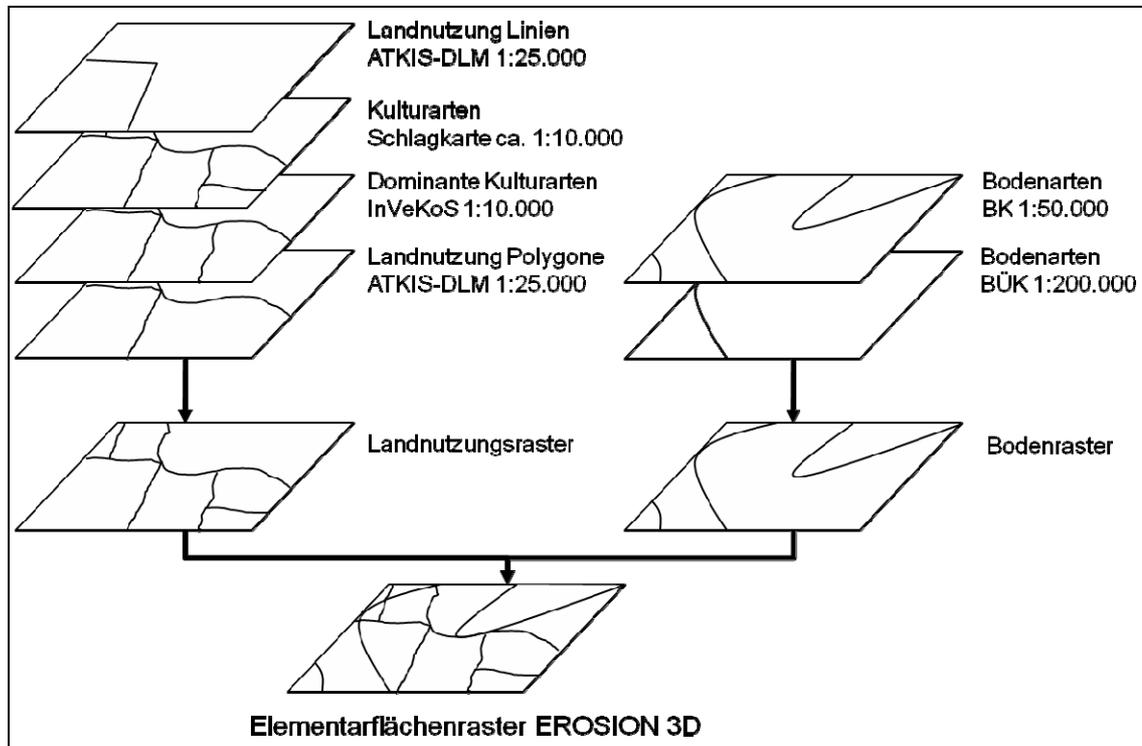


Abbildung 4: Überlagerung von verschiedenen Datenhierarchien (Beispiel)

Im Programmhintergrund des Datenbankprozessors werden über eine relationale Datenbank jeder räumlichen Primärinformation (Bodenart, Landnutzung, Bearbeitungssystem, Feuchtestufe) in Abhängigkeit des Simulationszeitpunktes (Monat) spezifische Modellparameter zugewiesen. Wie oben bereits erwähnt, basiert diese Datenbank auf dem Parameterkatalog Sachsen (MICHAEL et al. 1996), in dem die Ergebnisse von 129 Großberechnungsexperimenten des Bodenerosionsmessprogramms Sachsen (LfUG 1994a; LfUG 1994b; LfUG 1995a; LfUG 1995b; LfUG 1996) und weiteren Kleinberechnungsexperimenten von ZIMMERLING (2004) sowie SCHINDEWOLF & SCHMIDT (2010) zusammengestellt wurden.

Ein Datenbankabfragemenü erlaubt die Auffüllung von Leerfeldern, die Zuweisung globaler Nutzungen und Bodenarten. Bodenzustände, Bodenfeuchten, Entwicklungszustände und Mulchgehalte können aus der DPROC-Datenbank (DPROC-DB) abgeleitet bzw. über selbst erstellte Raster vordefiniert werden. Eine intern erzeugte Protokolldatei gibt Auskunft über die Qualität der erzeugten Datensätze, d. h. für jede Elementarfläche werden die Eingangsparameter nach ihrer Schätzqualität („1“, sehr gut – „4“, befriedigend) bewertet. Datenlücken sind durch den Wert „-9999“ gekennzeichnet.

2.3 Daten und Datenaufbereitung

2.3.1 GIS-Daten

Reliefdaten

Für das Vorhaben wurde das angepasste Digitale Geländemodell auf Basis des ATKIS-DGM 25 aus dem Projekt „Flächendeckende Abbildung der Bodenerosion durch Wasser unter Anwendung des Modells Erosion 3D“ (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2010) verwendet. Es verfügt gegenüber der nicht angepassten Version von KÖTHE et al. (2005) über ein eingetieftes Gewässernetz. Damit wird gewährleistet, dass die offiziellen Fließgewässer den tiefsten Geländebereichen und demzufolge den vom Modell erzeugten Vorflutern folgen, womit eine genauere Verortung der Sedimentübertrittspunkte in die Oberflächengewässer ermöglicht wird.

Bodendaten

Zur Ableitung der Primärinformation Bodenart wurde die überarbeitete Form des Bodenatlas des Freistaates Sachsen - Teil 4 (BSA 4) (LfUG 2007a) aus dem Projekt EROSION 3D (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2010) verwendet. Die Überarbeitung beinhaltet aufgefüllte Leerflächen vor allem in Bereichen von Siedlungen und Tagebauen.

Landnutzung

Als Grundlage der Landnutzungsverteilung diente die korrigierte Version des ATKIS-DLM 25 im Maßstab 1:25.000 aus dem FuE-Vorhaben EROSION 3D Sachsen (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2010). Die Korrektur der offiziellen Datengrundlage umfasst das Auffüllen von mehr als 4.500 Fehlflächen mit Hilfe von Orthofotos.

Niederschlagsdaten

Die Grundlage der verwendeten Niederschlagsdaten bildet ein Gutachten des DWD (MICHAEL et al. 1996). Dieses weist für Sachsen acht Niederschlagsregionen aus, die mit 2-, 5-, 10-, 20-, 50- und 100-jährigen Ereignissen hinterlegt sind. Weil die Niederschlagsdaten nur in einzelnen Dateien vorliegen und keinen Flächenbezug aufweisen, mussten die Informationen verknüpft und flächig verfügbar gemacht werden (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2010). Ein auf Basis der Niederschlagsregionen des Parameterkataloges Sachsen (MICHAEL et al. 1996) erstelltes Zonenraster ermöglicht die eindeutige Verknüpfung zu den Daten der statistischen Ereignisse.

Hydrologische Einzugsgebiete

Die korrigierten offiziellen Einzugsgebietsgrenzen (LfUG 2007b) lagen aus dem Projekt EROSION 3D SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2010) landesweit vor. Die Gewässer können per Gewässerkennzahl (GKZ) nach der LAWA-Kodierung einem der 13 Hauptgewässer in Sachsen zugeordnet werden. Die Daten wurden übernommen und im DPROC zur interaktiven Gebietsauswahl hinterlegt. Oberlieger der Einzugsgebiete können über die Gewässerkennzahl automatisch identifiziert werden (LAWA 1993). Die im Projekt erarbeiteten Simulationen beziehen sich auf Oberflächenwasserkörper (OWK), die kleinste Einheit der EU-WRRRL. OWK sind einheitliche und bedeutende Abschnitte eines oder mehrerer Oberflächengewässer (EG 2000). Auf sächsischem Territorium befinden sich Einzugsgebiete bzw. -anteile von 713 Oberflächenwasserkörpern (HALBFAß et al. 2009). Im Folgenden beziehen sich die Simulationen der Stoffdynamik auf das Eigeneinzugsgebiet der OWK und nicht auf dessen Fließgewässereinzugsgebiet. Das bedeutet, dass alle berechneten Sediment- und Stoffeinträge aus dem Eigeneinzugsgebiet des OWK und nicht aus Oberliegereinzugsgebieten stammen. Zum Zweck der Bearbeitung sind die OWK der Gewässereinzugsgebiete zu einer übergeordneten Ebene, den Teilbearbeitungsräumen, zusammengefasst.

Regionale Phosphordaten

Der Bodenatlas des Freistaates Sachsen - Teil 3 - Bodenmessprogramm Dresden (BSA3) (LfUG 2000) stellt Phosphor- und Schwermetallgehalte der Böden im Freistaat Sachsen flächendeckend im Raster von 4*4 km zur Verfügung. Der gesamte Datenbestand enthält horizontdifferenzierte Informationen für Forst-, Grünland- und Ackerböden. Aufgrund der Tatsache, dass nennenswerter Bodenabtrag und damit zusammenhängender partikelgebundener Phosphorverlust nur auf Ackerflächen stattfindet, ist es zweckmäßig, aus dieser Datenbasis nur die Oberbodenhorizonte der Ackerlandstandorte zu selektieren. Die verbleibenden Punktinformationen werden mit Hilfe von Kriging zu einem Raster mit 200 m Kantenlänge interpoliert. Beim Kriging handelt es sich um ein geostatistisches Interpolationsverfahren, das auf Grundlage der im theoretischen Variogramm beschriebenen räumlichen Zusammenhänge die räumliche Verteilung der betrachteten Daten schätzt. Die so erzeugten Ergebnisse werden zur weiteren Verwendung auf die Ebene der Oberflächenwasserkörper gemittelt.

Weil die Basisinformation des BSA3 (LfUG 2000) in einem relativ kleinen Maßstab erstellt wurde und die zu Grunde liegende Beprobung mehr als 13 Jahre zurück liegt, muss im Voraus der Elementeintragsberechnung eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt werden. Dazu werden die interpolierten Elementgehalte aus den offiziellen Quellen mit selbst erhobenen Daten verglichen.

2.3.2 Daten aus eigenen Erhebungen

Validierung der offiziellen Phosphor-Daten

Die Validierung wurde in zwei Talsperreneinzugsgebieten durchgeführt (Talsperre Saidenbach und Talsperre Bautzen), die sich aufgrund der bestehenden Datenlage und ihrer Bedeutung zum Phosphor- bzw. Schwermetallaustrag besonders eignen (ENGELHARDT 1996; LEICHTFUß et al. 2006; RICHTER 2004) (vgl. Abbildung 5).

In beiden Gebieten wurden Mischproben aus dem Oberboden von Ackerlandstandorten entnommen und auf ihre Gesamtphosphorgehalte untersucht. Für jedes Gebiet waren 30 Probenstandorte vorgesehen, die sowohl ein breites Bodenartenspektrum (vgl. Abbildung 6 und Abbildung 7) abdecken als auch repräsentativ für Sedimentlieferflächen sind. Die Probenahme erfolgte in Anlehnung an die Vergleichsuntersuchung des BSA3 (LfUG 2000) als Mischprobe der Oberbodenhorizonte bis max. 30 cm Tiefe.

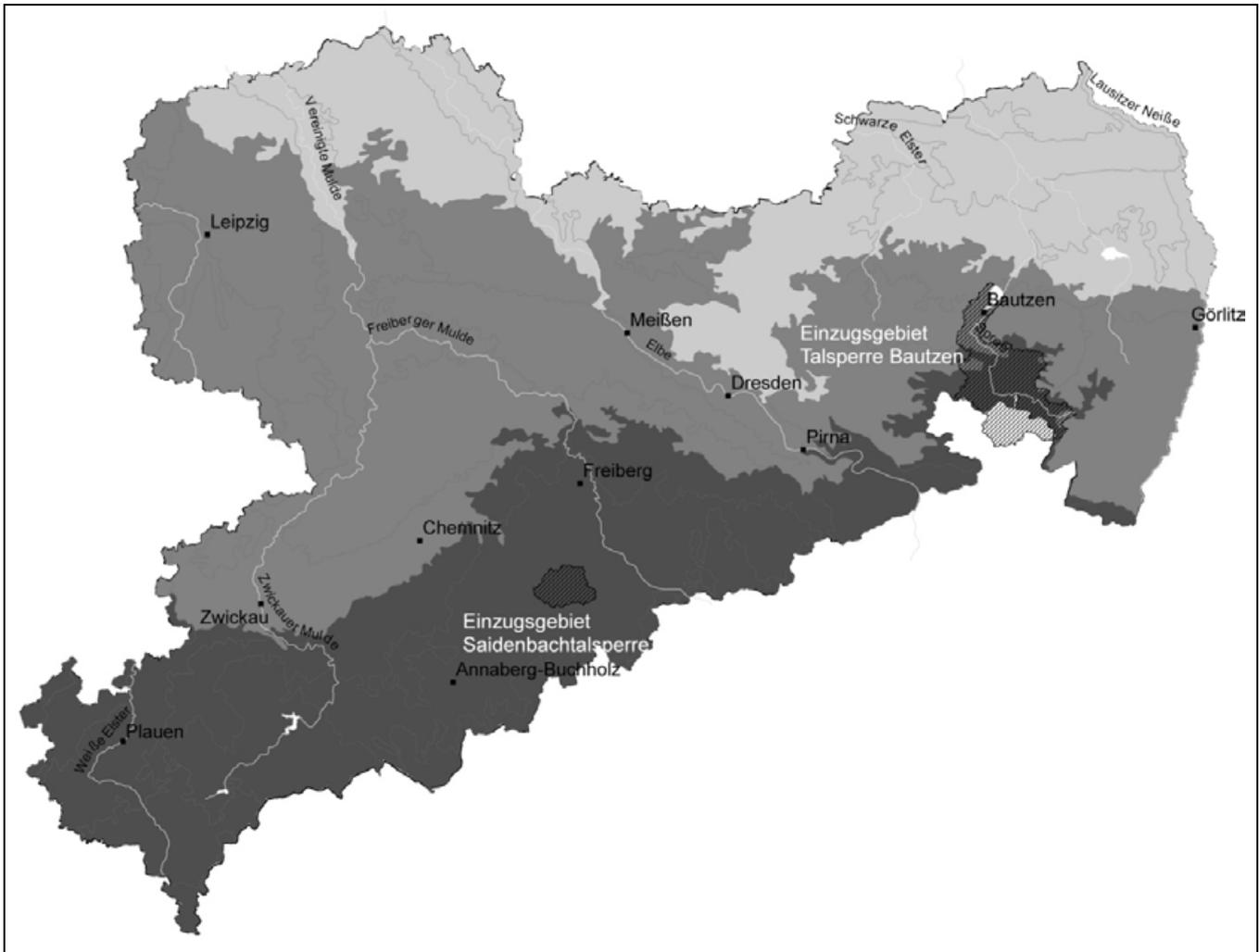


Abbildung 5: Untersuchungsgebiete zur Phosphor- und Schwermetallbeprobung

Nach Aufbereitung der Proben wird ein Königswasseraufschluss hergestellt. Im Mineralogischen Labor der TU Freiberg werden diese Proben gemäß EN ISO 11885:1997 E22 hinsichtlich ihrer Phosphor- und Schwermetallgehalte analysiert.

Im Gebiet der Talsperre Bautzen war es möglich, Probepunkte des BSA erneut zu beproben und damit einen Direktvergleich der P-Gehalte im Oberboden der letzten zehn Jahre darzustellen. In beiden Gebieten wurden darüber hinaus flächendeckende P-Gehalte aus den erhobenen Daten interpoliert und mit der in Kapitel 3.2 erstellten Rasterkarte sachsenweiter Oberboden-P-Gehalte verglichen.

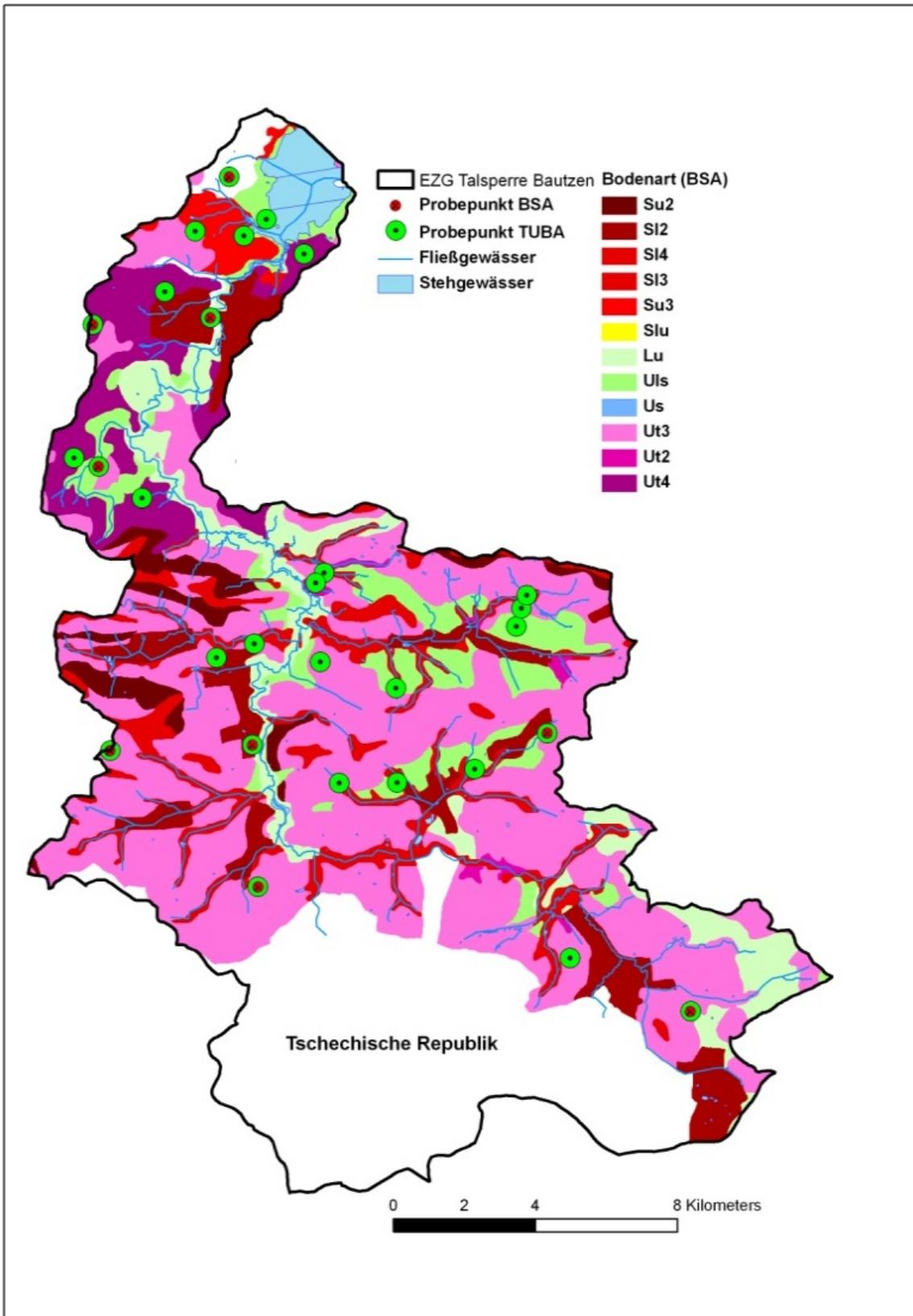


Abbildung 6: Probepunkte Bodenatlas Sachsen Teil 3 (BSA) und TU Bergakademie Freiberg (TUBA) im Einzugsgebiet der Talsperre Bautzen

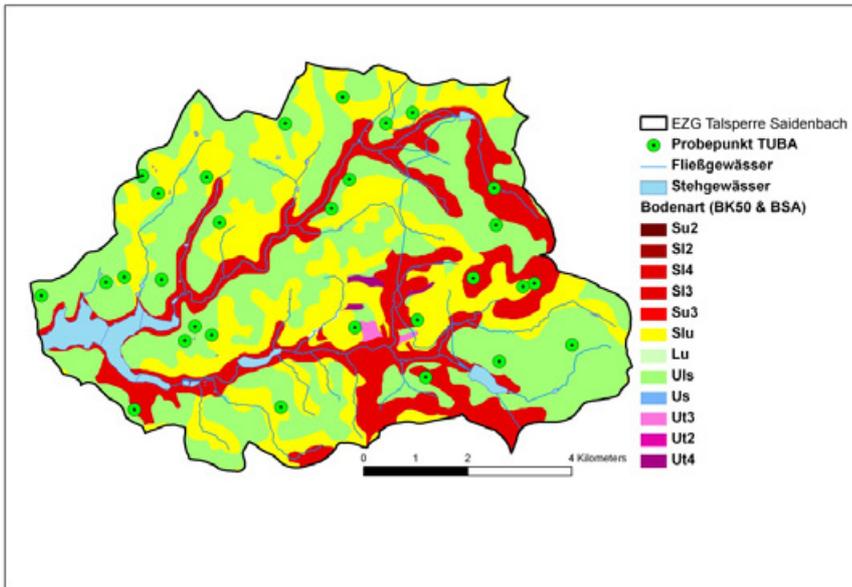


Abbildung 7: Probepunkte der TU Bergakademie Freiberg (TUBA) im Einzugsgebiet der Talsperre Saldenbach

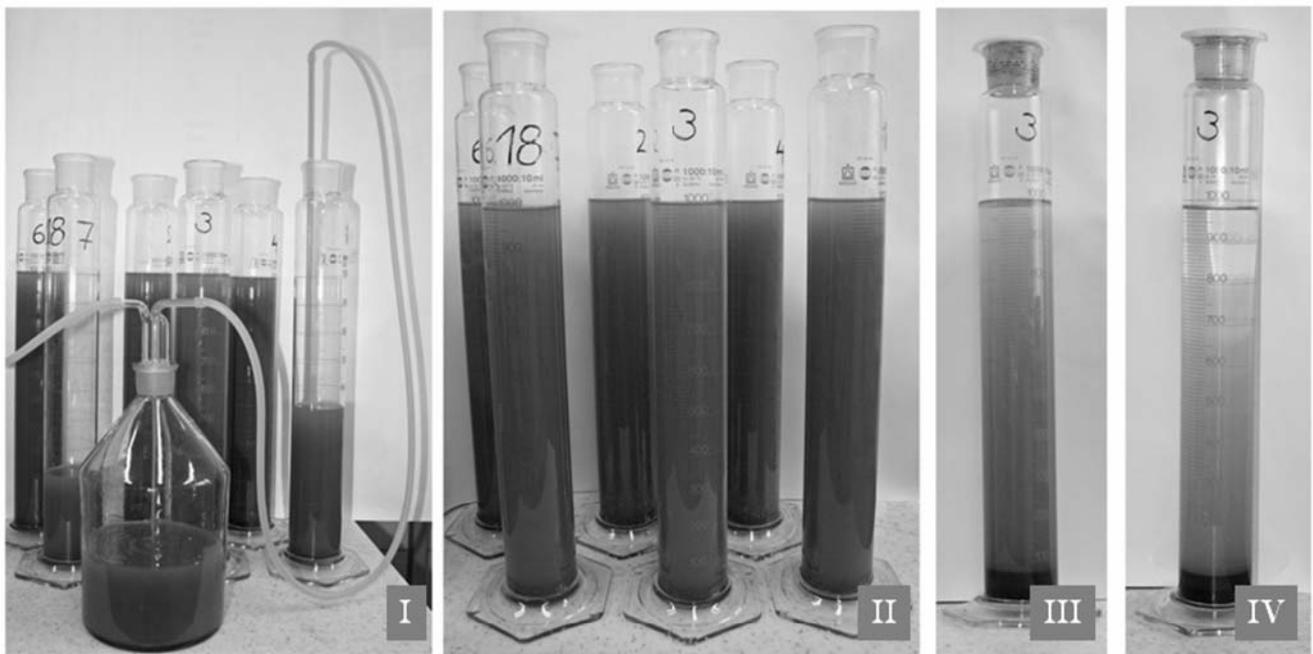


Abbildung 8: Durchführung des modifizierten Atterberg-Verfahrens

- I: Versuchsaufbau des modifizierten Atterberg-Verfahrens mit Köhn-Zylindern und Wasserstrahlpumpe
- II: Köhn-Zylinder vor der 1. Absaugung
- III: Köhn-Zylinder vor der 2. Absaugung
- IV: Köhn-Zylinder vor der 10. Absaugung

Bestimmung der fraktionsabhängigen Phosphorgehalte

Weil Phosphor überwiegend in den kleineren Kornfraktionen konzentriert ist (QUINTON 1999; SCHMIDT 1996) und im Verlauf der Erosions- und Transportprozesse eine Sortierung der Kornfraktionen stattfindet, müssen die Elementgehalte für die einzelnen Fraktionen bekannt sein. Mit dem aufwändigen Sieb-Sedimentations-Verfahren nach Atterberg (MÜLLER 1964) können die Korngrößen des Bodens effektiv getrennt werden. Das Verfahren nach Atterberg basiert auf dem Gesetz von STOKES (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Die getrennten Hauptfraktionen Ton, Schluff und Sand werden dann auf ihre Phosphorgehalte hin analysiert (vgl. Abbildung 8).

Die Probenahme erfolgte in den genannten Testgebieten für fünf erosionsensitive Bodenarten mit jeweils drei Wiederholungen. Aufgrund des großen Arbeitszeitaufwandes für das Atterberg-Verfahren ist der Probenumfang begrenzt. Als Schwellenwert für erosionsensitive Bodenarten dient der Erosionswiderstand <0.001 für Saatbettbereitung konventioneller Bodenbearbeitung aus dem Parameterkatalog Sachsen (PKS) (MICHAEL et al. 1996).

Die Abbildung 9 klassifiziert die erosiven Bodenarten (links) und gibt Aufschluss über ihre räumliche Verteilung in Sachsen (rechts). Auf Grundlage dieser Auswertung wurde versucht, bei der Probenahme die fünf häufigsten Bodenarten Uls, Ut3, Slu, Su3 und Us besonders zu berücksichtigen. Dazu wurden in den Testgebieten auf Grundlage der verfügbaren Bodenarten des Bodenatlas Sachsen (LfUG 2007a) und der Bodenkarte 1:50.000 (LfULG, Stand 2009) die Probenahmestandorte in Flächen der ausgewählten Bodenarten festgelegt.

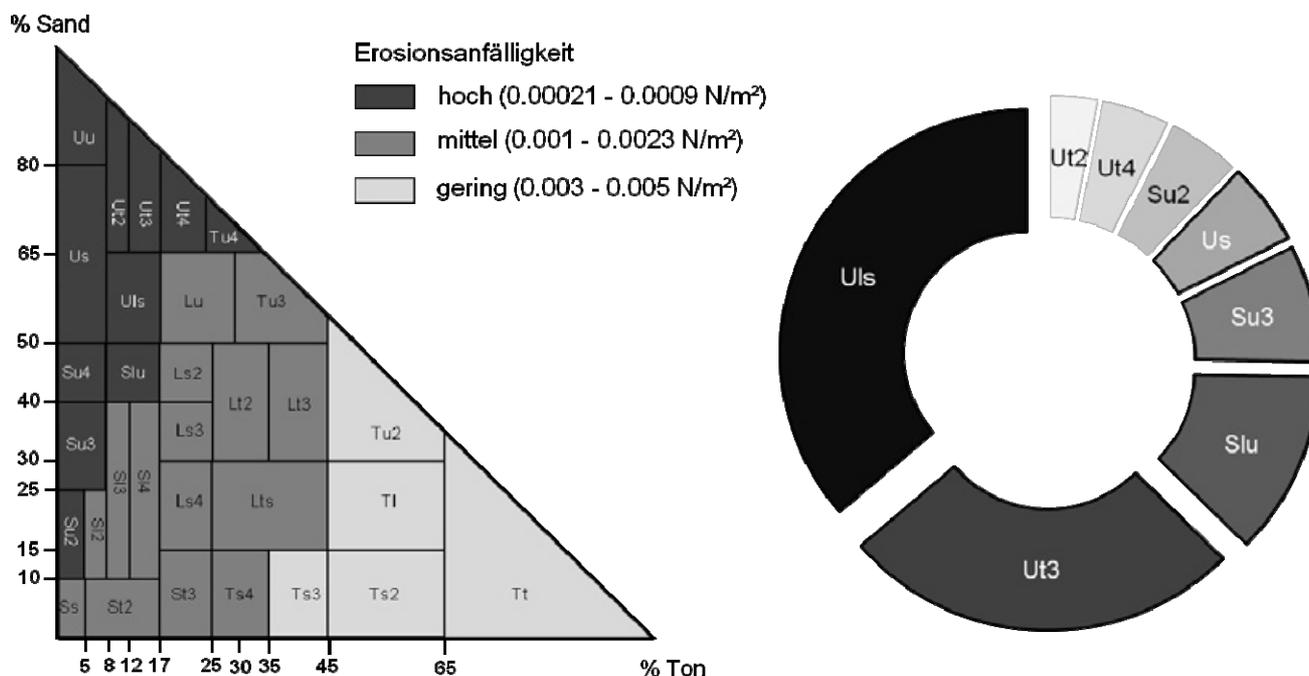


Abbildung 9: Erosive Bodenarten und räumliche Verteilung in Sachsen

2.3.3 Daten zur Modellvalidierung

Die Validierung der Modellergebnisse auf Einzugsgebietsebene erfordert Messdaten zum P-Austrag. Diese wurden von der LTV zur Verfügung gestellt (LTV, 2010b). Bei diesen Daten handelt es sich um langjährige Messreihen, bei denen mehrmals im Jahr Gesamtphosphat (PO₄), Orthophosphat (Ortho-PO₄) sowie der Durchfluss gemessen wurden. Die P-Konzentrationen wurden spektralphotometrisch nach DEV D11, DIN-EN 1189-3 für Ortho-Phosphat und nach DEV D11, DIN-EN 1189-6 für Gesamt-Phosphat bestimmt (SUDBRACK 2005).

Aus einem abgeschlossenen Forschungsprojekt der BTU Cottbus existieren darüber hinaus ereignisbezogene P-Messungen zu zwei Abflussereignissen (GRÜNEWALD et al. 1996). Bei den Abflussmessungen kam ein Schwimmerpegel zum Einsatz. Ein automatischer Probennehmer entnahm durchflussproportional pro 500 m³ ein Liter Probe. Im Abfluss wurden analog zu den Monatsmessungen Gesamtphosphat und Ortho-Phosphat gemessen. Die korrespondierenden Niederschlags- und Klimadaten werden von der LfL (2005a) zur Verfügung gestellt. Die entsprechenden Landnutzungsdaten liefern ebenfalls Aufnahmen der LfL (2005) und das überarbeitete ATKIS-DLM 25 (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2010). Als DGM steht das überarbeitete ATKIS-DGM aus dem Vorgängerprojekt mit 20 m Rasterweite zur Verfügung (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2010) (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Datengrundlagen der Simulationsszenarien

Datenart	Datensatz	Quelle	zeitliche/räumliche Auflösung
Niederschlag	Niederschlagsschreiber Forchheim	LfL 2005a	10min
Klimadaten	Klimastation Forchheim	LfL 2005a	1h
Landnutzung	Schlagkartei	LfL 2005b	ca. 1:10:000/jährlich
	ATKIS-DLM	GeoSN 2005, SCHINDEWOLF 2010	1:25:000
Bodendaten	RBS	LfUG 2005b	Ca.1:10.000
Reliefdaten	ATKIS-DGM	GeoSN 2005, SCHINDEWOLF 2010	1:25.000, 20 m Rasterweite
Durchflussmessung	Schwimmerpegel	GRÜNEWALD et al. 1996	10min-5h (nicht normiert)
Phosphormessung	Phosphormessung ereignisbezogen (abflusssynchron)	GRÜNEWALD et al. 1996	10min-5h (nicht normiert)
	Phosphormessung, monatlich	LTV	1-2 Monate

2.4 Bodenabtragssimulation

Zur Parametrisierung der gesamten Landesfläche müssen im Voraus zusammenhängende Teilgebiete definiert werden, die einzeln berechnet werden können. Der im Vorhaben verfügbare Computer mit 4 GB Arbeitsspeicher kann ca. 12-14 Mio. Zellen verarbeiten. Aus diesem Grund muss Sachsen bei einer räumlichen Auflösung von 20 m Rasterweite in zwölf Untereinheiten geteilt werden. Diese Einheiten werden mit Relief-, Boden-, Landnutzungs- und Niederschlagsdaten hinterlegt. Für die Simulation der Bodenabträge werden vergleichende Szenarienrechnungen durchgeführt. Dabei bezeichnet ein Szenario in der Planung einen zumindest theoretisch möglichen Zustand in der Zukunft. In den Umweltwissenschaften dienen Szenarien vor allem der Analyse von Ursache und Wirkung im Bereich des Risikomanagements z. B. zur Erarbeitung von Hochwasserschutzkonzepten.

2.4.1 Worst-Worst-Case-Szenario

Bezogen auf ein 10-jähriges Starkregenereignis beschreibt das Worst-Worst-Case-Szenario den ungünstigsten zu erwartenden Bodenzustand. Auf dieser Basis berechnete Bodenabträge und Sedimenteinträge können auf Einzelschlägen auftreten. Das Eintreten dieser Zustände auf Ebene der Oberflächenwasserkörper bzw. des ganzen Landes ist unwahrscheinlich. Dieses Szenario dient daher überwiegend der Identifizierung erosionsgefährdeter Flächen sowie besonders von Sedimenteinträgen betroffener Gewässerabschnitte und ist relevant für die Planung und Bemessung von Schutzmaßnahmen. Um landnutzungs- und bearbeitungsbedingte Einflüsse auf den Bodenabtrag auszuschließen, werden global die gleichen Nutzungs- und Bearbeitungsverhältnisse für die Ackerflächen des ATKIS-DLM angenommen. Um die bodenart- und reliefbedingten Einflüsse auf das Abtragsverhalten herauszustellen, wird beim Worst-Worst-Case-Szenario global ein Saatbettzustand nach konventioneller Bodenbearbeitung mit dem Pflug angenommen. Die Anfangsbodenfeuchte liegt bei Feldkapazität (FK), ferner befinden sich auf der Bodenoberfläche keine Pflanzenrückstände in Form von Mulch (vgl. Tabelle 4).

2.4.2 Best-Worst-Case-Szenario

Um das Verhalten landwirtschaftlicher Nutzflächen bei flächendeckender Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung zu beschreiben, wurde ein Best-Worst-Case Szenario simuliert. Dazu gelten alle Annahmen des Worst-Worst-Case Szenario zur Landnutzungsverteilung, zum Entwicklungsstand der Pflanzen und zum Anfangswassergehalt. Im Unterschied zum Worst-Worst-Case-Szenario wird der Grubber anstelle des Pfluges als dominantes Arbeitsgerät vorausgesetzt und die Bodenbedeckung auf 30 % erhöht, um eine Mulchbedeckung zu simulieren (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Randbedingung der Simulationsszenarien

Randbedingung	Szenario	Worst-Worst-Case	Best-Worst-Case
Landnutzung		real (ATKIS-DLM)	real (ATKIS-DLM)
Kulturarten		Ackerland im Saatbettzustand	Ackerland im Saatbettzustand
Anfangsbodenfeuchte		hoch (FK)	hoch (FK)
Mulchbedeckung		0 %	30 %
Entwicklungszustand		mittel	mittel
Arbeitsgerät		Pflug	Grubber
Bodenzustand		mittel	mittel
Niederschlag		10j. Extremereignis (PKS)	10j. Extremereignis (PKS)

2.4.3 Risikoabschätzung

Landwirtschaftliche Nutzflächen

Mit dem um eine interaktive Gebietsauswahl inklusive Datenzuschnitt erweiterten DPROC Software-Paket (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2010) werden dem Anwender schnelle und zuverlässige Informationen zur Stoffdynamik ermöglicht. Dazu werden aus den Sedimentbudgets der Worst-Worst-Case-Simulation die Bodenverluste selektiert. Mit dem Werkzeug „Zonal-Statistik“ im Softwarepaket ArcGIS 9.2 werden diese auf die Kulisse der Feldblöcke bzw. Oberflächenwasserkörper gemittelt.

Bezüglich einer Ergebnisverwertung für die Maßnahmenplanung ist es zweckmäßig, eine hierarchisch geschachtelte Abfrage nach der Abtragsgefährdung vom Einzelraster über den Feldblock zum Oberflächenwasserkörper (vgl. Abbildung 10) durchzuführen.

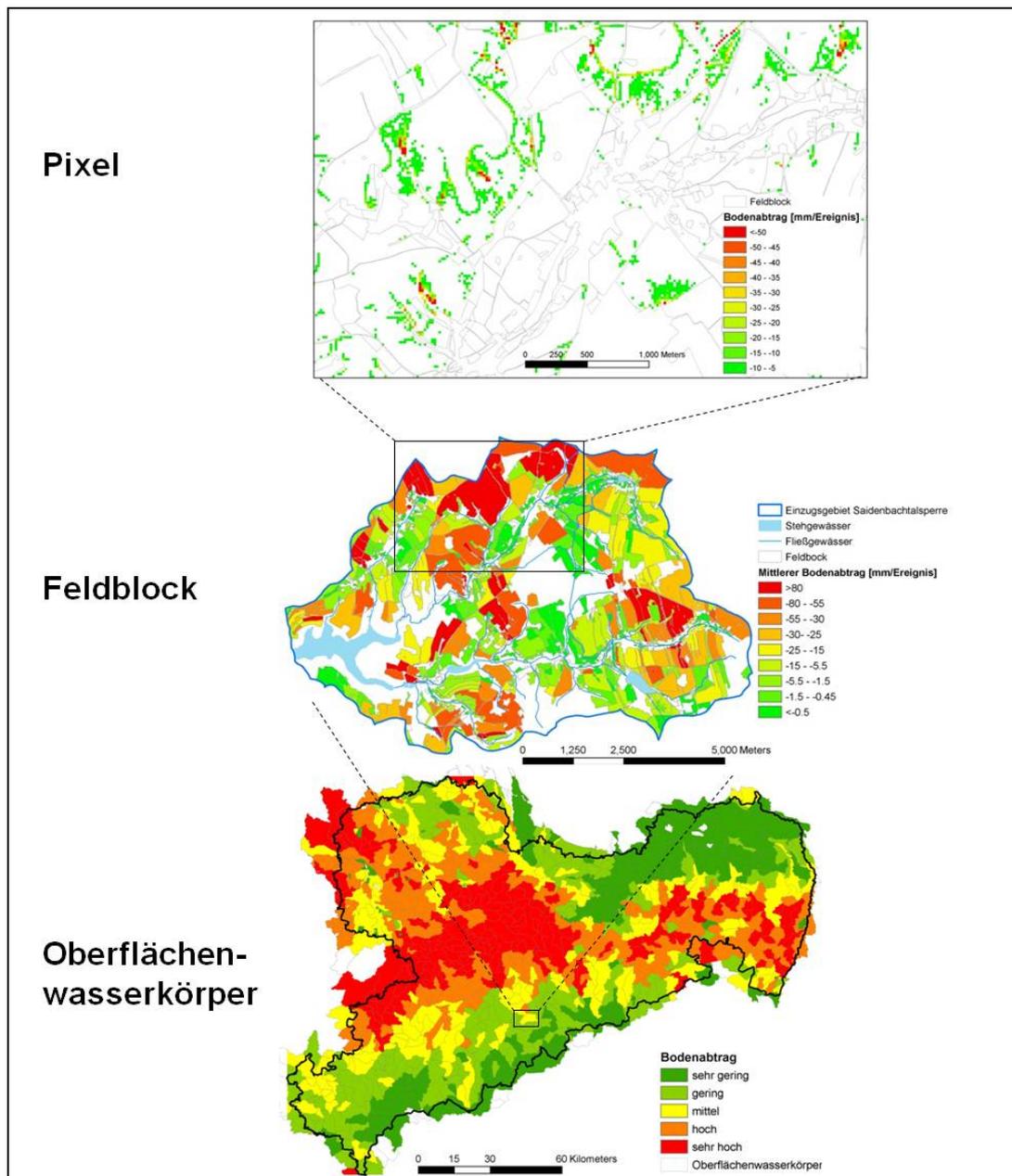


Abbildung 10: Hierarchisch geschichtete Analyse abtragsgefährdeter Planungseinheiten (Beispiel)

Als übergeordnete Planungseinheit dienen die Teilbearbeitungsräume in Sachsen gemäß EG-WRRL. Diese Herangehensweise zielt vor allem auf die mögliche Planung und Bemessung von Erosionsschutzmaßnahmen im Feldmaßstab.

Oberflächengewässer

Besonders im Hinblick auf die Einhaltung der Ziele der EG-WRRL ist es sinnvoll, die Übertrittspunkte von Sediment in Oberflächengewässer zu identifizieren. Dazu mussten zwei Informationsebenen (Gewässer und Sedimentmassenströme) miteinander verschnitten werden. Ein Gewässerraster bildete die Grundlage der Verortung von Sedimentübertrittspunkten und wurde aus den Vorflutern der EROSION 3D-Reliefenanalyse abgeleitet.

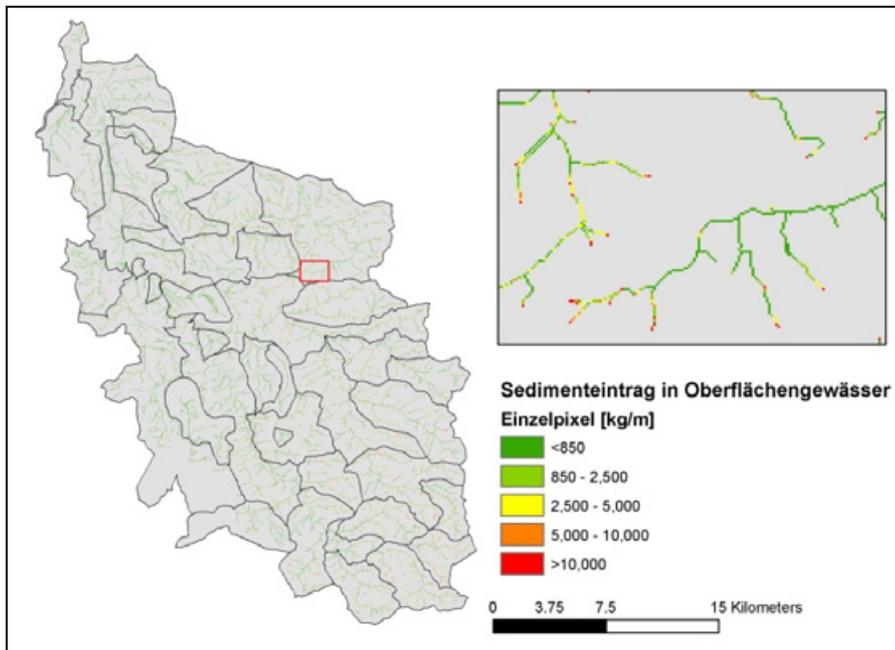


Abbildung 11: Ermittlung der Sedimenteintragspunkte (Beispiel)

Anschließend wurden die Sedimentmassenströme mit dem Vorfluterraster unter Verwendung der Funktion „Math“ verschritten. Ergebnis ist eine Rasterkarte mit farblich klassifizierter Gewässerabschnittgefährdung (vgl. Abbildung 11). Mit dem Werkzeug „Zonal-Statistik“ konnte jeweils die Sedimentsumme [t] und die Sedimentspende [t/ha*Ereignis] des eingetragenen Bodenmaterials in separaten Rasterkarten dargestellt werden.

Zur Ermittlung der partikelgebundenen Stoffeinträge wird die mittlere Korngrößenzusammensetzung des Ausgangsmaterials auf Feldblockebene ausgewertet. Diese wird mit Hilfe der Bodenarten auf Ackerland des Bodenatlas Sachsen Teil 4 (LfUG 2007a) und der ArcGIS-Funktion „Zonal-Statistik“ ermittelt. Für diese Bodenarten werden die interpolierten und flächengewichteten Stoffkonzentrationen [mg/kg] entsprechend der fraktionsabhängigen Elementbindung (vgl. Kap. 2.3.2) auf die Fraktionen Sand, Schluff und Ton verteilt (vgl. Gleichung 1)

Gleichung 1:

$$C = (L_S * C_S + L_U * C_U + L_T * C_T) / 100$$

Mit:

C	mittlere Elementkonzentration [mg/kg]
L _S	mittlerer Sandgehalt [%]
L _U	mittlerer Schluffgehalt [%]
L _T	mittlerer Tongehalt [%]
C _S	Elementkonzentration im Sand [mg/kg]
C _U	Elementkonzentration im Schluff [mg/kg]
C _T	Elementkonzentration im Ton [mg/kg]

Im jeweiligen Fließgewässer wird der Massenstrom und die Korngrößenverteilung des transportierten Sedimentes abgefragt. Mit Hilfe der spezifischen Elementkonzentrationen [mg/kg] können auf dieser Basis die Elementausträge [kg] bezogen auf das Einzelereignis wie folgt berechnet werden:

Gleichung 2:

$$M = (M_S * C_S + M_U * C_U + M_T * C_T) / 100$$

Mit:

M	ausgetragene Elementmenge [kg/Ereignis]
M _S	ausgetragene Sandmenge [kg/Ereignis]
M _U	ausgetragene Schluffmenge [kg/Ereignis]
M _T	ausgetragene Tonmenge [kg/Ereignis]

Die fraktionsspezifischen Phosphorkonzentrationen [mg/kg] werden durch separate Analyse der Kornfraktionen mit Hilfe des Atterberg-Verfahrens gewonnen (vgl. Kapitel 2.3.2). Dabei werden nur die Konzentrationen [mg/kg] für die Ton- und Schlufffraktion bestimmt. Die Stoffkonzentration [mg/kg] in der Sandfraktion ergibt sich rechnerisch aus Gleichung 3.

Gleichung 3:

$$C_S = (C - (C_U + M_U + C_T * M_T)) / M_S$$

Das Verhältnis der Stoffkonzentration [mg/kg] in den Kornfraktionen [mg/kg] zur Gesamtkonzentration wird als Anreicherungsfaktor [-] bezeichnet (auch Werte <1 möglich). Zur Berechnung der tatsächlichen Stoffeinträge [kg/Ereignis] werden für jeden Übertrittspunkt im GIS die jeweils eingetragene Sand-, Schluff- und Tonmenge [kg/Ereignis] abgefragt. Diese wird auf OWK-Ebene aufsummiert und mit den spezifischen Konzentrationen (vgl. Gleichung 2 und 3) verrechnet. Als Ergebnis steht für die Planung eine Karte zur Verfügung, die OWK-spezifisch auf Basis des 10-jährigen Extremereignisses die Phosphorspende [kg/(ha*Ereignis)] für die Landnutzungsszenarien ausweist.

2.5 Modellvalidierung

2.5.1 Gebietsauswahl

Das Modell sollte hinsichtlich des partikelgebundenen Phosphoraustrages validiert werden. Die dazu notwendigen Datengrundlagen sind nur selten für kleine Einzugsgebiete gegeben. Über eine relativ gute Datenbasis verfügt ein Teileinzugsgebiet der Saidenbachtalsperre (Hölzelbergbach). Dieses wurde daher zur Modellvalidierung ausgewählt. Für das Einzugsgebiet Hölzelbergbach existieren insbesondere P-Austragsdaten für einzelne Abflussereignisse, die unmittelbar mit Simulationsergebnissen verglichen werden können. Darüber hinaus liegen mehrjährige Messungen zu Gesamt-P und Orthophosphat im Fließgewässer zu sechs bis zwölf Zeitpunkten pro Jahr vor.

2.5.2 Ermittlung der P-Spenden aus Messwerten

Grundlage der jährlichen Spendenberechnung der LTV sind Sekundenwerte des Durchflusses [m³/s] und unter optimalen Bedingungen eine monatliche Wassergütemessung. Die P-Konzentrationen [mg/l] wurden spektralphotometrisch nach DEV D11, DIN-EN 1189-3 für Ortho-Phosphat und nach DEV D11, DIN-EN 1189-6 für Gesamt-Phosphat bestimmt (SUDBRACK 2005). Der Berechnung der partikulären P-Spende [kg] liegt die Annahme zugrunde, dass der partikuläre Anteil dem Gesamt-Phosphat abzüglich des Ortho-Phosphatanteils entspricht.

Die jährliche P-Spende wurde mit Hilfe der abflusskorrigierten Standardmethode der LAWA (2003) durchgeführt, weil durch die in der Regel monatlich stattfindenden Beprobungen nicht die gesamte jährliche Abflussdynamik berücksichtigt wird. Dabei wird die ermittelte P-Spende am Probenahmetag mit einem Abflusskorrekturfaktor multipliziert, der das Verhältnis des Abflusses am Probenahmezeitpunkt zum mittleren Jahresabfluss beschreibt (vgl. Gleichung 4).

Gleichung 4:

$$F = \frac{364 \cdot 86.400}{0,001 \cdot 1.000.000} \cdot \frac{1}{N} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N c(t_i) \cdot Q(t_i)}{Q_{\text{Probe}}} \cdot Q_{\text{Jahr}}$$

Q_{Jahr}	Jahresmittelwert Durchfluss [m^3/s]
Q_{Probe}	Mittelwert der Durchflüsse aller Probenahmetage [m^3/s]
N	Anzahl der Probenahmetage
$c(t_i)$	Konzentration am Probenahmetag [mg/l]
$Q(t_i)$	Durchfluss am Probenahmetag [m^3/s]

Die ereignisbezogenen Spenden wurden aus gemessenen P-Konzentrationen und korrespondierenden Durchflussmessungen ermittelt. Die Durchflussmessung und die Messung der P-Konzentration erfolgten nicht zeitnormiert. Zur Berechnung der Ereignisspende wurden beide Werte in 10-minütigen Intervallen bis zum nächsten Messzeitpunkt extrapoliert.

2.5.3 Modellparametrisierung

Abflussereignisse Hölzelbergbach

Den ereignisbezogenen Simulationen und den Langfrist-Simulationen liegen, basierend auf der jeweiligen Kenntnis der Initialbedingungen, differenzierte Parametrisierungsannahmen zugrunde. Die für die Validierung herangezogenen Einzelereignisse unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Charakteristik deutlich. Bei dem Ereignis 1 handelt es sich um ein Niederschlags-Abflussereignis mit Sedimentaustrag zwischen dem 13. und 14. Mai 1995. Bei dem Ereignis fiel 41,5 mm Niederschlag innerhalb von 24 Stunden und verursachte einen Gesamtabfluss von ca. 780 m^3 Wasser (GRÜNEWALD et al. 1996). Das zweite Ereignis hingegen ist ein reines Schneeschmelzereignis, bei dem aufgrund fehlenden Niederschlags nur Partikelablösung durch Oberflächenabfluss stattfand. GRÜNEWALD et al. (1996) berichten von einer ca. 43 cm mächtigen Schneedecke auf gefrorenem Boden, die innerhalb von fünf Tagen komplett abgetaut ist. Im Zeitraum vom 17. bis zum 18. März 1996 führte die Schneeschmelze zu einem Gesamtabfluss von 7.750 m^3 Wasser.

Grundsätzlich wurden beide Ereignisse auf nachvollziehbare Initialbedingungen parametrisiert und über die Parameter Anfangsbodenfeuchte und Skinfaktor der unteren Bodenschichten so kalibriert, dass die simulierte Abflussmenge annähernd der gemessenen entspricht. Eine Kalibrierung des Parameters Erosionswiderstand wurde nicht vorgenommen. Da für beide Ereignisse nur P-Messungen vorliegen, kann über die ausgetragenen Sedimentmengen und die Beziehung zwischen partikulärem P und Sedimentaustrag keine Aussage getroffen werden. Der Oberflächenabfluss wurde mit der Software „Base Flow Filter“ (ARNOLD & ALLEN 1999; ARNOLD et al. 1999) vom gemessenen Gesamtabfluss separiert.

Ereignis I (Niederschlag-Abfluss vom 13.-14. Mai 1995)

Der Parametrisierung des Niederschlags-Abfluss-Ereignisses liegt die reale Landnutzung zugrunde (GeoSN 2005; LfL 2005b). Die Bodenbearbeitung erfolgte konservierend mit unterschiedlichen Arbeitsgeräten (LfL 2005b). Eigenen Untersuchungen zu Folge erfolgte die konservierende Bodenbearbeitung bis etwa Mitte der 1990er-Jahre in einer weniger intensiven Variante als heute (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2010). Aus diesem Grund wurde zur Parametrisierung der Bodenbearbeitung der weniger invasive Zinkenrotor als Arbeitsgerät angenommen.

Für das Ereignis wurde gemäß den Beobachtungen von GRÜNEWALD et al. (1996) eine mittlere Bodenfeuchte gemäß Parameterkatalog Sachsen vorausgesetzt.

Aufgrund der Anfangsfeuchtebedingungen, der Dauer des Niederschlagsereignisses und der gefallenen Niederschlagsmenge reichen die oberen 30 cm (Bearbeitungshorizont) zur Beschreibung der Infiltrationsprozesse nicht aus. Das Modell bietet im Mehr-Schicht-Modell die Möglichkeit, die Infiltration in vertikalen Schichten differenziert zu beschreiben (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2009; VON WERNER et al. 2004). Die Parametrisierung dieser Schichten erfolgte mit Hilfe der Daten der Reichsbodenschätzung (LfUG 2005b). Als Skinfaktoren für die unteren Schichten wurde global 0,5 angesetzt (vgl. Tabelle 5). Die Zuweisung der Modellparameter erfolgte mit der Datenbank des DPROC (VON WERNER & SCHRÖDER 2005) in ihrer überarbeiteten Form (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2010).

Die hydrodynamische Beschreibung des Oberflächenabflusses basiert auf dem Ansatz der kinematischen Welle (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2009; VON WERNER et al. 2004). Für den Simulationslauf wurden die Voreinstellungen übernommen.

Tabelle 5: Parametrisierungsannahmen der Validierungsszenarien

Modell	Eigenschaft/Parameter	Ereignis I	Ereignis II
Basismodell	Simulationsmonat	April	März
	Bearbeitungsgerät	Zinkenrotor	Zinkenrotor
	Bodenfeuchte	mittel (FK)	hoch (FK)
	Mulchgehalt	30 %	30 %
	Bodenzustand	normal	normal
	Entwicklungszustand	normal	normal
	Anpassung der Bodenfeuchte [%]	+/-0	+/-0
Abflussmodell	Interner Speicherkoeffizient [-]	1	1
	interne zeitliche Auflösung [s]	600	600
Infiltrationsmodell	Mehrschichtinfiltration	ja	ja
	Skinfaktor ab Schicht II [-]	0,5	0,5
	Übergang Regen zu Schnee [°C/K]	-	1
	Temperaturlimit Regen/Schnee [°C]	-	0,6
	Temperaturlimit für Schneeschmelze [°C]	-	-0,5
	Tagesgradfaktor ohne Windberücksichtigung [mm/(d°C)]	-	6
	Tagesgradfaktor mit Windberücksichtigung [mm/(d°C)]	-	3
Schneemodell	Speicherkapazität des Schnees für Wasser [-]	-	0,05
	Rückgefrierungskoeffizient [-]	-	1
	Skalierungsfaktor bei Korrektur der Temperatur durch Exposition	-	10

Ereignis II (Schneesmelzereignis 17.-18.03.1996)

Analog zu Ereignis I liegt dem Schneesmelzereignis die reale Landnutzung, die reale Kulturartenverteilung und die Annahme konservierender Bodenbearbeitung mit dem Zinkenrotor zugrunde (GeoSN 2005; LfL 2005b).

Die Ableitung der einzelnen Modellparameter wurde mit Hilfe der Datenbank des DPROC (VON WERNER & SCHRÖDER 2005) in ihrer überarbeiteten Form (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2010) gewährleistet. Messungen von GRÜNEWALD et al. (1996) zu Folge war das Einzugsgebiet zu Beginn der Schmelzperiode (17.03.1996) komplett mit Schnee bedeckt. Bodenfrost reichte bis in 80 cm Tiefe. Weil über das Winterhalbjahr eine Aufsättigung des Bodens stattfindet, wurden Anfangsbodenfeuchten bei Feldkapazität angenommen. Das Modell beschreibt die Infiltration auf Basis der von WEIGERT & SCHMIDT (2005) entwickelten Algorithmen. Für die Simulation des Schmelzprozesses wurde die Temperatur-Wind-Methode verwendet (WEIGERT et al. 2003). Das

Wasseräquivalent liegt den Beobachtungen zur Folge bei 43 mm (GRÜNEWALD et al. 1996). Die hydrologisch wirksamen Parameter wurden so kalibriert, dass der simulierte Abfluss näherungsweise dem gemessenen entspricht (vgl. Tabelle 5).

Langfristsimulationen

Die Parametrisierung der Langfristsimulationen erfolgte bezüglich Bodeneigenschaften, Bodenbearbeitung, Landnutzung und Kulturartenverteilung vergleichbar zu den Ereignissimulationen (vgl. Tabelle 5). Gegenüber den gemessenen Einzelereignissen treten im Referenzjahr kurze, unterschiedlich intensive Niederschlagsereignisse auf (MICHAEL et al. 1996). Es liegt die Annahme zugrunde, dass diese Niederschläge nicht ausreichen, die oberen 30 cm Boden zu sättigen. Deshalb wurden die Einzelereignisse mit dem Ein-Schicht-Infiltrationsmodell simuliert. Für die betreffende Niederschlagsregion 7 (Unteres Erzgebirge und Erzgebirgsvorland) stehen 22 Niederschlagsereignisse zur Verfügung. Treten diese statistischen Ereignisse in kurzzeitigen Abständen hintereinander auf, wie es im Mai und Juni der Fall ist, werden feuchte Anfangsbedingungen für das Folgeereignis zugrunde gelegt (vgl. Abbildung 12). Alle übrigen Ereignisse werden mit mittlerer Bodenfeuchte nach MICHAEL (1996) parametrisiert.

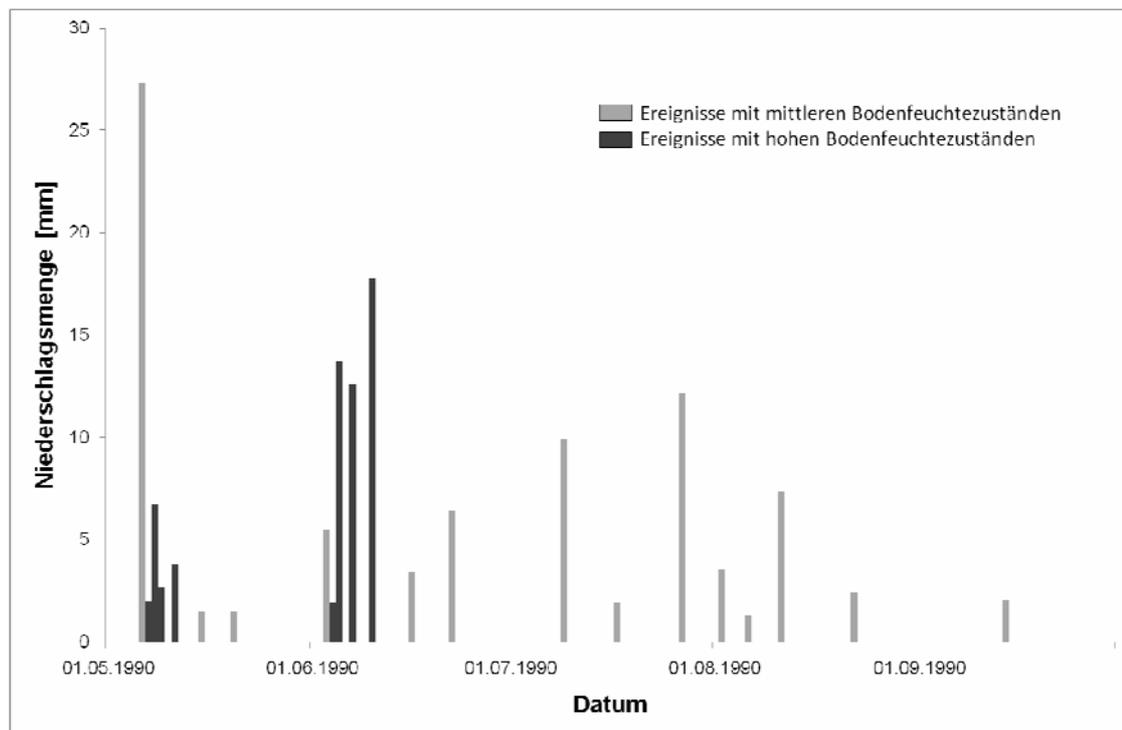


Abbildung 12: Niederschlagsmenge der Ereignisse im Referenzjahr Subregion 7

3 Ergebnisse

3.1 Regionalisierte Phosphor-Gehalte

3.1.1 Kriging-Interpolation

Zur Interpolation sachsenweiter P-Oberbodengehalte stehen 1.004 Proben des Bodenatlas Sachsen Teil 3 (LfUG 2000) zur Verfügung. Die höchsten Gehalte werden auf den Ackerstandorten der Verwitterungsböden über Festgesteinen und im Übergangsbereich zu Böden über Löss bzw. Sandlöss (z. B. nördlich von Freiberg, Erzgebirgsnordrand, Vogtland) erreicht. Diese stehen laut LfUG (2000) im Zusammenhang mit P-Düngergaben. Geogene Gehalte sind nur schwer lokalisierbar, weil es sich häufig um anthropogen-geogene Mischformen handelt. Die höchsten geogen beeinflussten Gehalte treten auf den Diabasen des Vogtlandes und südlich von Zwickau auf (LfUG 2000) und erreichen bis 4.100 mg P/kg. Die interpolierten Werte schwanken in Sachsen zwischen 348 und 2.940 mg P/kg mit einem Mittelwert von 1.011 mg P/kg (vgl. Abbildung 13).

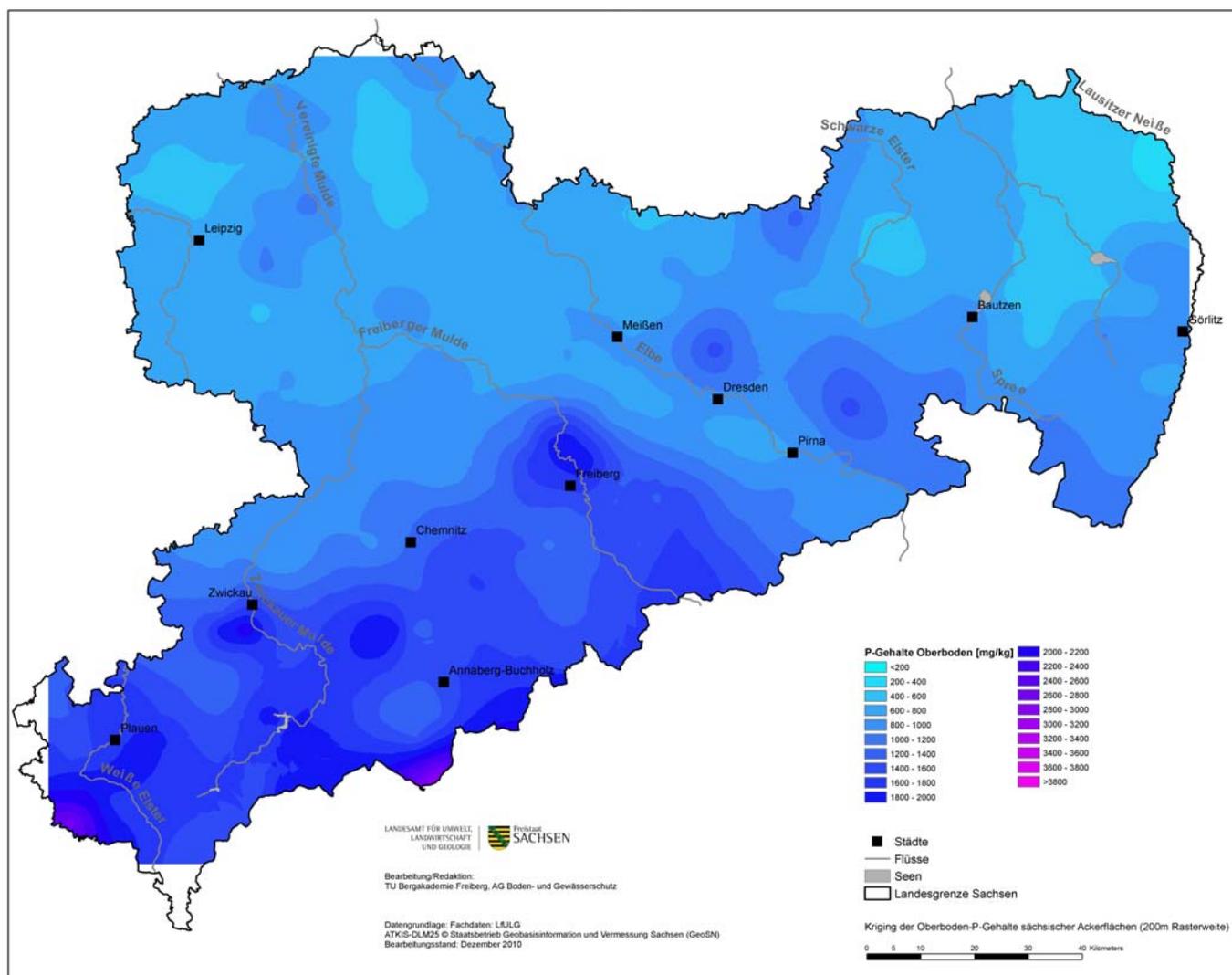


Abbildung 13: Interpolierte Oberboden-P-Gehalte sächsischer Ackerflächen

3.1.2 Validierung der BSA-Phosphor-Gehalte

Eine Validierung der verfügbaren flächendeckenden Phosphordaten erfolgte einerseits durch den Direktvergleich der Oberboden-P-Gehalte an den Originalprobepunkten des BSA3 (LfUG 2000) (Beispiel s. Abbildung 14) und andererseits bezogen auf die interpolierten Gehalte der neuen und alten Datenaufnahme in den Einzugsgebieten der Talsperren Bautzen und Saidenbach.

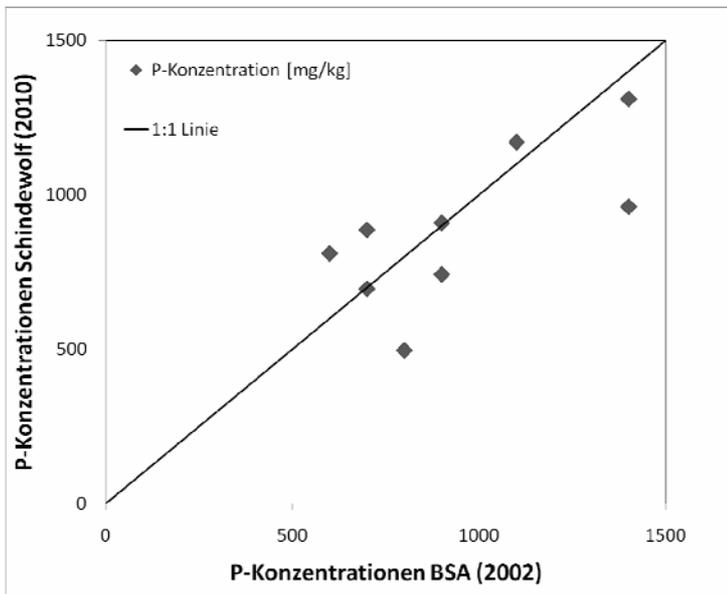


Abbildung 14: Direktvergleich der Oberboden-P-Gehalte Bodenatlas Sachsen und TU Bergakademie Freiberg im Einzugsgebiet der Talsperre Bautzen

Im Direktvergleich liegen die aktuell ermittelten Oberboden-P-Gehalte unter denen des BSA3 (LfUG 2000). Im Mittel beträgt der Unterschied 6 %. Unter Bezug auf die interpolierten Werte ist die Differenz 10 % für das Gebiet der Talsperre Bautzen und 12 % für das Gebiet der Saidenbachtalsperre. Diese Erkenntnisse decken sich mit Untersuchungsergebnissen des LfULG, wonach die Flächenanteile gut versorgter P-Standorte (Gehaltsklassen C, D und E) in den letzten zehn Jahren um ca. 10 % abgenommen haben. Diese Reduktion des Oberboden-P-Gehaltes lässt sich auf eine eingeschränkte P-Mineraldüngung innerhalb der letzten zehn Jahre zurückführen (ERNST & FÖRSTER 2009). Diese sank zwischen 1999 und 2008 um mehr als 30 % (BMELV 2009) (vgl. Abbildung 15). Neben diesem eintragsbezogenen Rückgang der Oberboden-P-Gehalte können jedoch auch Reproduzierbarkeitsfehler wie z. B. Probennahme und Laboranalytik für die geringeren Gehalte in Frage kommen.

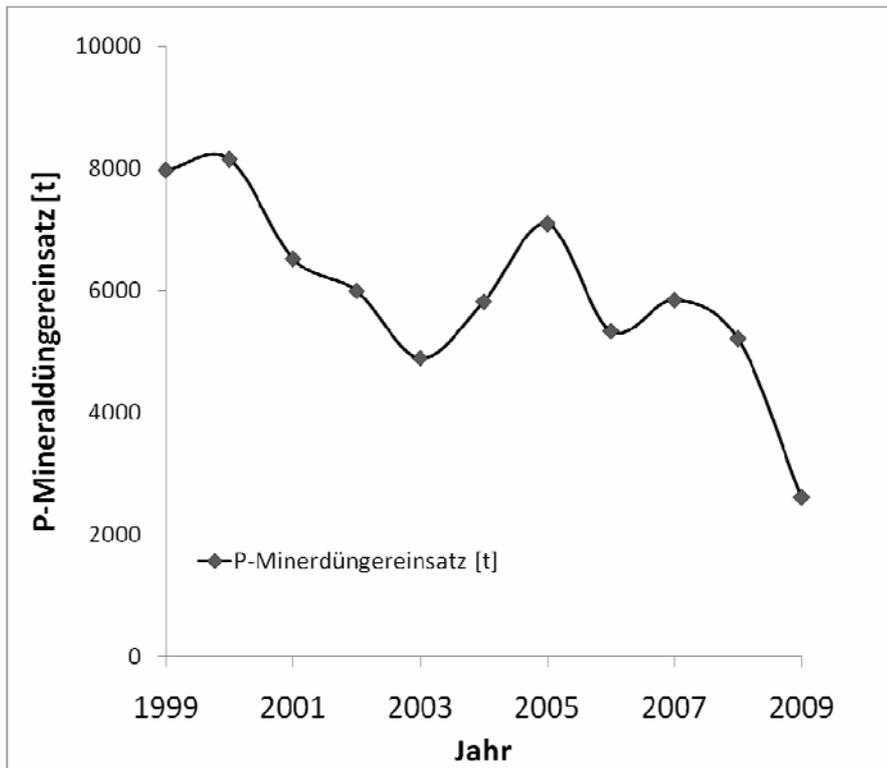


Abbildung 15: P-Mineraldüngereinsatz im Freistaat Sachsen 1999-2009 (ERNST & FÖRSTER 2009)

3.1.3 Oberboden-P-Gehalte der Oberflächenwasserkörper

Im Mittel liegen die Oberboden-P-Gehalte der OWK bei 1.070 mg/kg. Gemittelt auf die OWK werden die höchsten P-Gehalte in den Gebieten südlich von Plauen, im höheren Westerzgebirge südöstlich von Auerbach, im Bereich des Erzgebirgskamms und auf der Erzgebirgsnordabdachung zwischen Freiberg und Nossen erreicht. Der OWK mit dem höchsten Oberboden-P-Gehalt ist der Feilebach im Vogtlandkreis südwestlich von Plauen. Die geringsten Oberboden-P-Gehalte weist der OWK Lausitzer Neiße-9 im äußersten Nordosten des Landes mit 395 mg/kg auf (vgl. Abbildung 16).

Bezogen auf die Teilbearbeitungsräume zeigt sich ein ähnliches Bild. Relativ hohen Werten im Süd-Westen, Süden und Zentrum stehen geringe Werte im Norden und Nordosten gegenüber. Die Teilbearbeitungsgebiete mit den höchsten P-Werten sind der sächsische Teil der Weißen Elster/Eger mit 1.657 mg P/kg und die Freiburger Mulde mit 1.371 mg P/kg. Die Gebiete geringster P-Gehalte sind Obere Spree und Elbestrom 2 mit jeweils 691 mg P/kg (vgl. Tabelle 6).

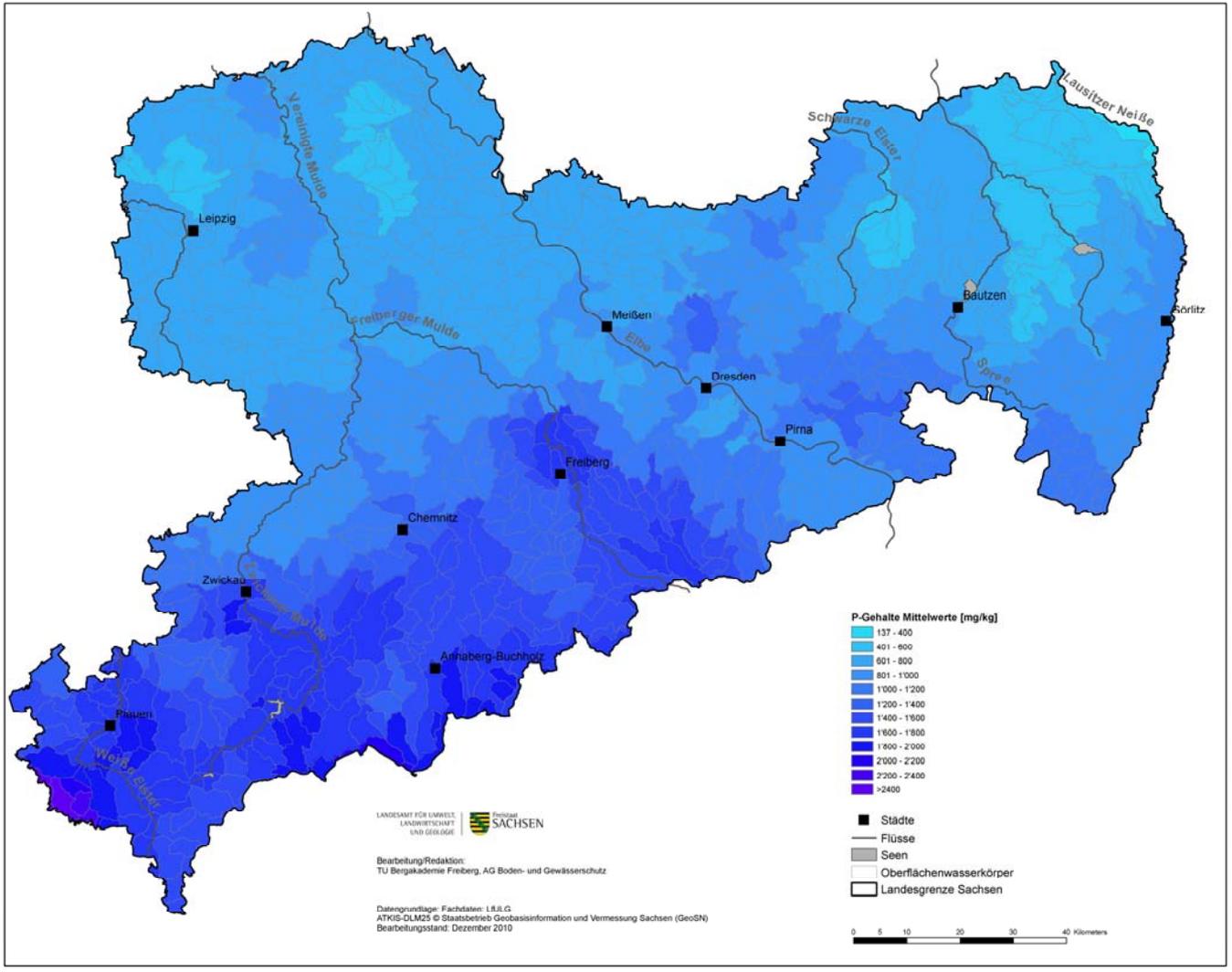


Abbildung 16: Auf OWK gemittelte Oberboden-P-Gehalte der Ackerflächen in sächsischen OWK

Tabelle 6: Oberboden-P-Gehalte auf den Ackerflächen der Teilbearbeitungsräume

Teilbearbeitungsgebiet	Mittelwert [mg/kg]	σ [mg/kg]	Min [mg/kg]	Max [mg/kg]
Sächsische Weiße Elster/Eger	1657	218	1288	2413
Freiberger Mulde	1371	302	642	1980
Zwickauer Mulde	1358	371	675	2189
Elbestrom 1	1058	212	679	1754
Schwarze Elster	803	158	507	1243
Sächsische Weiße Elster/Pleiße	793	204	544	1894
Lausitzer Neiße	773	229	392	1092
Vereinigte Mulde	721	94	544	986
Obere Spree	691	134	413	1092
Elbestrom 2	691	66	525	1112

3.2 Fraktionsabhängige Phosphorverteilung

3.2.1 Allgemeine Charakteristik

Die fraktionsabhängige P-Verteilung wird für fünf besonders erosionsanfällige Bodenarten geprüft. Diese prioritären Bodenarten wurden in den Einzugsgebieten mit Hilfe der verfügbaren Bodenkarten lokalisiert. Weil die tatsächlich vor Ort angetroffene Bodenart von den Angaben der Bodenkarten abweicht, sind die Ergebnisse der Korngrößenanalysen für die ausgewählten Proben in Abbildung 17 dargestellt. Obwohl fünf der 15 Bodenproben außerhalb der prioritären Bodenarten liegen und sandiger Schluff (Us) nicht beprobt werden konnte, wird das Spektrum erosiver Bodenarten gut abgedeckt.

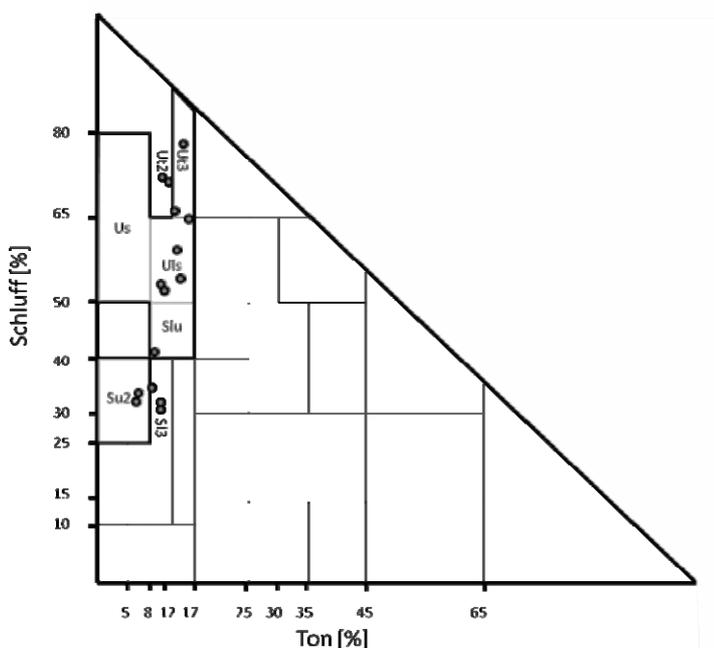


Abbildung 17: Bodenarten der Bodenproben (fetter Rand: prioritäre Bodenarten)

Die sandreicheren Substrate (Su2, Sl3, Slu) sind dabei im Saidenbachgebiet vorherrschend. Im Einzugsgebiet Bautzen dominieren schluffreiche Bodenarten (Uls, Ut2, Ut3). Die Gesamt-P-Gehalte schwanken zwischen 1.640 mg P/kg und 490 mg P/kg. Die höchsten Werte werden im Saidenbachgebiet erreicht (Ø 1.247 mg P/kg im EZG Saidenbach vs. Ø 654 mg P/kg im EZG Bautzen) (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Korngrößenanteile und Gesamt-P-Gehalt der untersuchten Böden (Sai: Saidenbach; Bau: Bautzen)

Probennummer	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]	Gesamt-P [mg/kg]
Sai_2	50	41	9	1320
Sai_9	36	54	10	1030
Sai_11	59	31	10	1070
Sai_12	58	32	10	1060
Sai_22	60	34	6	1640
Sai_27	62	32	6	1360
Bau_0	30	57	13	621
Bau_6	9	78	13	831
Bau_9	12	65	23	635
Bau_12	14	65	21	860
Bau_16	57	35	8	490
Bau_17	18	71	11	553
Bau_18	17	73	10	584
Bau_23	11	62	27	745
Bau_30	33	47	20	567

3.2.2 Partikelabhängige P-Konzentration und -Anreicherung

Phosphor tritt im Boden als Orthophosphat-Anion auf. Aufgrund seiner stark nukleophilen Eigenschaften ist eine hohe Affinität zu stark elektrophilen Kationen, wie Fe^{3+} , Al^{3+} oder Ca^{2+} gegeben, weshalb er im Boden überwiegend in gebundener Form vorliegt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Weil Phosphat meist an feinen Bodenpartikeln adsorbiert wird, findet im Ausgangsmaterial bereits eine P-Anreicherung in den feinen Korngrößenfraktionen statt. In Verbindung mit dem selektiven Transport erodierter Bodenpartikel führt das zu einer P-Anreicherung im Sediment gegenüber dem Ausgangsmaterial (WILD 1988).

Die gemessenen P-Konzentrationen in der Sandfraktion schwanken zwischen 107 und 1.330 mg P/kg, in der Schlufffraktion zwischen 170 und 1.585 mg P/kg und in der Tonfraktion zwischen 1.940 und 6.494 mg P/kg. Der Variationskoeffizient ist für die Konzentration im Schluff mit 81 % am größten und mit 39 % für Ton am geringsten (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Fraktionsabhängige P-Konzentration und entsprechende P-Anreicherungsfaktoren (Sai: Saidenbach; Bau: Bautzen)

Probennummer	P-Konzentration im Sand [mg/kg]	P-Konzentration im Schluff [mg/kg]	P-Konzentration im Ton [mg/kg]	P-Anreicherung im Sand [-]	P-Anreicherung im Schluff [-]	P-Anreicherung im Ton [-]
Sai_2	479	6058	4500	0,37	0,45	3,41
Sai_9	725	899	3260	0,70	0,87	3,17
Sai_11	370	913	3890	0,35	0,85	3,64
Sai_12	236	692	3610	0,22	0,65	3,41
Sai_22	565	1560	6820	0,34	0,95	4,16
Sai_27	471	1580	5090	0,35	1,16	3,74
Bau_0	351	200	2650	0,57	0,32	4,27
Bau_6	756	274	3680	0,91	0,33	4,43
Bau_9	1330	210	2410	2,1	0,33	3,80
Bau_12	964	296	3460	1,1	0,34	4,02
Bau_16	107	276	2630	0,2	0,56	5,37
Bau_17	564	176	2170	1,0	0,32	3,92
Bau_18	626	231	2300	1,1	0,40	3,94
Bau_23	477	182	2910	0,6	0,24	3,91
Bau_30	394	265	2390	0,7	0,47	4,22

Wie aus Abbildung 18 ersichtlich, unterscheiden sich die Anreicherungen in den Kornfraktionen quantitativ und qualitativ. Wie erwartet, ist P in der Tonfraktion angereichert ($\bar{\varnothing}$ 3,96). Die Anreicherungsfaktoren (PAF) weisen zudem die geringsten relativen Schwankungen auf (13 %). Die Anreicherungsfaktoren in der Schlufffraktion (PAF_{Schluff}) liegen im Mittel bei 0,55, die in der Sandfraktion (PAF_{Sand}) bei 0,66 (vgl. Tabelle 22 in der Anlage). Auffällig ist darüber hinaus die Ausprägung der Anreicherungsfaktoren in Abhängigkeit vom Untersuchungsgebiet. In der Tonfraktion beider Gebiete streuen die Anreicherungsfaktoren relativ gering (3,6 vs. 4,2). Das Verhältnis zwischen PAF_{Schluff} und PAF_{Sand} kehrt sich zwischen den Gebieten um. Im Saidenbachgebiet sind die PAF_{Schluff} durchweg höher als die in der Sandfraktion und betragen im Mittel 0,8 gegenüber 0,4. Im Gebiet der Talsperre Bautzen sind nur zwei PAF_{Schluff} höher als die der Sandfraktion und erreichen im Mittel nur 0,4 gegenüber 0,8 (siehe Abbildung 18).

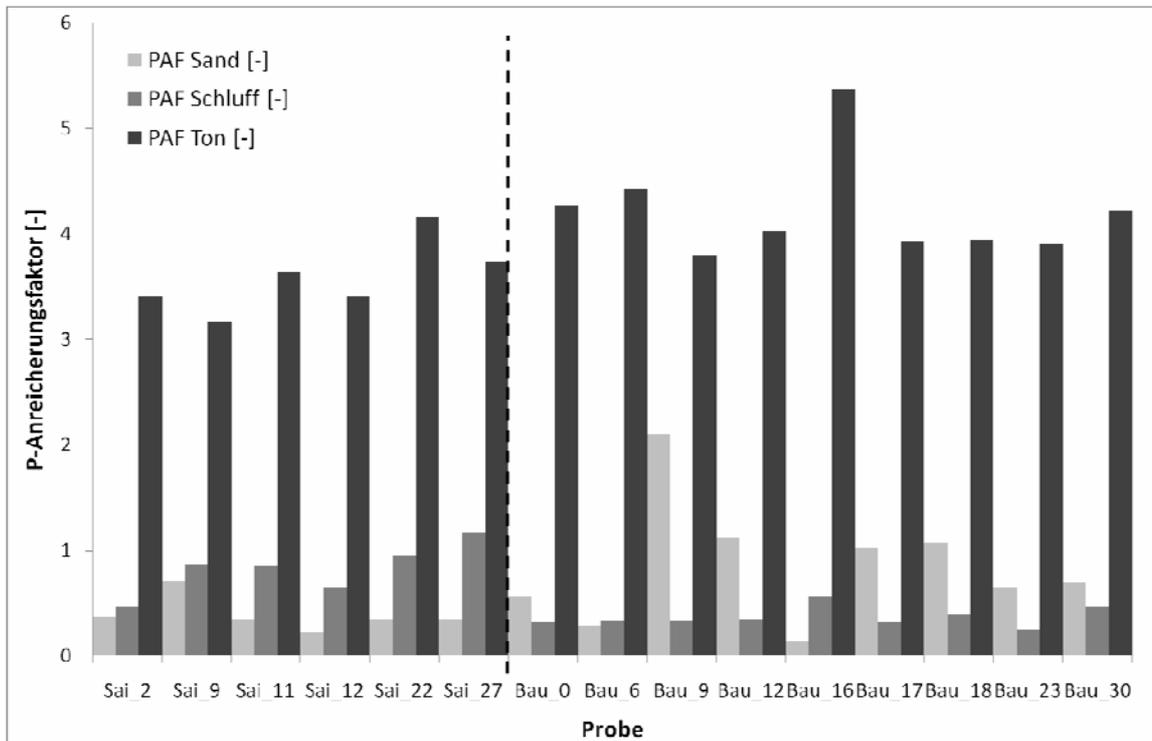


Abbildung 18: Grobfraktionsabhängige P-Anreicherungs-faktoren der untersuchten Bodenproben

Ableitung regionaler Anreicherungs-faktoren

Wie bereits dargestellt, schwanken die Anreicherungs-faktoren für die Tonfraktion nur geringfügig. Darüber hinaus sind sie nicht vom Gesamt-P-Gehalt abhängig (vgl. Abbildung 19), weshalb für die Berechnung der P-Einträge in Oberflächengewässer der PAF-Mittelwert von 3,96 angenommen wird.

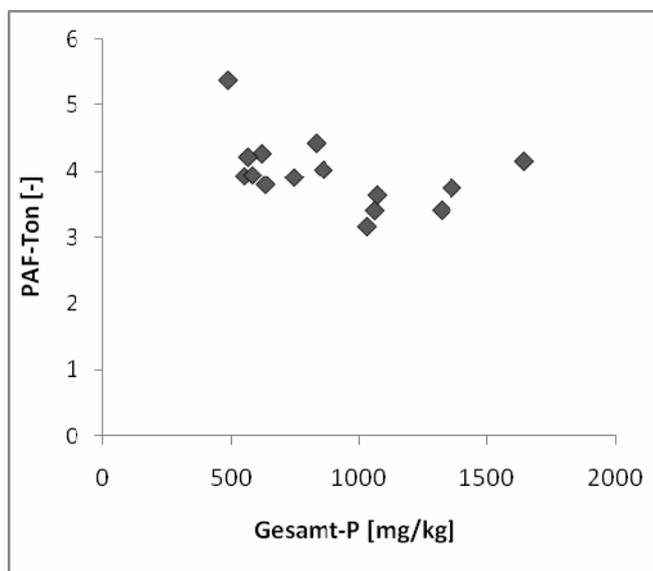


Abbildung 19: Zusammenhang zwischen P-Anreicherung im Ton und Tonanteil

Für die P-An- bzw. Abreicherung in der Schlufffraktion kann ein signifikanter Zusammenhang ($p=0,0023$) zum Gesamt-P-Gehalt hergestellt werden (vgl. Abbildung 20).

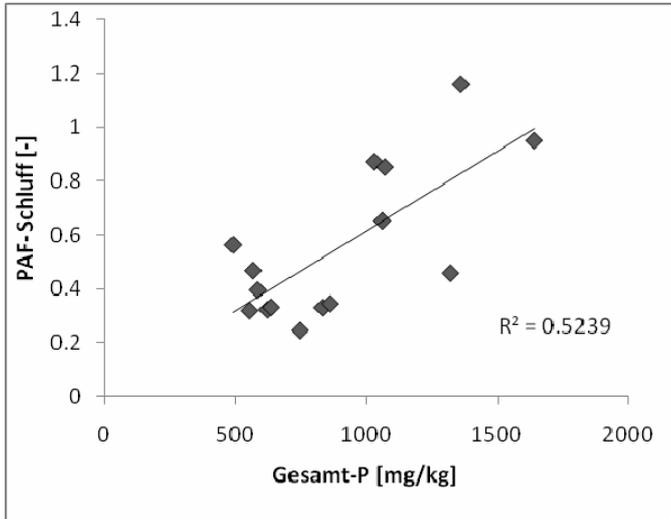


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen P-Anreicherung im Schluff und Gesamt-P-Anteil

Zwar schwanken die P-An- bzw. Abreicherungs-faktoren in der Sandfraktion beträchtlich, jedoch kann basierend auf den untersuchten Proben kein signifikanter Zusammenhang zum Gesamt-P-Gehalt hergestellt werden, weshalb der Mittelwert 0,66 verwendet wurde (vgl. Abbildung 40 in der Anlage). Demzufolge sind die zu erwartenden Abweichungen in der Sandfraktion am größten. Allerdings sind diese Abweichungen bezogen auf das P-Emissionspotenzial sächsischer Böden relativ unbedeutend, da basierend auf den Untersuchungen anteilig nur 19 % des gesamten Oberboden-Phosphors auf sächsischen Ackerlandstandorten in der Sandfraktion vorliegt. Unter den Annahmen des WWC-Szenarios (vgl. Kapitel 2.4.1) gelangen darüber hinaus nur 3 % des gesamten partikulären P-Eintrages durch Sandeinträge in sächsische Oberflächenwasserkörper (vgl. Abbildung 21) .

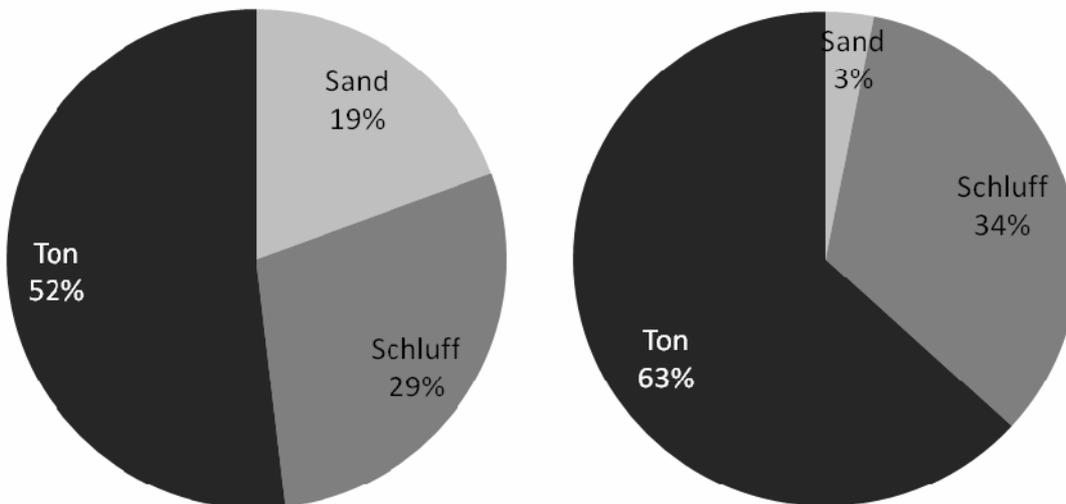


Abbildung 21: Anteil des Oberboden-P auf Ackerstandorten (links) und Anteil des ausgetragenen Phosphors an den Kornfraktionen in Sachsen auf Basis des Worst-Worst-Case-Szenarios (rechts)

3.3 Bodenabtragssimulation

3.3.1 Sedimentlieferflächen

Worst-Worst-Case-Szenario

Die Ergebnisse des Worst-Worst-Case-Szenarios bilden die Boden-, Relief- und Flächennutzungsverhältnisse im Freistaat Sachsen ab. Die Erosionsgefährdung nimmt zunächst von Nord nach Süd zu und erreicht in den Lösshügelländern ihren Höhepunkt, um in südlicher Richtung wieder abzusinken (vgl. Abbildung 22).

Fast die Hälfte der Landesfläche (45 %) ist direkt oder indirekt durch Bodenerosion gefährdet. Davon entfallen 34 % auf On-Site-Schäden durch Erosion und 10 % auf Off-Site-Schäden durch Deposition (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Statistische Auswertung des Worst-Worst-Case-Szenarios

	Fläche [km ²]	Anteil an Landesfläche [%]	Mittelwert [t/(ha*Ereignis)]	σ
Erosion	6336	34	-99	43
Deposition	1828	10	79	31

Die errechneten Bodenabträge sind in Bezug auf die Szenarienvorgaben plausibel. Die räumliche Verteilung der Bodenabträge ist stark von der Bodenartenverbreitung abhängig und erreicht für das Untersuchungsgebiet Beträge, die mit den Ergebnissen anderer Autoren vergleichbar sind (SCHOB et al. 2006; SEIDEL 2008). Basierend auf Messungen bzw. Simulationen mit empirischen Ansätzen (HALBFAß et al. 2009) sind die mit EROSION 3D ermittelten Bodenabträge vergleichsweise hoch. Geht man jedoch davon aus, dass den Szenarien flächendeckend die schlechtestmöglichen Bedingungen zugrunde liegen, können Bodenabträge in dieser Größenordnung auftreten, wie es u. a. durch MONTANARELLA (2010) bestätigt wird.

Tabelle 10: Mittlerer Bodenabtrag der Bodenregionen für das WWC-Szenario (geordnet nach Mittelwert)

Bodenregion	Gesamtfläche [km ²]	Gefährdeter Flächenanteil [%]	Mittelwert Bodenabtrag [t/ha*Ereignis]	σ
Bautzener Lösshügelland	448	56	-182	63,0
Mittelsächsisches Lösshügelland	750	63	-169	64,5
Oberlausitzer Bergland	352	28	-155	50,2
Oberlausitzer Lösshügelland	688	47	-152	50,5
Westlausitzer Lösshügelland	635	42	-146	51,2
Mulde-Lösshügelland	1217	54	-146	57,4
Zeitz-Altenburger Lösshügelland	200	62	-144	54,8
Elbsandsteingebirge	297	13	-125	39,7
Nordwestsächsisches Lösshügel- und Vulkanitkuppenland	605	49	-107	50,3
Oberlausitzer Tieflandrand	358	35	-95	42,4
Östlicher Erzgebirgsnordrand	537	43	-93	37,5
Erzgebirgsnordabdachung	1878	34	-86	27,8
Vorerzgebirgisches Becken	773	43	-82	37,7
Hallesches Lössstiefland	144	65	-81	42,2
Nordsächsisches Lössstief- und Plattenland	571	60	-76	31,7
Östliches Fichtelgebirge	39	21	-74	28,1
Leipziger Lössstiefland	956	50	-67	31,8
Großenhainer Lössstiefland	324	57	-67	31,8
Westlicher Erzgebirgsnordrand	587	36	-65	23,0
Ronneburger Lösshügelland	12	46	-65	20,6
Bornaer Lössstiefland	318	35	-64	30,3
Weißenfelser Lössstiefland	35	63	-62	35,2
Tal der Vereinigten Mulde	200	25	-57	39,8
Thüringer Schiefergebirge	45	30	-57	14,9
Elster-Luppe-Auen	354	7	-52	41,3
Dresdener Elbtalweitung	235	17	-50	37,8
Riesa-Torgauer Elbtal	294	37	-50	31,8
Erzgebirgskamm und obere Lagen	454	8	-44	16,3
Grossenhainer Rödertal	81	12	-41	23,0
Vogtländisches Kuppenland	480	31	-39	16,5

Bodenregion	Gesamtfläche [km ²]	Gefährdeter Flächenanteil [%]	Mittelwert Bodenabtrag [t/ha*Ereignis]	σ
Mehlteuer Hochfläche	123	37	-35	14,9
Elstergebirge	126	61	-34	10,5
Höheres Westerzgebirge	590	13	-29	14,4
Nieskyer Platten	254	15	-27	14,1
Westlausitzer Heide- und Kuppenland	766	67	-22	18
Rothenburger Neißetal und Muskauer Durchbruch	112	25	-22	19,9
Zittauer Gebirge	33	2	-20	8,5
Oberlausitzer Heide- und Teichlandschaft	649	7	-19	16,3
Elsterwerda-Herzberger Elsterniederung	249	19	-18	15,7
Düben-Dahleener Heide	589	23	-14	10,6
Niederlausitzer Grenzwall	174	4	-9	7,1
Senftenberger Heide- und Seengebiet	209	3	-5	4,1
Muskauer Heide	460	1	-2	3,1

Die durch Erosion gefährdeten Feldblöcke sind in erster Linie Ackerlandfeldblöcke. Diese konzentrieren sich vor allem auf die Lösshügelländer (vgl. Abbildung 23). Die Bodenregionen mit dem größten Vorkommen stark gefährdeter Feldblöcke sind das Mulde-, das Zeit-Altenburger-, Westlausitzer-, Bautzener- und Oberlausitzer Lösshügelland sowie das Oberlausitzer Bergland, das Elbsandsteingebirge, die Dresdener Elbtalweitung und das Vorerzgebirgische Becken (vgl. Tabelle 10). Durch Deposition gefährdete Flächen sind vor allem Grünlandfeldblöcke, Teiche, Gewässerrandstreifen und forstwirtschaftlich genutzte Feldblöcke. Diese befinden sich vor allem in den Tiefenlinien unterhalb von Ackerlandfeldblöcken. Geordnet nach der Erosionsgefährdung der anteiligen Ackerfläche der jeweiligen Bodenregion ergibt sich folgende Situation für Sachsen (vgl. Tabelle 11 sowie Abbildung 23 und Abbildung 24):

Tabelle 11: Bodenabtrag in den sächsischen Teilbearbeitungsräumen für das Worst-Worst-Case-Szenario

Teilbearbeitungsräume	Fläche [km ²]	Gefährdeter Flächenanteil [km ²]	Mittelwert Bodenabtrag [t/(ha*Ereignis)]
Elbestrom 2	1659	813	-97
Sächsische Weiße Elster/Pleiße	1793	843	-81
Vereinigte Mulde	1308	576	-65
Freiberger Mulde	2673	1069	-111
Zwickauer Mulde	2276	797	-99
Elbestrom 1	2354	753	-122
Lausitzer Neiße	845	254	-133
Sächsische Weiße Elster/Eger	1292	362	-39
Schwarze Elster	2226	601	-76
Obere Spree	2046	512	-118

Best-Worst-Case-Szenario

Im Best-Worst-Case-Szenario werden nur noch 8 % des Bodenverlustes des Worst-Worst-Case-Szenarios erreicht. Der Flächenanteil der von Umlagerungsprozessen betroffenen Fläche beträgt 95 % des WWC-Szenarios (vgl. Tabelle 12). Die räumliche Verteilung der Bodenerosion ändert sich nicht. Lediglich der Anteil der am Austrag beteiligten Flächen schwankt geringfügig, weil Methoden der konservierenden Bodenbearbeitung, abhängig von der Bodenart, unterschiedliches Erosionsminderungspotenzial haben (vgl. Tabelle 13 bzw. Abbildung 27 bis Abbildung 31).

Tabelle 12: Statistische Auswertung des Best-Worst-Case-Szenarios

	Fläche [km ²]	Anteil an der Landesfläche [%]	Mittelwert [t/(ha*Ereignis)]	σ
Erosion	6167	34	-0,7	3
Deposition	1446	8	0,6	3

Tabelle 13: Bodenabtrag in den sächsischen Teilbearbeitungsräumen für das Best-Worst-Case-Szenario

Teilbearbeitungsräume	Fläche [km ²]	Gefährdeter Flächenanteil [%]	Mittelwert Bodenabtrag [t/(ha*Ereignis)]
Sächsische Weiße Elster/Pleiße	1793	47	-6
Elbestrom 2	1659	46	-7
Freiberger Mulde	2673	45	-7
Vereinigte Mulde	1308	41	-5
Elbestrom 1	2354	38	-7
Zwickauer Mulde	2276	38	-7
Lausitzer Neiße	845	31	-9
Weißer Elster/Eger	1292	29	-3
Schwarze Elster	2226	25	-5
Obere Spree	2046	25	-8

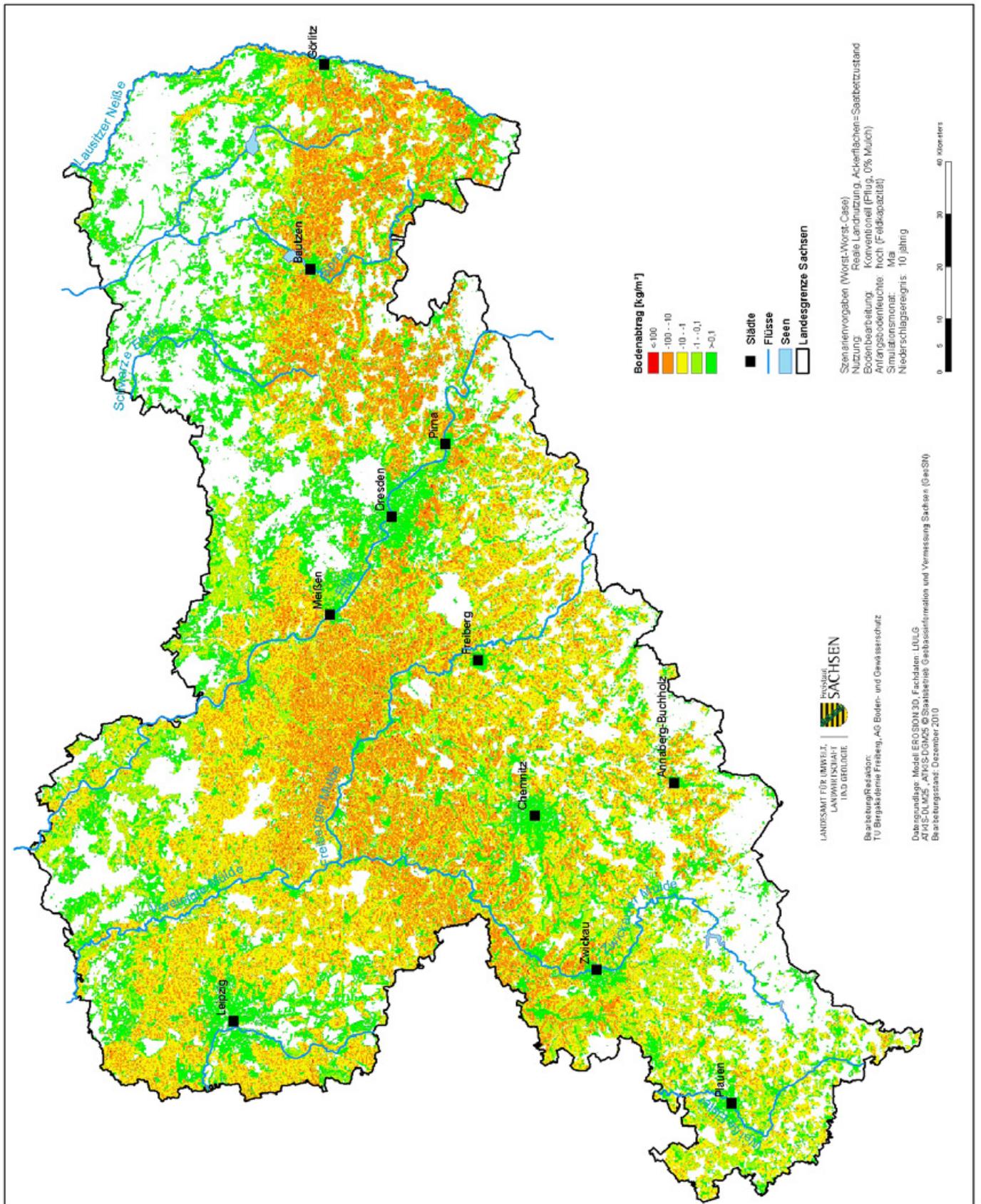


Abbildung 22: Bodenabträge in Sachsen für das Worst-Worst-Case-Szenario

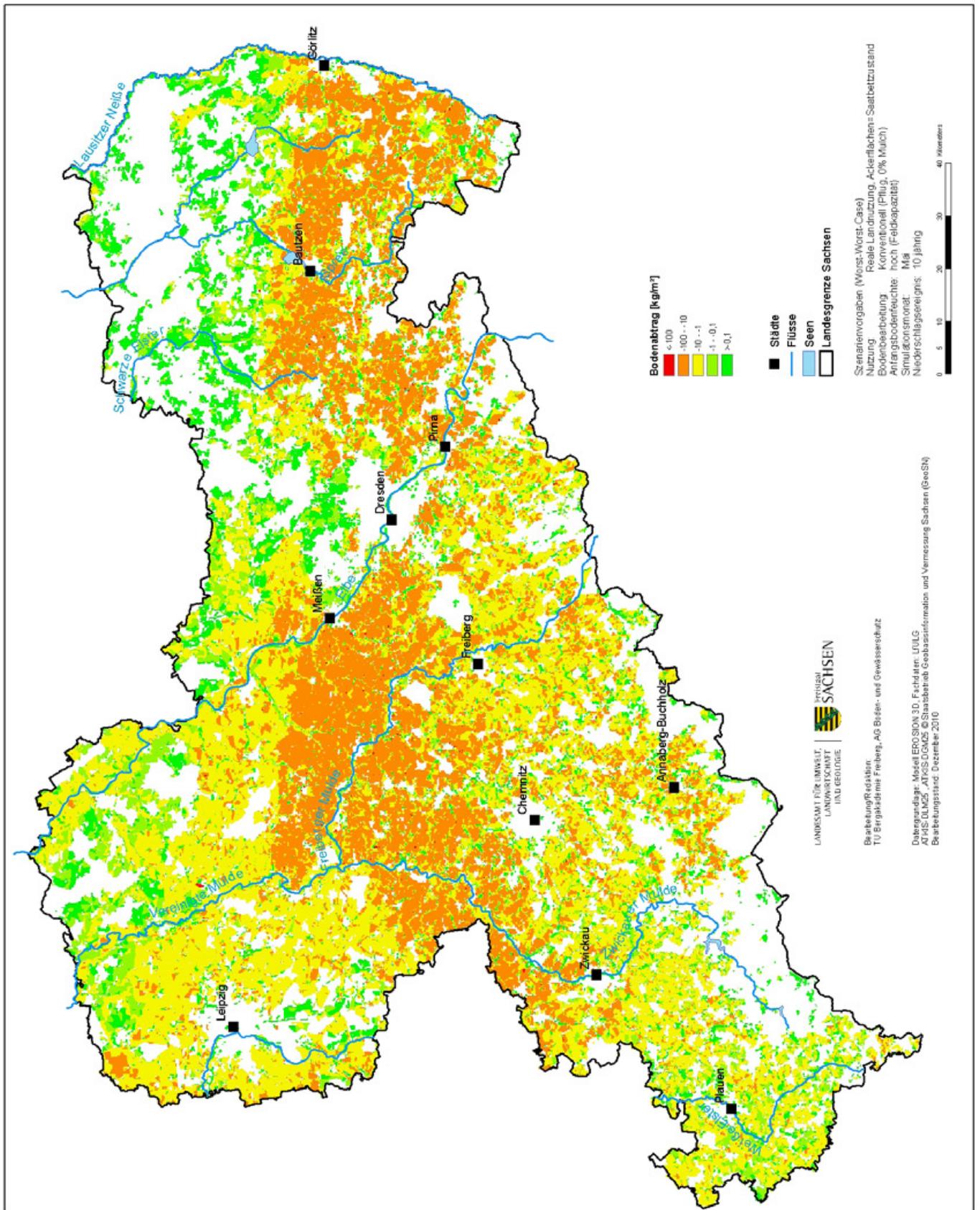


Abbildung 23: Über Feldblöcke gemittelte Bodenabträge in Sachsen für das Worst-Worst-Case-Szenario

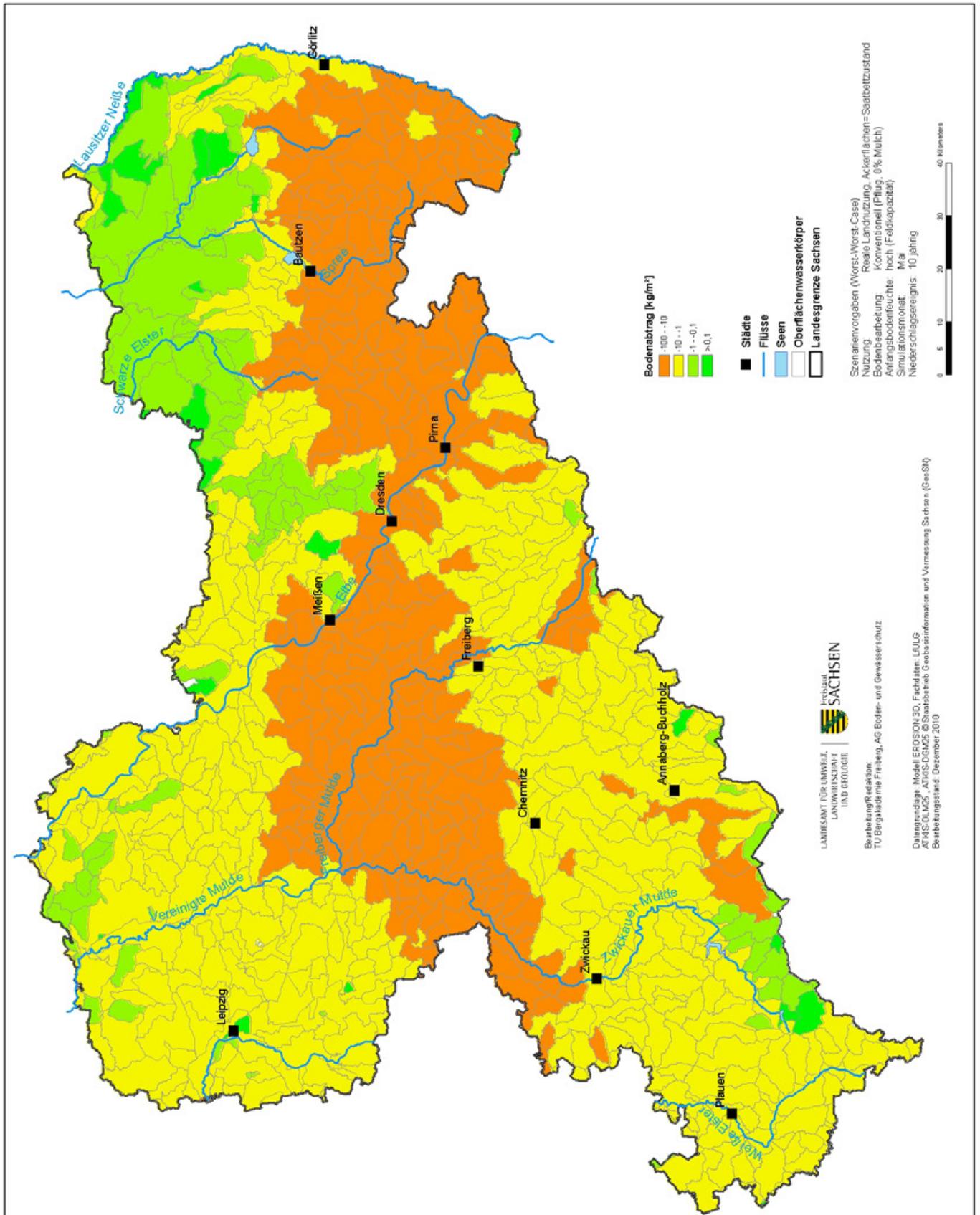


Abbildung 24: Über OWK gemittelte Bodenabträge in Sachsen für das Worst-Worst-Case-Szenario

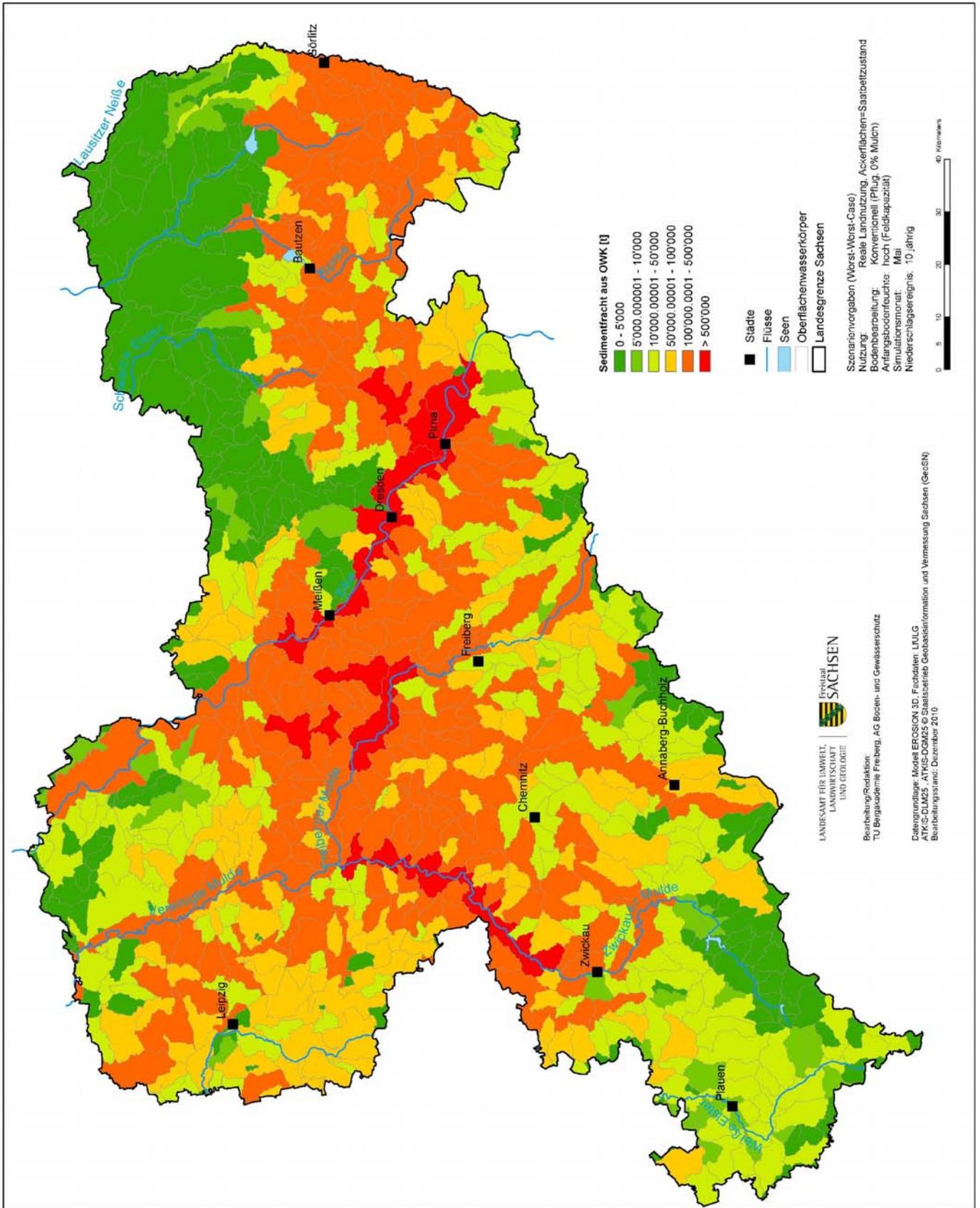


Abbildung 25: Sedimentfracht aus OWK in Sachsen für das Worst-Worst-Case-Szenario

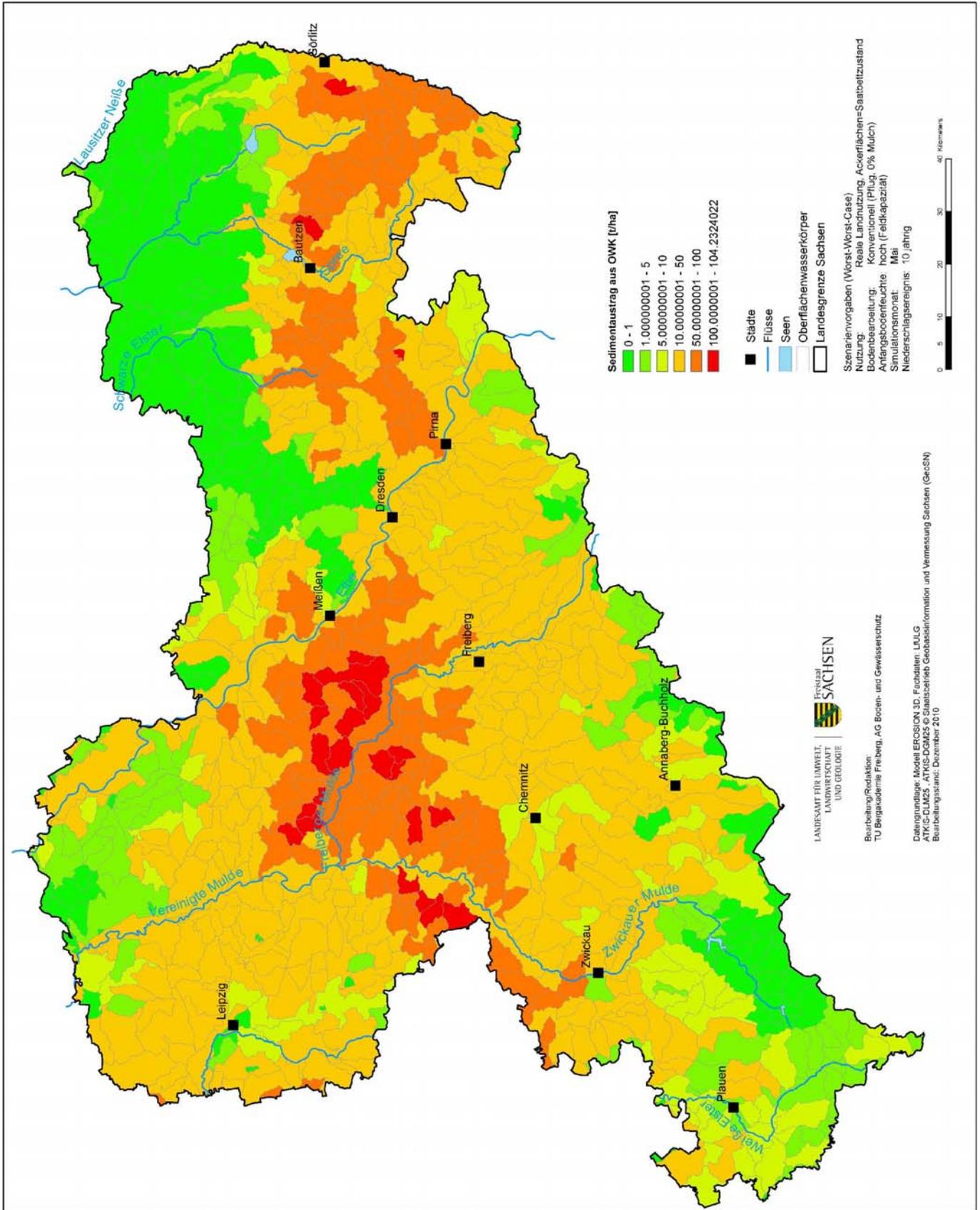


Abbildung 26: Sedimentaustrag aus OWK in Sachsen für das Worst-Worst-Case-Szenario

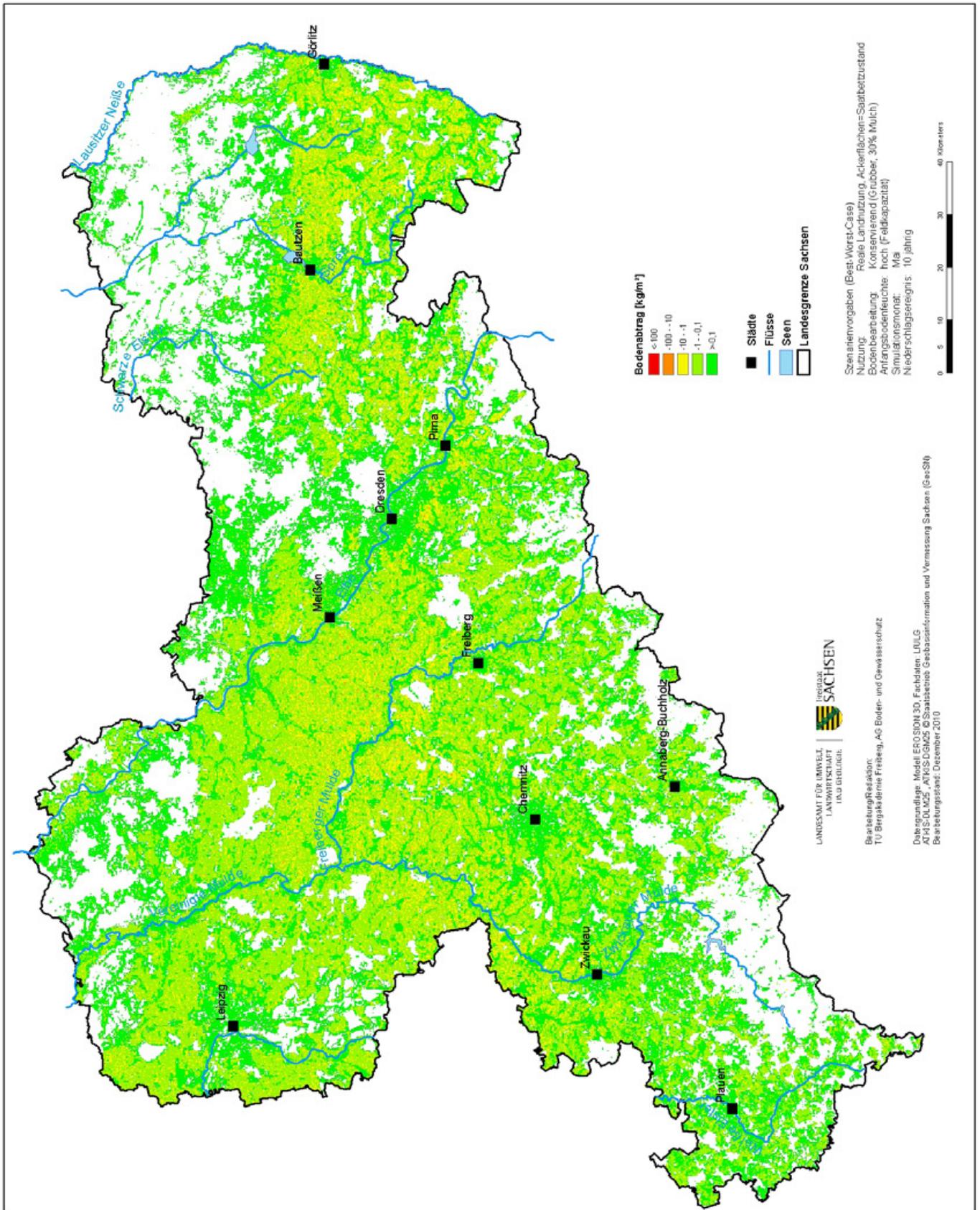


Abbildung 27: Bodenabträge in Sachsen für das Best-Worst-Case-Szenario

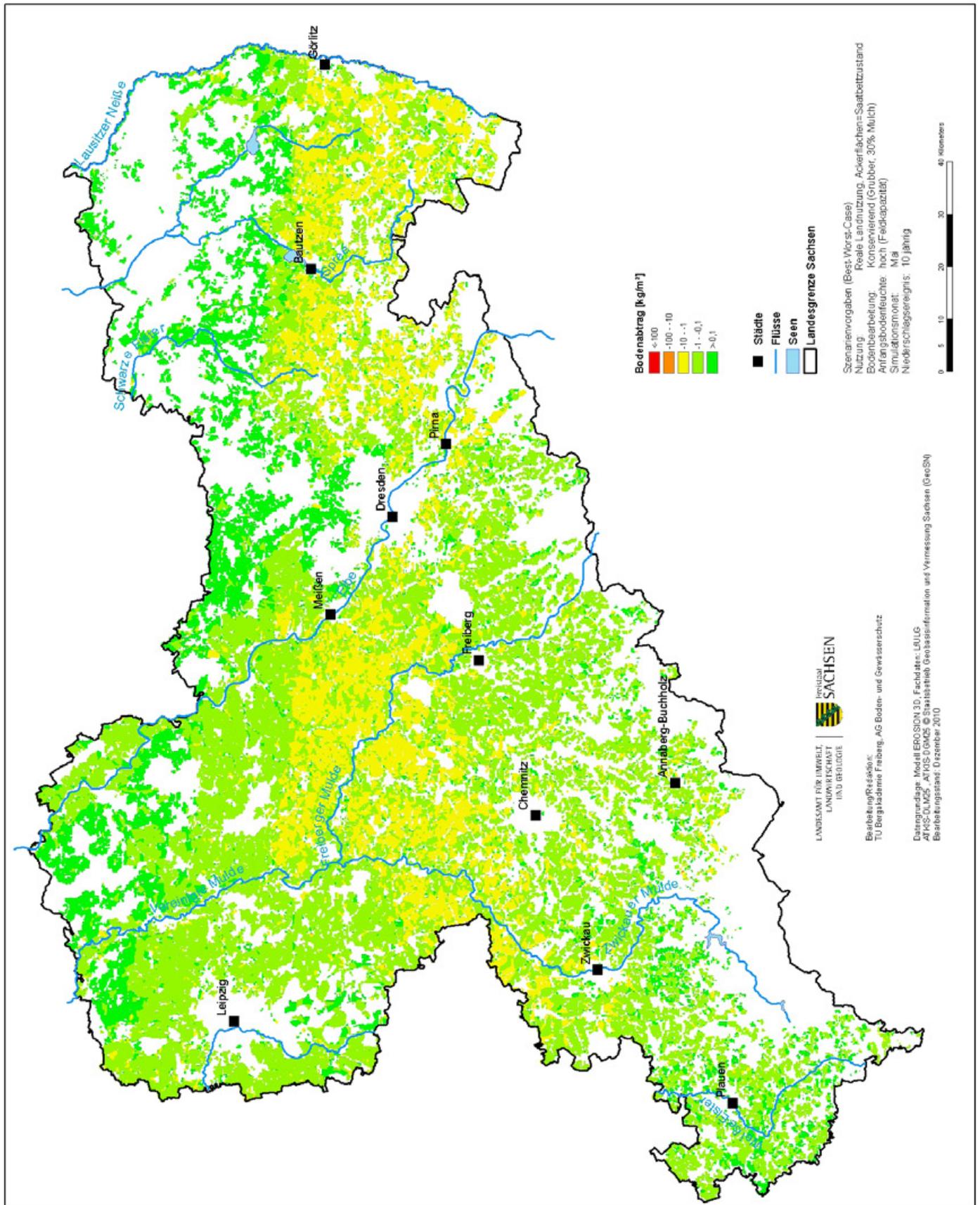


Abbildung 28: Über Feldblöcke gemittelte Bodenabträge in Sachsen für das Best-Worst-Case-Szenario

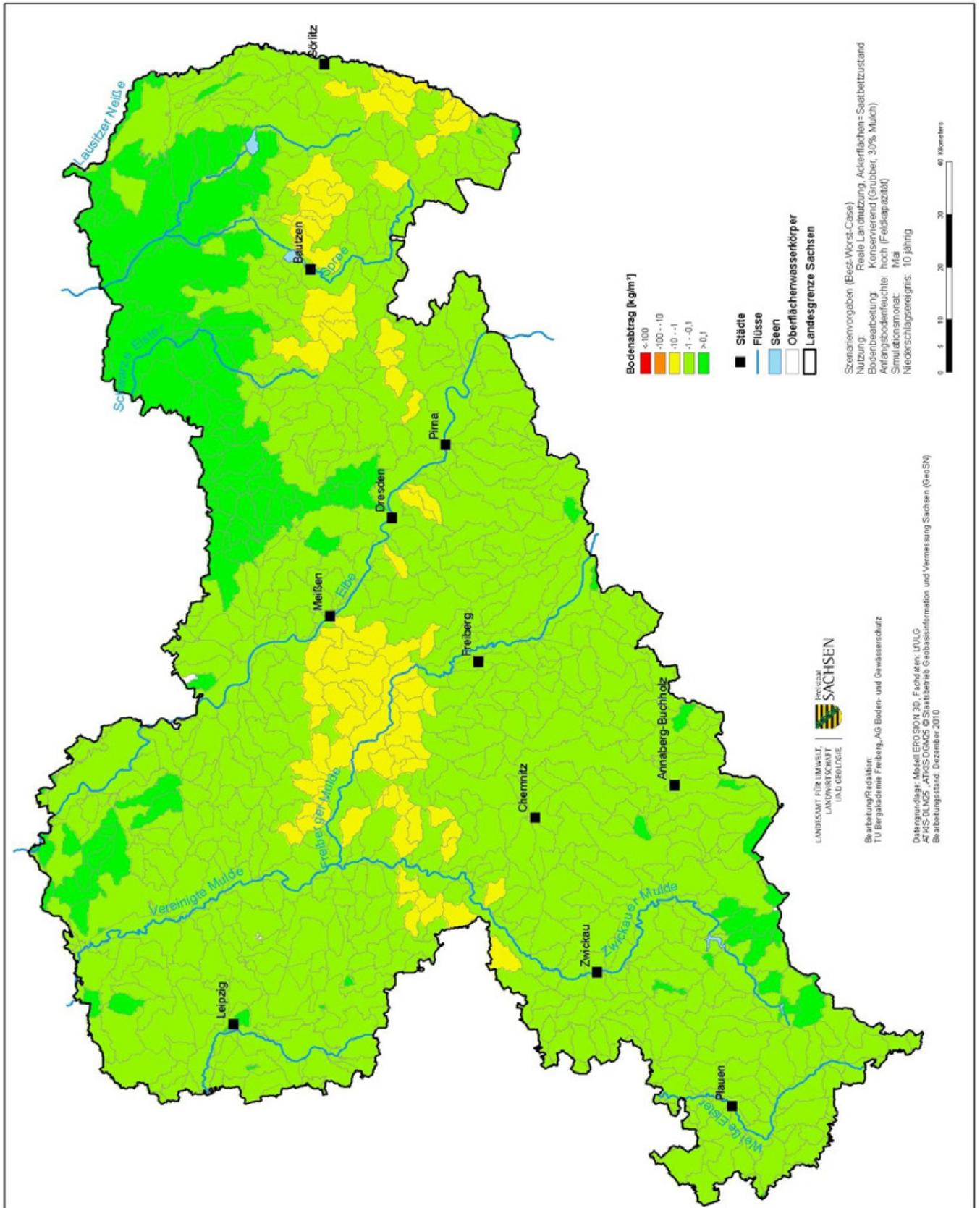


Abbildung 29: Über OWK gemittelte Bodenabträge in Sachsen für das Best-Worst-Case-Szenario

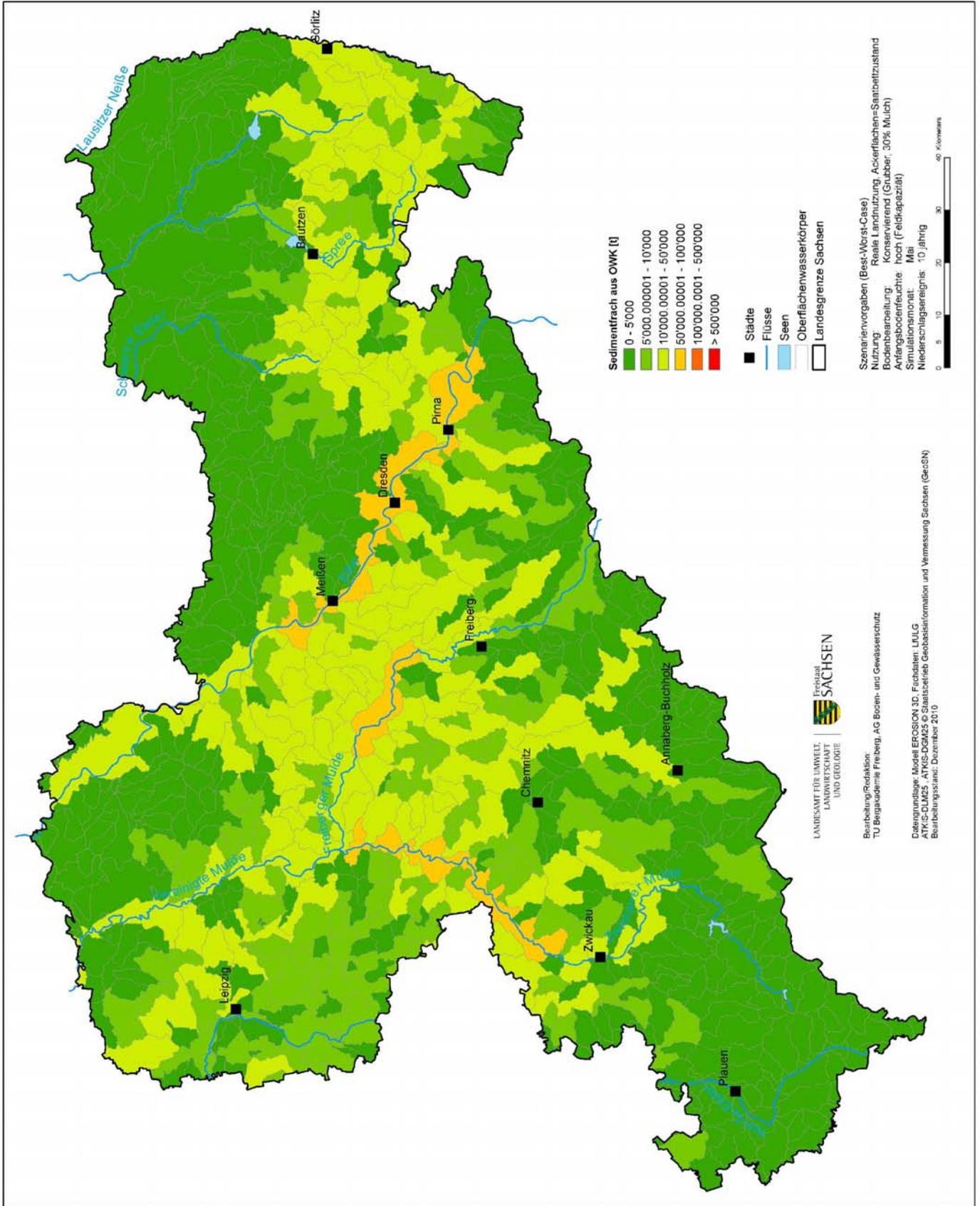


Abbildung 30: Sedimentfracht aus OWK in Sachsen für das Best-Worst-Case-Szenario

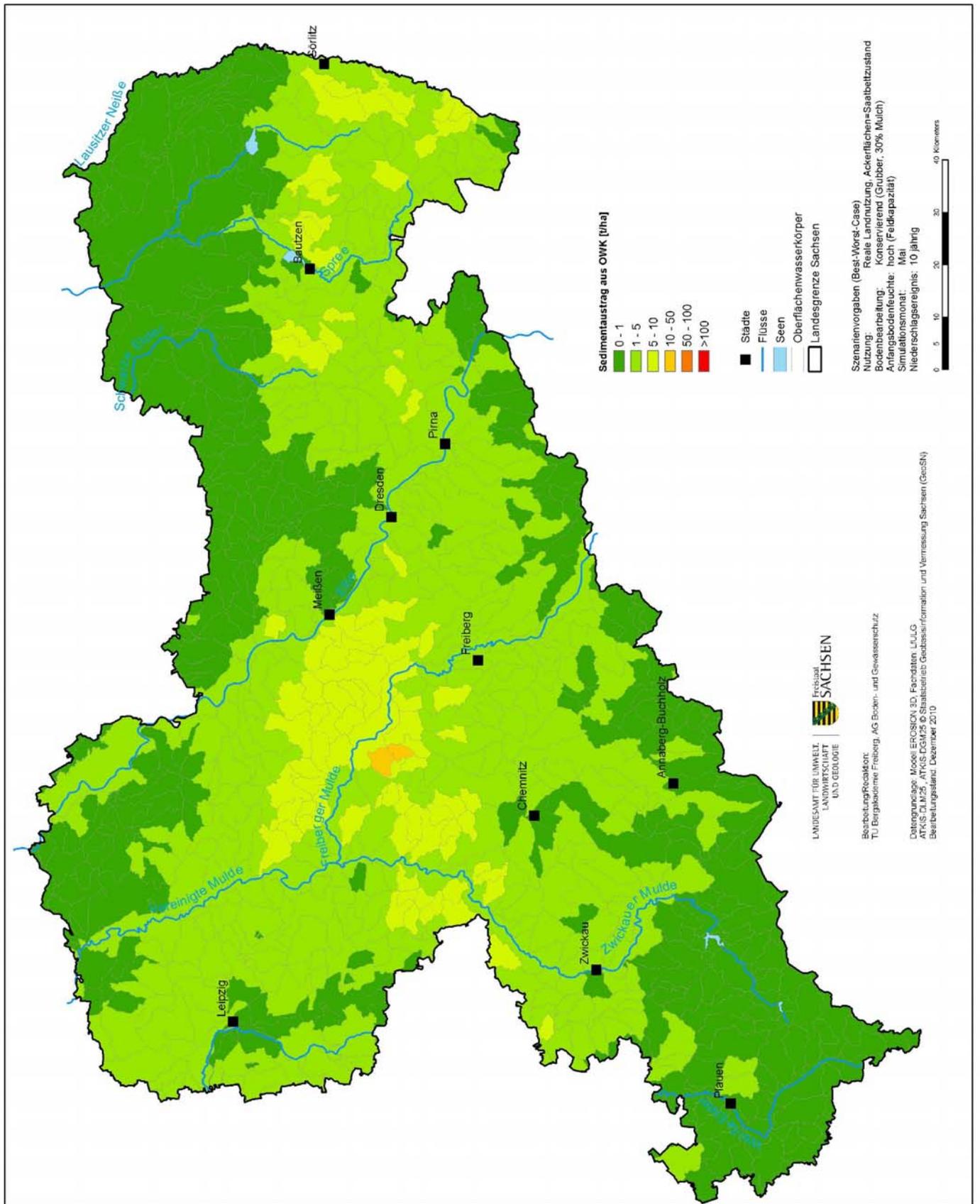


Abbildung 31: Sedimentaustrag aus OWK in Sachsen für das Best-Worst-Case-Szenario

3.3.2 Gefährdete Oberflächenwasserkörper

Worst-Worst-Case-Szenario

Die ausgetragenen Sedimentmengen sind stark von der jeweiligen OWK-Größe abhängig. Aus diesem Grund weisen die großen OWK im Mittellauf von Elbe, Freiburger Mulde und Zwickauer Mulde die höchsten Sedimentfrachten auf, die >500.000 t betragen können (vgl. Abbildung 25). Die Analyse der Sedimentspende gibt trotz regional unterschiedlicher Depositionsprozesse die Bodenabtragssituation in Sachsen wieder (vgl. Abbildung 26).

In Abbildung 33 ist das Sedimenteintragsverhältnis (SDR) für die sächsischen OWK abgebildet. Es zeichnet sich eine deutliche Abhängigkeit zwischen dem Gesamtabtrag und dem SDR in den einzelnen OWK ab. Für das WWC-Szenario gelangen in den stark erosionsgefährdeten OWK bis zu 75 % des gesamten erodierten Materials bis in die Oberflächengewässer. In den weniger erosionsanfälligen Gebieten sind es unter 25 %. Das bedeutet wiederum, dass sich die Stoffaustragsproblematik in den Gebieten hoher Bodenverluste erhöht. Die gebietsspezifischen mittleren Sedimentspenden liegen für das WWC-Szenario bei 26 t/(ha*Ereignis) mit Maximalwerten von über 130 t/(ha*Ereignis) (s. Tabelle 14).

Tabelle 14: Statistische Auswertung der Sediment- und Phosphorausträge aus sächsischen OWK (WWC: Worst-Worst-Case-Szenario; BWC: Best-Worst-Case-Szenario)

Szenario	Max Sedimentaustrag [t/(ha*Ereignis)]	Mittelwert Sedimentaustrag [t/(ha*Ereignis)]	σ Sedimentaustrag	Max Phosphoraustrag [kg/(ha*Ereignis)]	Mittelwert Phosphoraustrag [kg/(ha*Ereignis)]	σ Phosphoraustrag
WWC	134	26	27	175	28	28
BWC	11	2	2	14	2	2

Die Hotspots der Phosphorausträge orientieren sich in erster Linie an der räumlichen Verteilung der Bodenabträge. Besonders gefährdet sind die OWK in den Lösshügelländern bzw. im Vorerzgebirgischen Becken mit P-Austrägen von bis zu 175 kg P/(ha*Ereignis) (vgl. Tabelle 14 und Abbildung 34). Neben dieser groben regionalen Klassifizierung treten auch in weniger erosionsgefährdeten Gebieten Hotspots auf. Dabei handelt es sich vor allem um Gebiete mit hohen Oberboden-P-Gehalten und einem hohen Sedimenteintragsverhältnis. Im Umkehrschluss können P-Austräge in Gebieten mit hohen bzw. mittleren Oberboden-P-Gehalten und hohen Bodenabträgen, aber ebenfalls hohen Depositionsraten, gering oder mittel ausfallen.

Für die Teilbearbeitungsräume ergibt sich folgendes Bild (vgl. Tabelle 15 und Abbildung 34): Der Raum Freiburger Mulde ist aufgrund des hohen Entwässerungsanteils aus dem Mulde- und Mittelsächsischen Lösshügelland besonders gefährdet. Darüber hinaus haben OWK im östlichen Erzgebirgsnordrand im Raum Freiberg einen erheblichen Anteil am Gesamtaustrag in diesen Teilbearbeitungsraum. An zweiter Stelle der P-Austragsgefährdung steht der Teilbearbeitungsraum Lausitzer Neiße mit allgemein hohen Bodenabträgen. Daran schließen sich Elbestrom 1 und 2, Zwickauer Mulde bzw. Sächsische Weiße Elster/Eger mit einem erheblichen Anteil erosionsanfälliger Böden an. Obere Spree und Schwarze Elster erhalten nur noch aus ihrem Oberlaufgebiet nennenswerte P-Austräge. Die Einzugsgebiete von Vereinigter Mulde und Sächsischer Weißer Elster/Pleiße sind gering gefährdet, weil sie sowohl durch geringe Oberboden-P-Gehalte als auch durch geringe Sedimentausträge charakterisiert sind.

Tabelle 15: Phosphor-Austrag aus sächsischen OWK für das WWC-Szenario (geordnet nach Mittelwert)

Teilbearbeitungsräume	Max [kg/(ha*Ereignis)]	Mittelwert [kg/(ha*Ereignis)]	σ
Freiberger Mulde	170,1	46,3	30,2
Lausitzer Neiße	123,6	38,3	40,2
Elbestrom 1	175,0	33,6	33,6
Zwickauer Mulde	110,5	32,8	32,8
Elbestrom 2	102,3	28,8	28,8
Sächsische Weiße Elster/Pleiße	112,6	23,0	20,1
Schwarze Elster	110,9	20,1	20,1
Obere Spree	104,9	18,2	18,2
Vereinigte Mulde	101,5	16,4	16,4
Sächsische Weiße Elster/Eger	39,6	13,5	13,5

Best-Worst-Case-Szenario

Analog zur Darstellung der Bodenabträge verringern sich die Phosphorausträge bei Annahme konservierender Bodenbearbeitung um 80-90 % (vgl. Tabelle 14, Tabelle 16 und Abbildung 35). Dabei verringert sich der P-Austrag aus den OWK nicht gleichmäßig, da das Erosionsminderungspotenzial der konservierenden Bodenbearbeitung auf Böden mit hohen Schluffanteilen höher ist als auf sandigen oder tonigen Substraten (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2010). Die Ergebnisse machen deutlich, dass eine konsequente Umstellung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung zu einer deutlichen Verringerung der partikulären P-Austräge führt. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch QUINTON (2001), STRAUSS et al. (2003), ULÉN & KALINSKY (2005). QUINTON (2001) beziffert den Rückgang, basierend auf Parzellenmessung, auf ca. 70 %. Der Effekt einer höheren Tonanreicherung und einer damit zusammenhängenden höheren P-Anreicherung bei kleineren Erosionsereignissen, wie es beim BWC-Szenario der Fall ist, kann auf Grundlage der Simulationsergebnisse nicht nachgewiesen werden. Ursache dafür ist die Aggregation der Ergebnisse auf Einzugsgebietsebene.

Tabelle 16: Phosphor-Austrag aus sächsischen OWK für das BWC-Szenario (geordnet nach Mittelwert)

Teilbearbeitungsräume	Max [kg/(ha*Ereignis)]	Mittelwert [kg/(ha*Ereignis)]	σ
Freiberger Mulde	13,5	3,7	2,5
Zwickauer Mulde	8,0	2,6	1,9
Elbestrom 1	11,2	2,5	1,9
Elbestrom 2	7,0	2,1	2,0
Lausitzer Neiße	6,3	2,0	2,0
Sächsische Weiße Elster/Pleiße	8,2	1,8	1,6
Obere Spree	7,1	1,3	1,7
Vereinigte Mulde	7,6	1,3	1,1
Sächsische Weiße Elster/Eger	3,1	1,1	0,7
Schwarze Elster	6,0	1,0	1,5

Beispielrechnungen im Hölzelbergbach-Einzugsgebiet haben ergeben, dass die Anreicherung feiner Partikel mit zunehmendem Sedimentaustrag abnimmt. Das hätte eine Zunahme der P-Anreicherung im Sediment unter konservierender Bodenbearbeitung zur Folge (vgl. Abbildung 32).

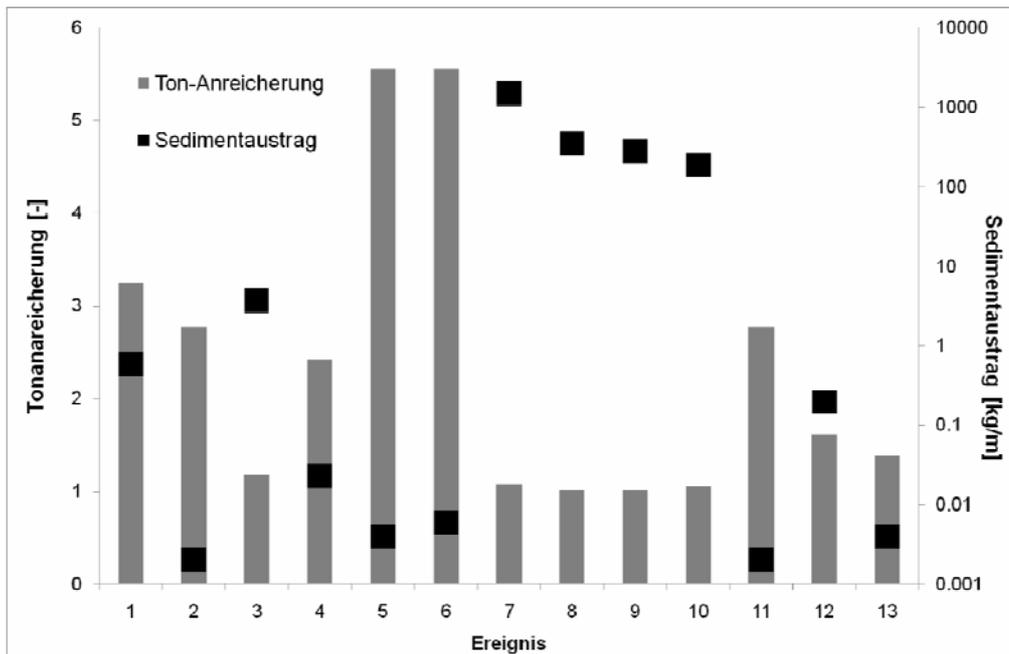


Abbildung 32: Sedimentaustrag und Ton-Anreicherung für das Referenzjahr 1994 im Hölzelbergbach-Einzugsgebiet

Darüber hinaus berichten einige Autoren über eine P-Akkumulation in den obersten Bodenschichten bei konservierender Bodenbearbeitung. Folglich würden höhere P-Konzentrationen in den Sedimentquellen bei gleichen Bodenabtragsraten zu höheren P-Austrägen als unter konventioneller Bearbeitung führen (BERTOL et al. 2007). Diese Fragestellung konnte im Vorhaben nicht untersucht werden und es ist anzunehmen, dass eine höhere P-Anreicherung in den Böden unter konservierender Bearbeitung durch den vielfach höheren Sedimentaustrag unter konventioneller Bearbeitung überkompensiert wird.

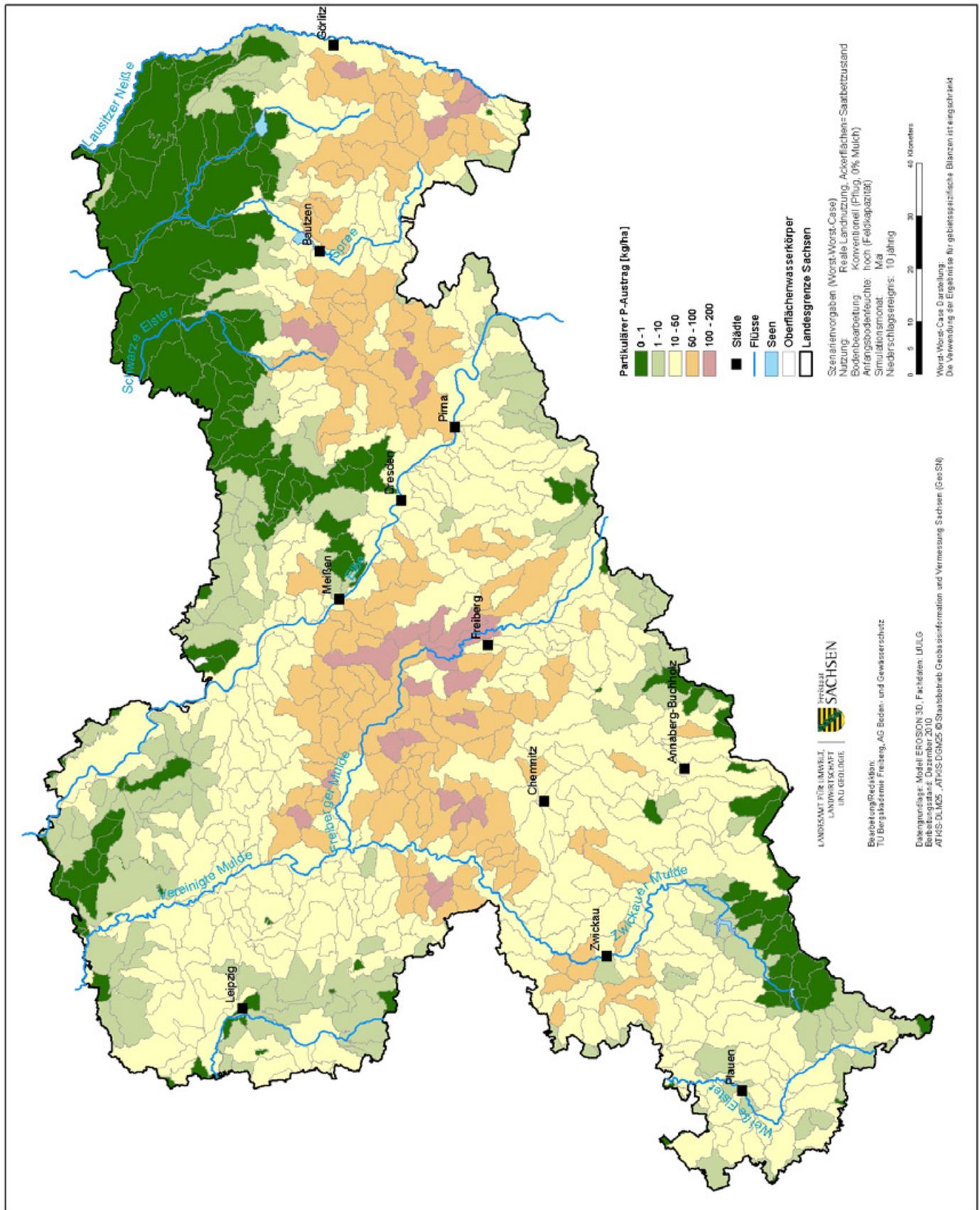


Abbildung 34: Partikuläre Phosphorausträge aus OWK in Sachsen für das Worst-Worst-Case-Szenario

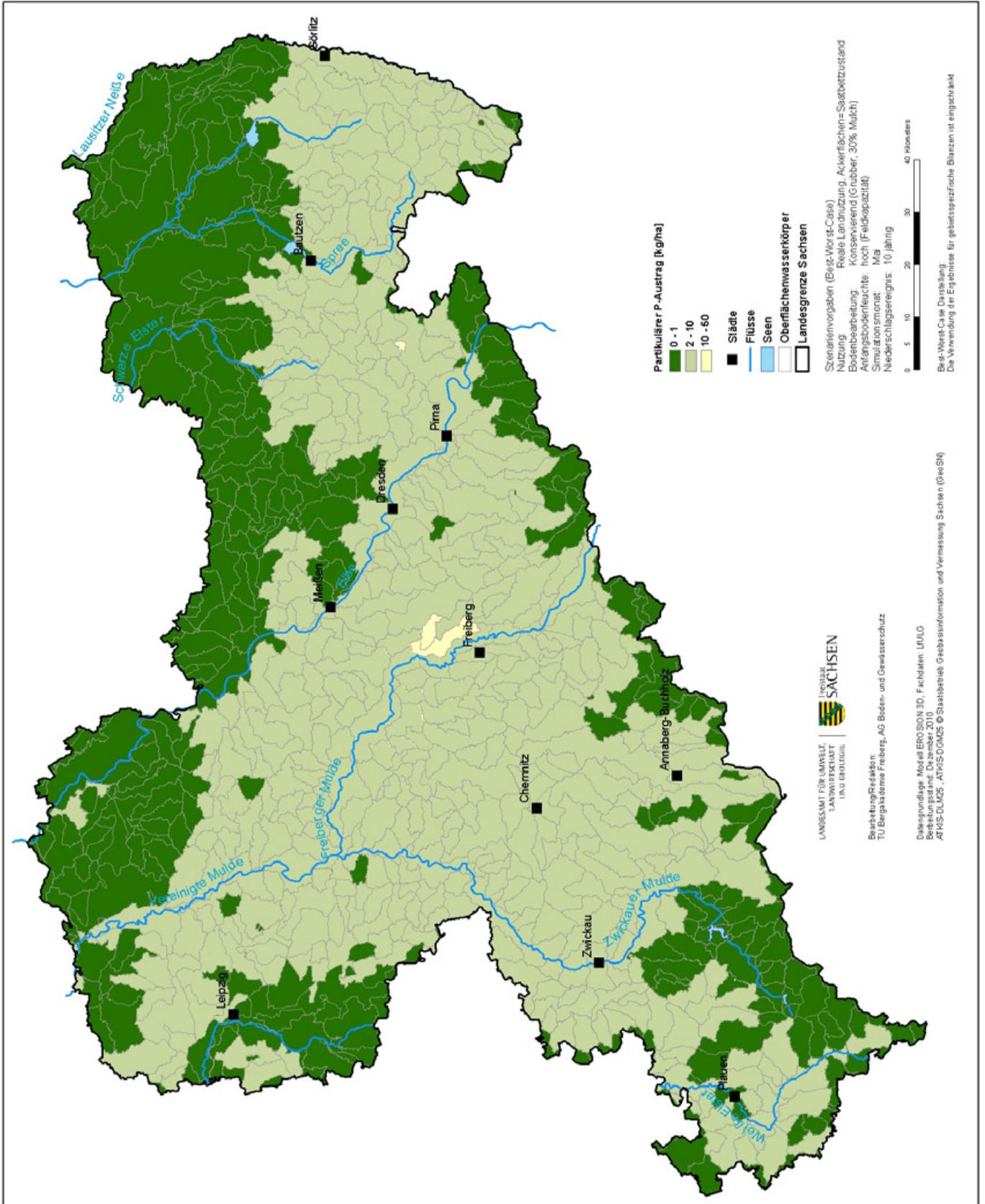


Abbildung 35: Partikuläre Phosphorausträge aus OWK in Sachsen für das Best-Worst-Case-Szenario

Vergleich mit anderen Ergebnissen

In der Literatur existieren eine Vielzahl an regionalen und überregionalen Untersuchungen, die einen Vergleich der vorliegenden Simulationsergebnisse ermöglichen. Diese Daten werden in Tabelle 17 und Tabelle 18 jeweils nach der zeitlichen Auflösung getrennt dargestellt. Verglichen mit den von anderen Autoren vorgelegten EROSION 3D-Simulationen liegen die in diesem Vorhaben errechneten P-Austräge in der gleichen Größenordnung. Die Unterschiede treten vor allem durch differierende Raum-Zeit-Bezüge auf. Auf der einen Seite weichen die betrachteten Einzugsgebiete leicht von den entsprechenden OWK ab und auf der anderen Seite werden Ereignissimulationen mit jährlichen Abschätzungen verglichen (vgl. Tabelle 17). Legt man das Ereignis als zeitlichen Bezug zugrunde, sind die Ergebnisse fast identisch, wie sich durch die Untersuchungen von NAUMANN & KURZER (2010) bestätigen lässt. Kleine Abweichungen sind auf die fehlende Berücksichtigung der P-Anreicherung im Sediment bei der P-Austragsberechnung zurückzuführen (vgl. Tabelle 18).

Die zum Teil beträchtlichen Abweichungen zu den ABAG-basierten Modellsystemen Stoffbilanz und Moneris werden durch den zeitlichen Bezug, aber vor allem durch die unterschiedliche Berechnung des Sedimentrückhaltes im Gebiet hervorgerufen (NAUMANN & KURZER 2010). Für das Jahna-Gebiet wird auf Basis einer Berechnung mit Stoffbilanz für ein Ist-Stand-Szenario ein SDR von 0,03 berechnet. Dem gegenüber steht ein SDR, basierend auf der WWC-Simulation mit EROSION 3D, von 0,65. Weil mit abnehmenden Bodenabtrag auch das SDR rückläufig ist, werden für das BWC-Szenario nur noch 0,61 erreicht.

Verglichen mit den messwertbasierten Jahresmittelwerten der LTV im Einzugsgebiet Hölzelbergbach fallen die berechneten P-Austräge höher aus. Die Differenzen zu den Messdaten der LTV können auf eine fehlende Berücksichtigung der Spitzenabflüsse im Fall von Starkregenereignissen zurückgeführt werden. Bezieht man darüber hinaus Ergebnisse von parzellenbezogenen Erosionsmessungen von QUINTON et al. (2001) und der LfL Bayern (Stand 2010) mit ein, ergibt sich ein realistisches Bild der P-Eintragsituation in Sachsen bei Annahme des schlechtestmöglichen Zustandes mit und ohne konservierender Bodenbearbeitung. Die Auswahl der Szenarienvorgaben ergibt sich aus dem Vorhabensziel, Grundlagen für Maßnahmen zur Begrenzung diffuser P-Einträge in Oberflächengewässer aus landwirtschaftlichen Nutzflächen zu liefern. Dazu sind, wie in der einschlägigen Technik üblich, Bemessungsereignisse zur Berücksichtigung maximaler Belastungszustände zugrunde zu legen.

Tabelle 17: Vergleich der P-Austräge aus sächsischen OWK mit den Ergebnissen anderer Autoren (Referenzjahre/Jahresmittelwerte)

Beispiel-EZG	Quelle	Methode	P _{part} -Fracht [kg/(ha*a)]	OWK-Name	P _{part} -Fracht dieses Projektes [kg/(ha*Ereignis)]
Lippersdorfer Bach	NAUMANN (2005)	Simulation E 3D	0,22-0,8 Ist-Stand	Talsperre Saidenbach	18,3 WWC 1,3 BWC
Jahna (gesamt)	NAUMANN & KURZER (2010)	Simulation E 3D	0,9 Ist-konservierend 5,8 Ist-konventionell	Jahna 1	79,1 WWC 5,6 BWC
Talsperre Pöhl	ARNHOLD (2007)	Simulation E 3D	2,9 Ist-Stand	Talsperre Pöhl	4,5 WWC 0,5 BWC
Talsperre Pirk	WERNER (2009)	Simulation E 3D	1,5 Ist-Stand	Talsperre Pirk	16 WWC 1,3 BWC
Talsperre Saidenbach	GEBEL (2009)	Simulation STOFFBILANZ	0,12	Talsperre Saidenbach, Haselbach, Saidenbach 1	18,3 WWC 1,3 BWC
Elbe unterhalb Schmilka bis Saalemündung	PAGENKOPF (2001)	Simulationen MONERIS	0,27	Alle Teilbearbeitungsräume außer Spree und Lausitzer Neiße	29 WWC 2,1 BWC
Hölzelbergbach	REICHELT (2007)	Messung	0,2	Hölzelbergbach	0,51-1,47 Referenzjahr

Tabelle 18: Vergleich der P-Austräge mit den Ergebnissen anderer Autoren (Ereignisse)

Beispiel-EZG	Quelle	Methode	P _{part} -Fracht [kg/(ha*Ereignis)]	OWK-Name	P _{part} -Fracht dieses Projektes [kg/(ha*Ereignis)]
Jahna (gesamt)	(NAUMANN & KURZER, 2010)	Simulation E 3D	79,8 WC 0,2 Ist-konservierend	Jahna 1	79,1 WWC 5,6 BWC
Bedfordshire, UK	QUINTON (2001)	Messung (Parzellen)	0,8-18	-	0-175 WWC 0-14 BWC
Bayern	LFL (STAND 2010)	Messung (Schlag)	1,5-24	-	0-175 WWC 0-14 BWC

3.4 Modellvalidierung

3.4.1 Abflussereignisse

Ereignis 1 (Starkregenereignis)

Für das Starkregenereignis im Mai 1995 kann der Abfluss im Hölzelbergbach relativ gut nachgebildet werden. In der Simulation setzt das Abflussereignis allerdings früher ein und ist insgesamt länger als die tatsächlich gemessene Abflusswelle. Auch der Spitzendurchfluss wird mit dem Modell wesentlich höher abgeschätzt, als es in der Messung der Fall ist. Dieser Sachverhalt kann teilweise auf die zeitliche Auflösung der Messung (30 Minuten) zurückgeführt werden. Kurze Abflussspitzen können damit nicht adäquat abgebildet werden. Darüber hinaus können hydrodynamische Prozesse im Gerinne mit dem Ansatz der kinematischen Welle für Dünnschichtabflüsse nur teilweise wiedergegeben werden (SCHINDEWOLF & SCHMIDT 2009). Der berechnete P-Austrag entspricht mit 0,96 kg fast dem gemessenen Wert (vgl. Tabelle 19). Obwohl aufgrund fehlender gemessener Sedimentausträge kein Zusammenhang zum ereignisbezogenen P-Austrag hergestellt werden kann, zeigen die Ergebnisse, dass die P-Austrags-Modellierung ein plausibles Ergebnis liefert. Mit 0,0113 kg/(ha*Ereignis) beträgt der P-Austrag für das Einzelereignis ca. 2 % vom gesamten Jahresaustrag (vgl. Tabelle 19).

Beide Ereignisse zeichnen sich durch relativ steile Hysterese-Kurven der Abfluss-Stoffkonzentration aus (vgl. Abbildung 36). Nach Ansteigen der Stoffkonzentration mit zunehmendem Durchfluss verbleiben die Werte auf relativ hohem Niveau und gehen mit sinkenden Durchflüssen langsam zurück. Dieses Verhalten ist ein Indiz, dass es sich überwiegend um erosionsbedingte Einträge aus der unmittelbaren Nähe des Gerinnes bzw. von Flächen hoher hydrologischer Konnektivität handelt (OLLESCH 2008; WEIBHAIDINGER 2009). Dafür kommen vor allem die Ackerflächen in Frage.

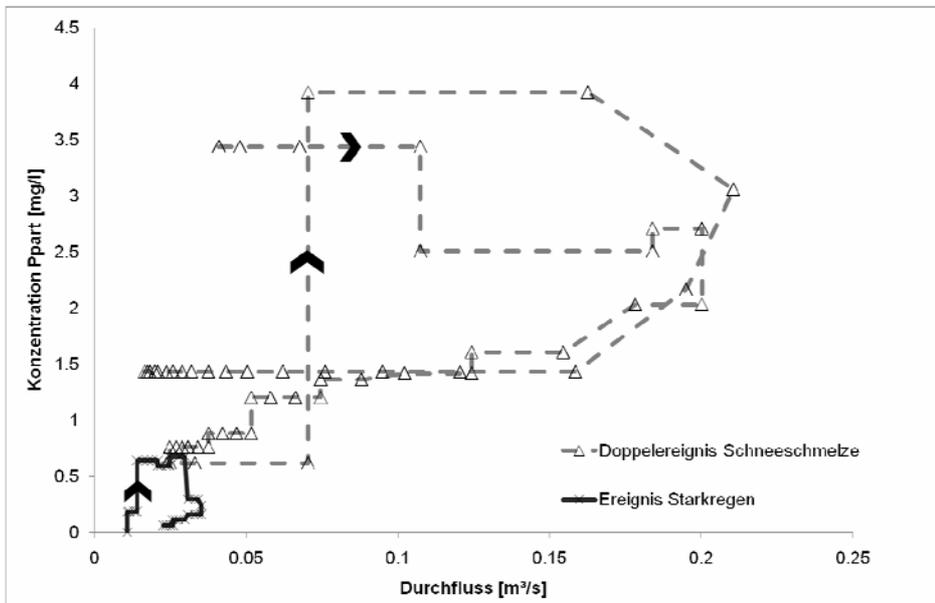


Abbildung 36: Abfluss-Phosphorkonzentration-Hysteresekurven der untersuchten Ereignisse

Weil in beiden Fällen der Spitzenaustrag an P vor dem eigentlichen Abflussscheitel liegt, kann eine Resuspension von P aus dem Bachbett und dem ufernahen Bereich, wie sie u.a. von STRAUSS & STAUDINGER (2007) bzw. MCDOWELL & SHARPLEY (2001) berichtet werden, nicht ausgeschlossen werden.

Allerdings traten im Vorfeld der untersuchten Ereignisse vergleichbare Abflussereignisse auf, die höchstwahrscheinlich einen Großteil des im Bachbett befindlichen Materials ausgeräumt haben (vgl. Abbildung 37). Das Ausmaß der Ufererosion kann auf Grundlage der vorhandenen Daten nicht abgeschätzt werden.

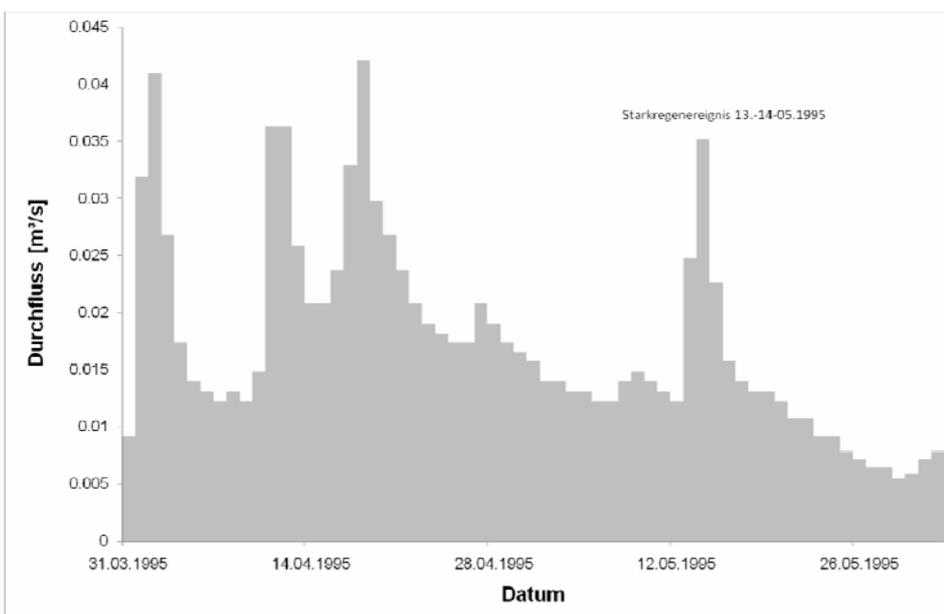


Abbildung 37: Abflussganglinie Hölzelbergbach 31.03.-30.04.1995

Ereignis 2 (Schneesmelzereignis)

Das Schneesmelzereignis im März 1996 wurde mit einem Gesamtabfluss von 7.660 m³ sehr gut nachgebildet (98 %, R^2 0,5). Vor allem die Dynamik des Abschmelzprozesses wird mit der Simulation für die Tage 17.-18.03.1996 gut simuliert. Die Abflussspitzen liegen jeweils genau übereinander, werden aber mit dem Modell etwas unterschätzt. Abweichungen existieren vor allem für den Zeitraum zwischen 21:00 und 11:00 Uhr, weil in diesem Zeitraum besonders die hohe Sensitivität von Temperatur [°C] und Windgeschwindigkeit [m/s], gemessen an der Klimastation Forchheim ca. 4 km von Untersuchungsgebiet

entfernt, zum Tragen kommt. Analog zur Abflussdynamik wird auch der P-Austrag gut abgebildet. Die Überschätzung des P-Austrags (um 40 % gegenüber dem gemessenen Austrag) ist auf die beschriebene ungenauere Abflussberechnung in der Nachhälfte zurückzuführen (vgl. Tabelle 19). Trotz dieser Abweichung ist die berechnete P-Fracht größenordnungsmäßig korrekt wiedergegeben, was für eine hohe Modellgüte zur P-Austragsmodellierung für Einzelereignisse spricht.

Mit 23,7 kg gemessenem P-Austrag werden ca. 50 % des langjährigen Mittelwertes basierend auf monatlichen Messwerten (vgl. Kapitel 3.4.2) in zwei aufeinanderfolgenden Ereignissen erreicht. SCHERER (2000) gibt für ein Kleinzugsgebiet in Baden-Württemberg an, dass 99 % des Jahresaustrages von zwei Niederschlagsereignissen erreicht werden. Das verdeutlicht, dass die P-Austragsdynamik sehr stark von Einzelereignissen geprägt ist, die bei einer Berechnung auf Basis langjähriger Mittelwerte nicht erfasst werden kann.

Tabelle 19: Ergebnisse der Modellvalidierung

Parameter	Ereignis 1 (Starkregenereignis)	Ereignis 2 (Schneesmelzereignis)
Oberflächenabfluss gemessen [m³]	779	7750
Oberflächenabfluss simuliert [m³]	764	7660
P _{part} -Austrag gemessen [kg]	0,93	23,7
P _{part} -Austrag simuliert [kg]	0,96	31,5
Sedimentaustag [kg]	524	19.036
P-Anreicherung [-]	1,4	1,46

3.4.2 Referenzjahre

Für das Teileinzugsgebiet Hölzelbergbach wurden neun Referenzjahre für die realen Fruchtfolgen der Jahre 1994 bis 2002 berechnet und mit den real gemessenen Austrägen der LTV (2010b) verglichen (vgl. Abbildung 38). Die messwertbasierten jährlichen P-Austräge schwanken zwischen 0,3 und 5,6 kg/ha. Der Mittelwert liegt bei 1,47 mit bzw. 0,51 kg P/ha ohne Einbeziehung der Extremwerte.

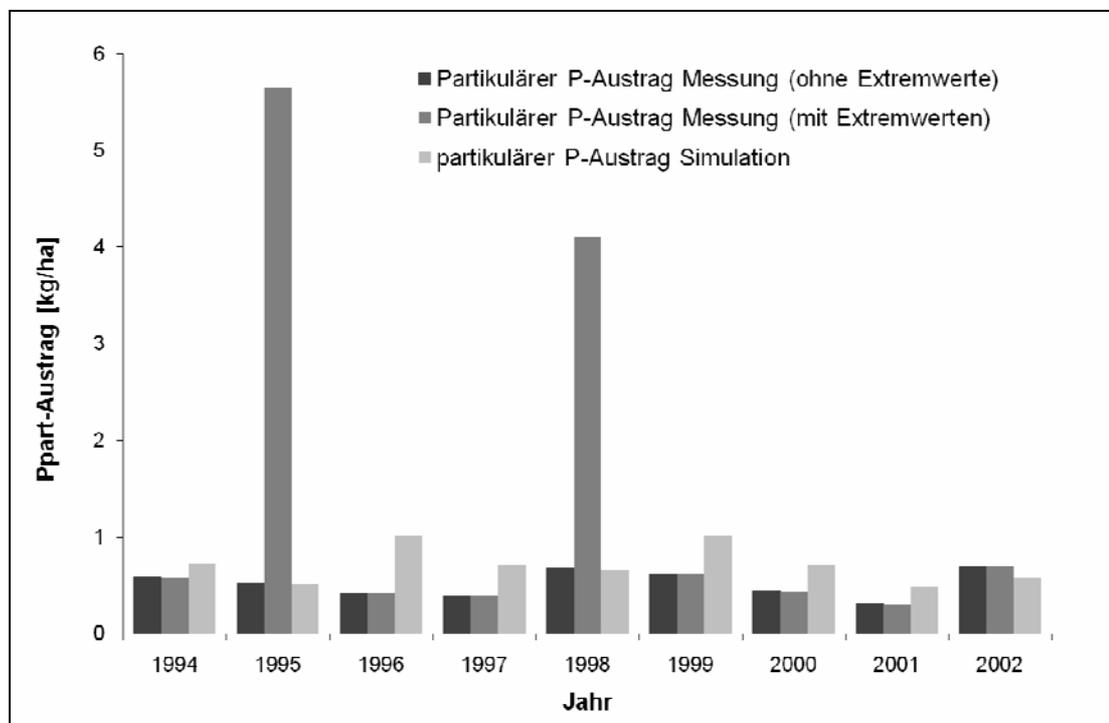


Abbildung 38: Abschätzung der partikulären P-Jahresausträge basierend auf Messwerten und Simulation für das Teil-EZG Hölzelbergbach

Die Abschätzung der P_{part} -Einträge mit Hilfe der Bodenabtragssimulation für Referenzjahre erfolgt vergleichbar zu den Abflussereignissen. Für alle Jahre wurde der gesamte Sedimentaustrag und die Verteilung der Kornfraktionen im Sediment mit den spezifischen Anreicherungsfaktoren verglichen (vgl. Kapitel 3.3.2). Der errechnete Mittelwert für die neun Referenzjahre liegt mit 0,7 kg/ha zwischen den messwertbasierten Ergebnissen mit und ohne Extremwerte. Schließt man die Extremwerte aus der Berechnung aus, liegt der simulationsbasierte langjährige P_{part} -Austrag geringfügig über dem messwertbasierten. Im Direktvergleich unterliegen die simulationsbasierten Ergebnisse, verglichen mit den messwertbasierten ohne Extremwerte, höheren interanuellen Schwankungen, die vor allem auf die Verteilung und dem flächenmäßigen Anteil von Feldfrüchten im Einzugsgebiet zurückzuführen sind. Deshalb sind die berechneten Austräge für Jahre mit einem hohen Sommergetreideanteil am höchsten (z. B. 1996 und 1999). Diese Dynamik wird durch die messwertbasierten Ergebnisse nicht wiedergegeben. Die Dynamik der messwertbasierten Daten unterliegt in erster Linie dem zufälligen Erfassen bzw. Nicht-Erfassen einzelner Ereignisse und weiterhin den jährlichen hydrologischen Charakteristiken (vgl. Abbildung 39).

Ungeachtet dessen wird angenommen, dass das Modell EROSION 3D unter den genannten Einschränkungen für das Referenzjahr sehr gute Ergebnisse liefert. Ziel zukünftiger Untersuchungen muss es sein, die Ergebnisse in unterschiedlichen Landschaftsräumen und für die verschiedenen Verfahren der Bodenbearbeitung zu testen.

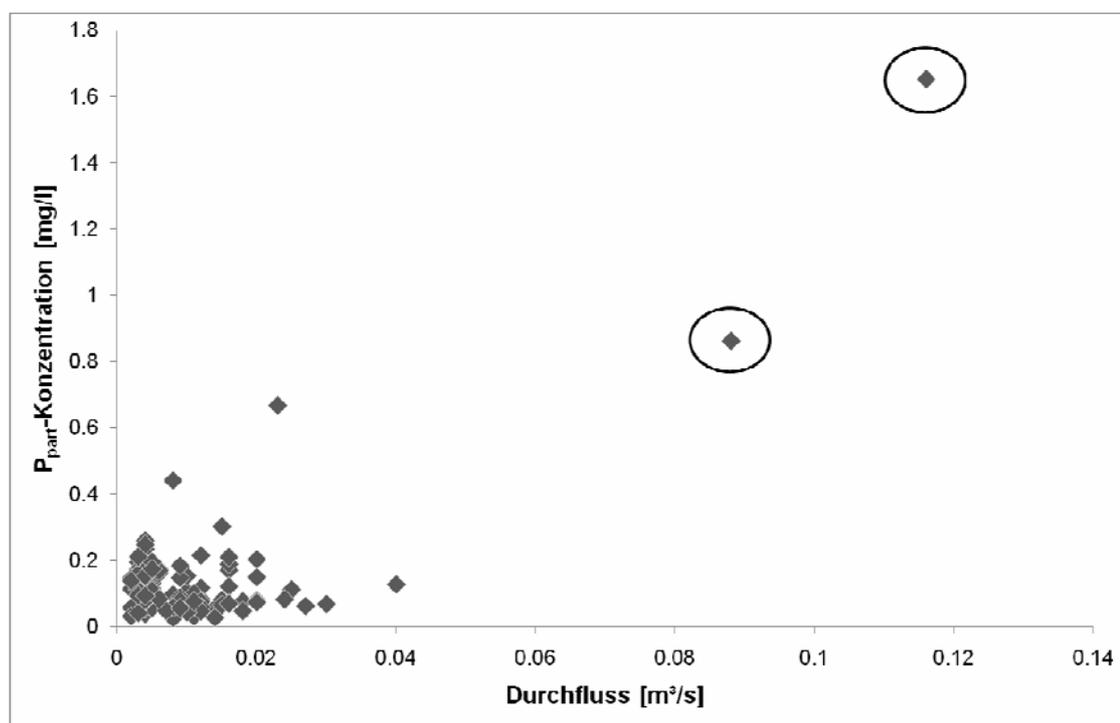


Abbildung 39: Zusammenhang zwischen Durchfluss und partikulärer P-Konzentration (Extremwerte markiert)

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Projekt EROSION 3D Sachsen erarbeitete Methodik ermöglicht es, partikelgebundene Phosphorausträge aus Oberflächenwasserkörpern ereignisbasiert für die Landesfläche von Sachsen zu simulieren. Die Ergebnisse liefern essenzielle Grundlagen zur P-Anreicherung und geben einen Einblick in das Prozessverständnis der partikelgebundenen P-Austragsdynamik von Ackerflächen.

Für Sachsen wurden auf Basis des Bodenatlas Sachsen Teil 3 (LfUG 2000) Oberboden-P-Gehalte für Ackerflächen regionalisiert und mit eigenen Beprobungen in den Testgebieten Talsperre Bautzen und Talsperre Saidenbach validiert. In den Testgebieten wurden zusätzlich erosionsanfällige Bodenarten beprobt und hinsichtlich der P-Verteilung in den Kornfraktionen untersucht. Die Anreicherung an P ist in der Tonfraktion mit 3,96 am höchsten. Die Anreicherung in der Schluff- und Sandfraktion ist abhängig von der Bodenart und der Gesamtkonzentration und liegt im Mittel bei 0,55 bzw. 0,66.

Sediment- und sedimentgebundene Phosphorausträge stellen keinen kontinuierlichen Prozess dar, sondern werden durch einzelne Erosionsereignisse gesteuert. Aus diesem Grund erfolgte die Simulation des P-Austrags ereignisbasiert für Niederschlagsereignisse mit 10-jähriger statistischer Wiederkehr für den schlechtestmöglichen Fall bei konventioneller Bodenbearbeitung (Worst-Worst-Case-Szenario: Ackerfläche im Saatbettzustand ohne Bedeckung nach Bodenbearbeitung mit Pflug) und konservierender Bodenbearbeitung (Best-Worst-Case-Szenario: Ackerfläche im Saatbettzustand, mit 30 % Bedeckung nach nicht-wendender Bodenbearbeitung mit Grubber). Beide Szenarien bilden damit Zustände ab, die Bemessungsgrundlage für die Maßnahmenplanung im Feldmaßstab darstellen sollten. Die Eintrittswahrscheinlichkeit der mit dem Modell EROSION 3D abgeschätzten Bodenverluste, Sediment- und Phosphorausträge der simulierten Szenarien für gesamte Oberflächenwasserkörper bzw. den Freistaat Sachsen ist hingegen theoretischer Natur.

Die Hotspots des Bodenabtrags befinden sich im lössbeeinflussten hügeligen zentralen Landesteil Sachsens. Das nördliche Tiefland ist gering betroffen, im Mittelgebirgsraum herrscht eine mittlere Erosionsgefährdung. Bezogen auf die Teilbearbeitungsgebiete der EG-WRRL ist das Gebiet Elbestrom 2 mit fast 50 % erosionsgefährdeter Fläche für das Worst-Worst-Case-Szenario am stärksten betroffen. Im Best-Worst-Case-Szenario werden nur noch ca. 8 % der Bodenabträge des Worst-Worst-Case-Szenarios erreicht, die räumliche Verteilung der Bodenumlagerungsprozesse ändert sich jedoch nicht. Weil Techniken der konservierenden Bodenbearbeitung ein bodenartspezifisches Erosionsminderungspotenzial haben, schwankt der Anteil der am Abtrag beteiligten Flächen geringfügig.

Die Sediment- und Phosphorausträge sind in den Gebieten hoher Bodenabträge erwartungsgemäß am größten. In den Oberflächenwasserkörpern der Lösshügelländer und dem Vorerzgebirgischen Becken werden daher die höchsten P-Austräge für das Worst-Worst-Case-Szenario erreicht. Der Raum Freiburger Mulde ist aufgrund des hohen Entwässerungsanteils aus dem Mulde- und Mittelsächsischen Lösshügelland besonders gefährdet. Die Einzugsgebiete von Vereinigter Mulde und sächsischer Weißer Elster/Pleiße sind weniger gefährdet, weil sie sowohl durch geringe Oberboden-P-Gehalte als auch geringe Sedimentausträge charakterisiert sind.

Bei Annahme konsequenter Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung werden die P-Austräge signifikant um 80-90 % gesenkt, was durch die Untersuchungen von QUINTON (2001), STRAUSS et al. (2003) und ULÉN & KALISKY (2005) bestätigt wird. Die mit dem Modell EROSION 3D abgeschätzten P-Austräge sind bei Annahme der Szenarienvorgaben plausibel. Der Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren bei Ist-Stand-Simulationen bzw. messwertbasierten mittleren Jahresbilanzen führt deshalb zu einer hohen Abweichung, weil Zeitrahmen und Feldzustände erheblich voneinander abweichen. Verglichen mit schlag- bzw. parzellenbezogenen Messergebnissen für Einzelereignisse kann jedoch geschlossen werden, dass die simulierten P-Austräge für die parametrisierten Szenarien realistisch sind.

Die im Vorhaben erarbeiteten Ergebnisse verdeutlichen einmal mehr die Notwendigkeit ereignisbasierter prozessorientierter Modellierung als Grundlage für die Planung und Bemessung von Schutzmaßnahmen. Nur die Kenntnis der beteiligten Prozesse, die Identifizierung der Sedimentlieferflächen bzw. Sedimentübertrittspunkte in Gewässer und die Quantifizierung der eingetragenen Sediment- und Phosphormengen ermöglicht den sächsischen Umwelt- und Planungsbehörden eine effiziente Maßnahmenplanung auf der Ebene der Oberflächenwasserkörper.

5 Quellenverzeichnis

- Ad-Hoc-AG-Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. verbesserte und erweiterte Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover, 483 S.
- AKKERMANN, M. (2004): Beurteilung des Einflusses einer angepaßten Ackernutzung auf den Hochwasserabfluss. Dissertation, Universität Hannover, Hannover, 154 S.
- ARNHOLD, S. (2007): Abschätzung des partikelgebundenen Phosphateintrages in die Talsperre Pöhl (Vogtland) mit Hilfe des Simulationsmodells EROSION 3D. Diplomarbeit, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 116 S.
- ARNOLD, J.G. & ALLEN, P.M. (1999): Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from streamflow records. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2): S. 411-424.
- ARNOLD, J.G., ALLEN, P.M., MUTTIAH, R. & BERNHARDT, G. (1999): Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Ground Water*, 33(6): S. 1010-1018.
- BERTOL, I., ENGEL, F.L., MAFRA, A.L., BERTOL, O.J. & RITTER, S.R. (2007): Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. *Soil and Tillage Research*, 94(1): S. 142-150.
- BMELV (2009): Inlandsabsatz von Düngemitteln.
- EG (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik vom 22.12.2000.
- ENGELHARDT, S. (1996): Partikelgebundener Schwermetalltransport aus einem kleinen Einzugsgebiet (Hölzelbergbach, östliches Erzgebirge) Diplomarbeit, Universität Göttingen, Göttingen, 80 S.
- ERNST, H. & FÖRSTER, F. (2009): Ausgewählte Ergebnisse zur Anwendung des Düngungsmodells BEFU im Freistaat Sachsen 1997-2009.
- GEBEL, M., HALBFAß, S., KAISER, M., SUDBRAK, R. & NAUMANN, S. (2009): Modellgestützte Erfolgskontrolle von P-Maßnahmen zur Minderung partikelgebundener P-Einträge - Posterbeitrag, Workshop Stoffbilanzierung, Dresden.
- GeoSN (2005): Amtlich Topographisches Kartographisches Informationssystem - Digitales Landschaftsmodell 1:25.000 (ATKIS-DLM25).
- GREEN, W. & AMPT, G. (1911): The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.*, 4: S. 1-24.
- GRÜNEWALD, U., BLATTNER, M. & REICHEL, C.-P. (1996): Verbundprojekt "Prognosemodell für die Gewässerbelastung durch Stoffeintrag aus kleinen Einzugsgebieten" Teilprojekt 16: "Hydrologische Grundlagen zur Stabilitätssicherung regionaler Wasserressourcensysteme unter sich verändernden Nutzungs- und Umweltbedingungen" Abschlussbericht., BTU Cottbus, Cottbus.
- HALBFAß, S., GEBEL, M., FRIESE, H., GRÜNEWALD, K. & MANNSFELD, K. (2009): Atlas der Nährstoffeinträge in sächsische Gewässer. LfULG, Dresden.
- HEBEL, B. (2003): Validierung numerischer Erosionsmodelle in Einzelhang und Einzugsgebietsdimension. *Physiogeographica, Baseler Beiträge zur Physiogeographie*, 32: S. 181.
- JETTEN, V., DE ROO, A. & FAVIS-MORTLOCK, D. (1999): Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models. *CATENA*, 37(3-4): S. 521-541.
- KLIK, A., ZARTL, A.S., HEBEL, B. & SCHMIDT, J. (1998): Comparing RUSLE, EROSION 2D/3D, and WEPP soil loss calculations with four years of observed data, ASAE No. 982055, S.
- KÖHLER, S. (2000): Eine Datenbank-Anwendung zur komfortablen Auswahl von Parametern für ein Bodenerosionsprogramm. Studienarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- KÖTHE, R., BOCK, M. & VOGEL, E. (2005): Expertise zum Forschungsvorhaben. Landnutzung und Hochwasserschutz. Teilvorhaben Reliefanalyse Sachsen: Korrektur des ATKIS-DGM, Berechnung morphometrische Reliefparameter, Erstellung einer digitalen Geomorphographischen Karte (GMK20 Sachsen), Untersuchungen zur Erosion und Auenbödenverbreitung, Göttingen.
- LAWA (1993): Richtlinie für die Gebietsbezeichnung und die Verschlüsselung von Fließgewässern, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Düsseldorf.
- LAWA (2003): Ermittlung von Stofffrachten in Fließgewässern Ermittlung von Stofffrachten in Fließgewässern. Probenahmestrategien und Berechnungsverfahren. – Oberirdische Gewässer: Konzepte und Strategien. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Berlin, 71 S.

- LEICHTFUß, A., LOHR, H. & WÖLFEL, D. (2006): Verbesserte Ansätze für Wasser- und Stoffstrommanagement in intensiv genutzten kleinen Einzugsgebieten auf der Grundlage von integrierten Nutzen- und Risikobewertungen. Abschlussbericht, Darmstadt.
- LfL (2005a): Klimadaten der Station Forchheim für den Zeitraum 1994-2004.
- LfL (2005b): Landnutzungsdaten im Teileinzugsgebiet Hölzelbergbach (Einzugsgebiet Talsperre Saidenbach).
- LfL und GeoGnostics (2005): Erarbeitung der digitalen Datengrundlage für die Anwendung von EROSION-3D auf mesoskaliger Maßstabsebene mit Durchführung einer Erosionssimulation für das zu bearbeitende Gebiet, Leipzig/Berlin.
- LfL (Stand 2010): Oberflächenabfluss, Boden- und Nährstoffaustrag, <http://www.lfl.bayern.de/iab/bodenschutz/08131/>.
- LfUG (1994a): Bodenerosionsmessprogramm Sachsen Auswertung der Beregnungsversuche 1-28 vom 4.-31.10.1993, Freiberg.
- LfUG (1994b): Bodenerosionsmessprogramm Sachsen Auswertung der Beregnungsversuche 29-49 vom 2.-12.05.1994, Freiberg.
- LfUG (1995a): Bodenerosionsmessprogramm Sachsen Auswertung der Beregnungsversuche 50-76 vom 26.9.-12.10.1994, Freiberg.
- LfUG (1995b): Bodenerosionsmessprogramm Sachsen Auswertung der Beregnungsversuche 77-94 vom 9.5.-19.5.1995, Freiberg.
- LfUG (1996): Bodenerosionsmessprogramm Sachsen Auswertung der Beregnungsversuche 95-116 vom 3.10.-13.10.1996, Freiberg.
- LfUG (2000): Bodenatlas des Freistaates Sachsen - Teil 3: Bodenmessprogramm Dresden.
- LfUG (Hg.), (2005a): Klimawandel in Sachsen, Dresden.
- LfUG (2005b): Reichsbodenschätzung 1:10.000.
- LfUG (2007a): Bodenatlas des Freistaates Sachsen, Teil 4: Auswertungskarten zum Bodenschutz - Erläuterungsheft -, Dresden.
- LfUG (2007b): Sächsische Fließgewässer.
- LfULG (2009): Phosphorgehalte für Sachsen. Auszug aus dem Fachinformationssystem Boden.
- LfULG (Stand 2009): Bodenkarte Freistaat Sachsen 1:50.000.
- LTV (2010a): Die LTV stellt sich vor, <http://www.smul.sachsen.de/smul/13206.htm>.
- LTV (2010b): Daten zur Gewässergüte in den Einzugsgebieten Saidenbach und Hölzelbergbach 1994-2004.
- MANNSFELD, K. & SYRBE, R. U. (Hg.) (2008): Naturräume in Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde, Bd. 257. Deutsche Akademie für Landeskunde, Leipzig.
- MCDOWELL, R. W. & SHARPLEY, A.N. (2001): A comparison of fluvial P chemistry in relation to location and potential to influence stream P concentrations Aquatic Geochemistry, 7: S. 255-265.
- MICHAEL, A., SCHMIDT, J. & SCHMIDT, W. (1996): EROSION 2D ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser - Band II Parameterkatalog, Freiberg.
- MICHAEL, A., SCHMIDT, J., ENKE, W., DEUTSCHLÄNDER, T. & MALITZ, G. (2005): Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss--results of comparative model simulations. CATENA, 61(2-3): S. 155-164.
- MILLER, N., QUINTON, J.N., BARBERIS, E. & PRESTA, M. (2009): Variability in the Mobilization of Sediment and Phosphorus across 13 European Soils. J. Environ. Qual., 38: S. 742-750.
- MONTANARELLA, L. (2010): Boden als Schnittstelle zwischen Landwirtschaft und Umwelt, http://ec.europa.eu/agriculture/envir/report/de/inter_de/report.htm, (18.11.2010).
- MÜLLER, G. (1964): Methoden der Sediment-Untersuchungen. Sediment-Petrologie, Teil 1. Schweitzerbart, Stuttgart, 303 S.
- NAUMANN, S. (2005): Abschätzung der punktuellen und diffusen Phosphoreinträge in den Lippersdorfer Bach, einem Teileinzugsgebiet der Talsperre Saidenbach (Erzgebirge). Diplomarbeit, Universität, Leipzig, 107 S.
- NAUMANN, S. & KURZER, J. (2010): Etablierung eines Entscheidungshilfesystems zur Erstellung von Managementplänen auf Einzugsgebietsebene, Dresden.
- OLLESCH, G. (2008): Erfassung und Modellierung der Schneesmelzerosion am Beispiel der Kleineinzugsgebiete Schäfertal (Deutschland) und Lubazhinka (Russland). Habilitationsschrift, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 213 S.
- PAGENKOPF, W. G. (2001): Analyse der Nährstoffkonzentrationen, -frachten und -einträge im Elbeeinzugsgebiet, Hamburg.
- QUINTON, J. N. (1999): Detachment and transport of particle-bound P: process and prospects for modeling. , COST Action on Phosphorus Meeting, Cordoba, Spain, S.
- QUINTON, J. N., CATT, J. A. & HESS, T. M. (2001): The Selective Removal of Phosphorus from Soil: Is Event Size Important? J. Environ. Qual., 30: S.:538-545.

- REICHEL, C.-P. (2007): Reduzierung von Stoffeinträgen durch wasserschutzkonforme Landwirtschaft am Beispiel der Talsperre Saidenbach, Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie 2. Gewässerforum Mulde – Weiße Elster, Nossen.
- RICHTER, S. (2004): Ableitung und Bewertung von Strategien zur Minderung des Bodeneintrages in die Talsperre Bautzen unter Anwendung des Erosionssimulationsmodells EROSION 3D. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Dresden, 96 S.
- SCALENGHE, R., EDWARDS, A.C. & BARBERIS, E. (2007): Phosphorus loss in overfertilized soils: The selective P partitioning and redistribution between particle size separates. *European Journal of Agronomy*, 27(1): S. 72-80.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 593 S.
- SCHERER, U. (2000): Modelling phosphorus transport processes in a small southern German rural catchment, The Role of Erosion and Sediment Transport in Nutrient and Contaminant Transfer. *IAHS Publ, Waterloo*, S. 285-292.
- SCHILDE, M. (2008): Modelling Soil Erosion in the Zhifanggou-Watershed on the Chinese Loess Plateau using EROSION 2/3D, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 79 S.
- SCHINDEWOLF, M. & SCHMIDT, W. (2009): Validierung EROSION 3D. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 15: S. 121.
- SCHINDEWOLF, M. & SCHMIDT, W. (2010): EROSION 3D Sachsen, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- SCHMIDT, J. (1991): A mathematical Model to Simulate Rainfall Erosion. In: H.-R. Bork, J. de Ploey and A.P. Schick (Editors), *Erosion, Transport and deposition processes - theories and models. Catena Supplement*, S. 101-109.
- SCHMIDT, J. (1992): Modeling long term soil loss and landform change. In: A.J. Parson and A.D. Abrahams (Editors), *Overland flow - Hydraulics and Erosion Mechanics*. UCL Press, London, S. 409-433.
- SCHMIDT, J. (1996): Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter, landwirtschaftlicher Nutzflächen. *Berliner Geographische Abhandlungen*, 61, 148 S.
- SCHMIDT, J., VON WERNER, M. & MICHAEL, A. (1996): EROSION 2D/3D. Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser, Dresden/Freiberg.
- SCHMIDT, J. (1998): Modellbildung zur Bodenerosion. In: G. Richter (Editor), *Bodenerosion: Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, S. 137-151.
- SCHMIDT, J., WERNER, M.V. & MICHAEL, A. (1999): Application of the EROSION 3D model to the Catsop watershed, The Netherlands. *CATENA*, 37(3-4): S. 449-456.
- SCHOB, A., SCHMIDT, J. & TENHOLTERN, R. (2006): Derivation of site-related measures to minimise soil erosion on the watershed scale in the Saxonian loess belt using the model EROSION 3D. *CATENA*, 68(2-3): S. 153-160.
- SEIDEL, N. (2008): Untersuchung der Wirkung verschiedener Landnutzungen auf Oberflächenabfluss und Bodenerosion mit einem Simulationsmodell. Dissertation, Technische Universität Bergakademie, Freiberg, 168 S.
- SMUL (Hg.), (2008): Sachsen im Klimawandel - Eine Analyse, Dresden.
- Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsens (2010): Bodennutzung des Jahres 2009.
- STRAUSS, P., SWOBODA, D. & BLUM, W.E.H. (2003): How effective is mulching and minimum tillage to control runoff and soil loss?—a literature review, *Proceedings of "25 years of Assessment of Erosion"*, Ghent, S. 545–550.
- STRAUSS, P. & STAUDINGER, B. (2007): Berechnung der Phosphor- und Schwebstofffrachten zweier Hauptzubringer (Zellerache und Fuschlerache) des Mondsees. Schriftenreihe BAW, 26: S. 18-33.
- SUDBRACK, R. (2005): Schriftliche Mitteilung. LTV, Pirna.
- ULÉN, B.M. & KALISKY, T. (2005): Water erosion and phosphorus problems in an agricultural catchment--Need for natural research for implementation of the EU Water Framework Directive. *Environmental Science & Policy*, 8(5): S. 477-484.
- VON WERNER, M., SCHRÖDER, A. & SCHMIDT, J. (2004): Abschätzung des Oberflächenabflusses und der Wasserinfiltration auf landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Hilfe des Modells EROSION-3D Endbericht, Berlin.
- VON WERNER, M. & SCHRÖDER, A. (2005): Erarbeitung der digitalen Datengrundlage von EROSION-3D auf mesoskaliger Maßstabsebene mit Durchführung einer Erosionssimulation für das zu bearbeitende Gebiet. Abschlussbericht, Dresden.
- WEIGERT, A., WENK, G., OLLESCH, G. & FRITZ, H. (2003): Simulation of snowmelt erosion using the EROSION 3D model. *Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences*, 1/2003: S. 128-130.
- WEIGERT, A. & SCHMIDT, J. (2005): Water transport under winter conditions. *CATENA*, 64(2-3): S. 193-208.

- WEIßHAIDINGER, R. (2009): Schwebstoff- und Phosphordynamik in agrarisch genutzten Landschaftsökosystemen Oberflächen- und oberflächennahe Transportprozesse in Kleineinzugsgebieten des Basler Tafeljura (Schweiz). Dissertation, Universität Basel, Basel, 134 S.
- WERNER, U. (2009): Anwendung des Simulationsmodells EROSION 3D zur Abschätzung des partiklegebundenen Phosphateintrages in die Talsperre Pirk. Diplomarbeit, Technische Universität Freiberg, Freiberg, 80 S.
- WILD, A. (1988): Plant nutrients in soil: Phosphate. In: A. Wild (Editor), Russell's soil conditions and plant growth. Longman Scientific and Technical, Harlow, UK, S. 695-743.

6 Anhang

Tabelle 20: pH-Werte, C_{org}-Gehalte und P-Gehalte der Bodenproben im Einzugsgebiet der Talsperre Saidenbach

Probennummer	pH-Wert (CaCl ₂)	C _{org} -Gehalt [%]	Gesamt-P [mg/kg]
Sai_0	5,32	3,2	1415
Sai_1	4,65	2,3	1390
Sai_2	5,55	2,5	1320
Sai_3	5,7	2,6	1720
Sai_4	5,6	2,3	1220
Sai_5	5,3	2,2	1020
Sai_6	5,4	2,9	1210
Sai_8	5,6	2,6	993
Sai_9	5,4	3,7	1030
Sai_10	5,7	3,5	1420
Sai_11	5,7	2,6	1070
Sai_12	5,4	2,6	1060
Sai_13	5,2	2,5	1510
Sai_14	5,5	3,1	1050
Sai_15	4,6	2,5	1040
Sai_16	5,4	2,4	871
Sai_17	4,8	2,8	1430
Sai_18	5,9	2,9	689
Sai_19	5,9	2,7	1280
Sai_20	5,6	2,7	1260
Sai_21	5,9	2,5	1090
Sai_22	5,9	3,6	1640
Sai_23	5,4	2,5	1100
Sai_24	5,9	3,2	885
Sai_27	6,0	2,8	1360
Sai_29	5,9	2,7	999
Sai_31	5,9	2,1	808
Sai_32	5,2	1,4	1000
Sai_33	6,2	2,4	1070

Tabelle 21: pH-Werte, C_{org}-Gehalte und P-Gehalte der Bodenproben im Einzugsgebiet der Talsperre Bautzen

Probennummer	pH-Wert (CaCl ₂)	C _{org} -Gehalt [%]	Gesamt-P [mg/kg]
Bau_0	5,2	1,7	621
Bau_1	5,2	1,6	545
Bau_2	6,6	1,8	592
Bau_3	6,7	2,2	550
Bau_5	6,1	1,2	294
Bau_6	6,4	2,0	831
Bau_9	6,2	1,6	635
Bau_10	6,5	1,8	506
Bau_11	5,7	1,6	687
Bau_12	5,7	2,1	860
Bau_14	5,8	1,6	541
Bau_15	6,0	2,1	660
Bau_16	5,8	1,5	490
Bau_17	5,6	1,3	553
Bau_18	5,4	1,9	584
Bau_19	6,1	1,9	810
Bau_20	5,2	1,9	585
Bau_23	6,3	1,7	745
Bau_25	6,2	1,6	687
Bau_29	5,1	1,5	716
Bau_30	6,1	1,1	566
Bau_31	6,4	2,1	742
Bau_34	7,0	2,6	913
Bau_35	4,8	1,8	695
Bau_36	6,5	1,6	496
Bau_37	5,8	2,3	1310
Bau_38	5,4	2,0	886
Bau_39	4,9	2,3	909
Bau_40	4,9	2,6	961
Bau_41	6,3	2,1	1170

Tabelle 22: Statistische Auswertung der Atterbergproben

Parameter	\bar{x}	σ	Minimum	Maximum
Sandgehalt [%]	35	20,8	9	62
Schluffgehalt [%]	52	16,9	31	78
Tongehalt [%]	13	6,4	6	27
pH-Wert	5,7	0,4	4,9	6,35
C _{org} -Gehalt	2,2	0,8	1,1	3,7
P-Gesamt [mg/kg]	891	346,8	490	1640
PAF-Sand	0,66	0,5	0,14	2,10
PAF-Schluff	0,55	0,3	0,24	5,37
PAF-Ton	3,96	0,5	3,17	1,16

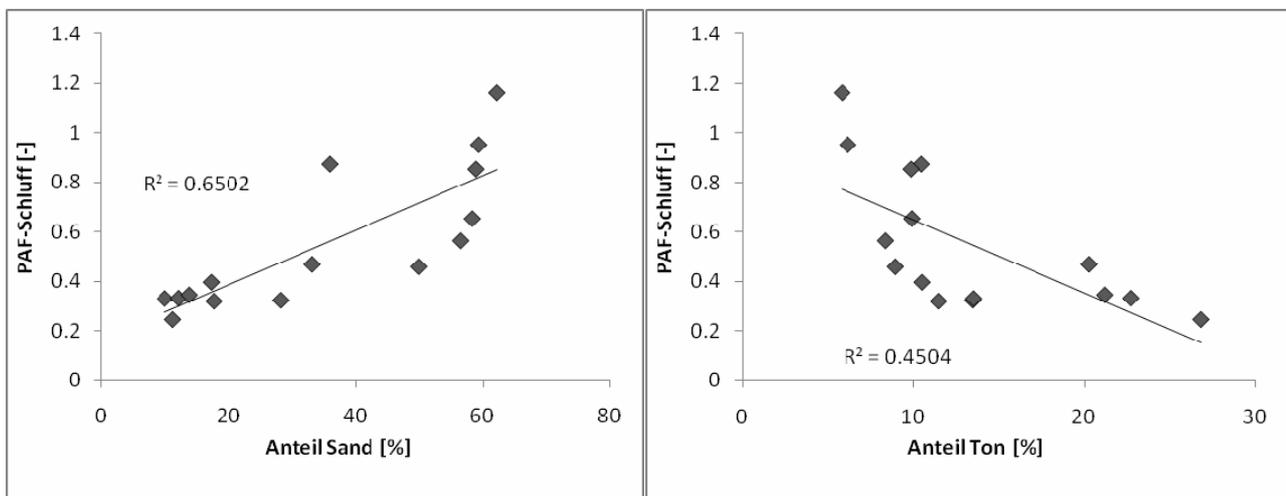


Abbildung 40: Zusammenhang zwischen P-Anreicherungsfaktor im Schluff und Sandgehalt (links) bzw. Tongehalt (rechts)

Tabelle 23: Mittlerer Bodenabtrag der Bodenregionen für das BWC-Szenario (geordnet nach Mittelwert)

Bodenregion	Fläche [km²]	Flächenanteil [%]	$\bar{\sigma}$ [kg/m²]	σ
Bautzener Lösshügelland	448.0	60.0	-1.12	4.3
Mittelsächsisches Lösshügelland	750.0	68.2	-1.09	4.7
Mulde-Lösshügelland	1217.0	58.5	-0.98	4.0
Zeitz-Altenburger Lösshügelland	200.0	65.5	-0.97	3.9
Oberlausitzer Lösshügelland	649.0	55.8	-0.91	3.4
Westlausitzer Lösshügelland	635.0	49.8	-0.81	3.3
Oberlausitzer Bergland	352.0	35.9	-0.80	3.2
Nordwestsächsisches Lösshügel- und Vulkanitkuppenland	605.0	52.3	-0.73	3.6
Elbsandsteingebirge	297.0	15.9	-0.70	2.3
Weißenfelser Lössstiefland	35.0	48.2	-0.68	3.1
Östlicher Erzgebirgsnordrand	537.0	47.6	-0.66	2.8
Hallesches Lössstiefland	144.0	65.0	-0.61	3.2
Vorerzgebirgisches Becken	773.0	47.7	-0.58	2.6
Oberlausitzer Tieflandrand	358.0	39.4	-0.56	2.9
Bornaer Lössstiefland	318.0	31.8	-0.54	2.6
Nordsächsisches Lössstief- und Plattenland	571.0	60.9	-0.52	2.2
Erzgebirgsnordabdachung	1878.0	40.8	-0.52	1.9
Leipziger Lössstiefland	956.0	50.1	-0.50	2.4
Ronneburger Lösshügelland	12.0	50.0	-0.49	1.5
Östliches Fichtelgebirge	39.0	21.8	-0.48	1.7
Westlicher Erzgebirgsnordrand	587.0	40.1	-0.44	1.7
Tal der Vereinigten Mulde	200.0	27.2	-0.44	3.1
Elster-Luppe-Auen	354.0	7.6	-0.41	3.0
Großenhainer Lössstiefland	324.0	56.8	-0.41	2.1
Dresdener Elbtalweitung	235.0	19.7	-0.40	3.1
Thüringer Schiefergebirge	45.0	31.2	-0.39	1.0
Riesa-Torgauer Elbtal	294.0	37.2	-0.39	2.4
Rothenburger Neißetal und Muskauer Durchbruch	112.0	11.8	-0.32	2.2
Vogtländisches Kuppenland	480.0	34.6	-0.30	1.4
Erzgebirgskamm und obere Lagen	454.0	9.5	-0.27	1.2

Bodenregion	Fläche [km²]	Flächenanteil [%]	Ø [kg/m²]	σ
Mehlteuer Hochfläche	123.0	39.6	-0.26	1.1
Elstergebirge	126.0	66.3	-0.25	0.8
Düben-Dahleener Heide	589.0	21.7	-0.21	1.8
Höheres Westerzgebirge	590.0	13.0	-0.19	1.4
Elsterwerda-Herzberger Elsterniederung	249.0	12.5	-0.19	1.5
Großenhainer Rödertal	81.0	16.5	-0.19	1.4
Nieskyer Platten	254.0	17.8	-0.16	0.9
Zittauer Gebirge	33.0	3.0	-0.13	1.1
Oberlausitzer Heide- und Teichlandschaft	688.0	6.6	-0.13	1.2
Westlausitzer Heide- und Kuppenland	766.0	8.6	-0.11	1.0
Senftenberger Heide- und Seengebiet	209.0	3.8	-0.05	0.6
Muskauer Heide	460.0	1.2	-0.05	0.3
Niederlausitzer Grenzwall	174.0	4.1	-0.05	0.6

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

Autor:

Marcus Schindewolf
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau

Redaktion:

Dr. Walter Schmidt
LfULG, Abteilung Pflanzliche Erzeugung/Referat Bodenkultur
Telefon: + 49 341 9174-116
Telefax: + 49 341 9174-111
E-Mail: walter.schmidt@smul.sachsen.de

Redaktionsschluss:

31.01.2012

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

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

Verteilerhinweis

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

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